COBRAMSEG 2026

ANAIS DO
XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Eixos Temáticos:

Geologia de Engenharia
Geossintéticos na Engenharia
Geotecnia Ambiental

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Centro-Oeste
Núcleo Regional

COBRAMSEG 2026

ANAIS DO

XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

XI SIMPÓSIO BRASILEIRO
DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Eixos Temáticos:

Geologia de Engenharia
Geossintéticos na Engenharia
Geotecnia Ambiental

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Centro-Oeste
Núcleo Regional

Editora Omnis Scientia

Anais do XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2026

Eixo Temático:

Geologia de Engenharia

Geossintéticos na Engenharia

Geotecnia Ambiental

Volume 1

1ª Edição

RECIFE - PE

2026

Patrocínio Diamante

VALE

Patrocínio Rubi

CZM FOUNDATION EQUIPMENT

Patrocínio Esmeralda

SETE ENGENHARIA

INCOPRE PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO

srk

REDE Sondagens Geotécnicas

Patrocínio Água Marinha

Incotep Sistemas de Ancoragem

Solotrat

SHEIKAN ANCOR-JET FIBRAS

MACCAFERRI

belgo arames

ArcelorMittal

GERDAU O futuro se molda

owntec

geo|soluções

FOA Engenharia e Pré-Fabricados

HUESKER Ideen. Ingenieure. Innovationen.

Terra Dril

Patrocínio Turmalina



















Patrocínio Opala























































Patrocínio Safira









Divulgação

Realização

Apoio

Organização

Comissão Organizadora dos Anais

André Luís Brasil Cavalcante

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

Michéle Dal Toé Casagrande

José Wilson dos Santos Ferreira

Talita Caroline Miranda

Mario René Rivera Osorto

Comissão Organizadora do Evento

André Luís Brasil Cavalcante (Presidente)

Maurício Martines Sales

Flávio Ornelas

Cristiano Zandoná dos Santos

Paulo da Venda Oliveira

Marcos Massao Futai

José Wilson dos Santos Ferreira

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

Michéle Dal Toé Casagrande

Comissão Geojovem

José Wilson dos Santos Ferreira (Presidente)

Lídia Bruna Teles Gonzaga

Mateus Teixeira Crippa

Mario René Rivera Osorto

Zharry Ribeiro Bueno

Comissão Científica

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (Presidente)

Michéle Dal Toé Casagrande (Vice-presidente)

Alexandre Duarte Gusmão

Andrelisa Santos de Jesus

André Pacheco de Assis

Bernadete Ragoni Danziger

Breno Padovezi Rocha

Carlos Alberto Lauro Vargas

Ennio Marques Palmeira

Gilson De Farias Neves Gitirana Jr

José Allan Carvalho Maia

José Camapum de Carvalho

José Fernando Thomé Jucá

Kátia Vanessa Bicalho

Marta Pereira da Luz

Luan Ozelim

Luis Edmundo Prado de Campos

Magnos Baroni

João Paulo Silva de Freitas

Marcos Massao Futai

Maria Das Graças Gardoni Almeida

Maria Eugenia Gimenez Boscov

Marina Bellaver Corte

Paulo José Rocha de Albuquerque

Sandro Lemos Machado

Tácio Mauro Pereira de Campos

Terezinha de Jesus Espósito

Comissão Financeira

Cristiano Zandoná dos Santos

Comissão Consultiva

André Pacheco de Assis

Ennio Marques Palmeira

José Camapum de Carvalho

Comitê Assessor de Congresso (CAC)

Gustavo Simões

Paulo Albuquerque

Vitor Pereira Faro

ABMS — Diretoria Nacional

Roberto Quental Coutinho (Presidente)

Bernadete Ragoni Danziger (Vice-Presidente)

Robson Palha Saramago (Secretário Geral)

Marcos Massao Futai (Diretor Financeiro)

Petrucio Santos Junior (Diretor de Comunicação)

Mauricio Ehrlich (Diretor de Relações Institucionais)

Jairo Pascoal Júnior (Diretor de Normas Técnicas)

Felipe Gobbi Silveira (Diretor AD HOC)

Max Gabriel Timo Barbosa (Diretor AD HOC)

Luiz Antonio Bressani (Diretor AD HOC)

Magnos Baroni (Diretor AD HOC)

ABMS — NRCO

Maurício Martines Sales (Presidente)

Marta Pereira da Luz (Vice-Presidente)

Luiz Carlos de Figueiredo (Secretário Geral)

Cristiano Zandoná dos Santos (Diretor Financeiro)

Thiago Lopes dos Santos (Diretor Eventos Técnicos)

José Wilson dos Santos Ferreira (Diretor GeoJovem Ad hoc)

Editora

Editor-Chefe

Dr. Daniel Luís Viana Cruz

Conselho Editorial

Dr. Amâncio António de Sousa Carvalho – ESS-UTAD – Portugal

Dr. Cássio Brancaleone – UFFS – Brasil

Dr. Marcelo Luiz Bezerra da Silva – UEPa – Brasil

Dra. Pauliana Valéria Machado Galvão – UPE – Brasil

Dr. Plínio Pereira Gomes Júnior – UFRPE – Brasil

Dr. Walter Santos Evangelista Júnior – UFRPE – Brasil

Dr. Wendel José Teles Pontes – UFPE – Brasil

Assistente Editorial

Thialla Larangeira Amorim

Imagem de Capa

Canva

Edição de Arte

Vileide Vitória Larangeira Amorim

Nhatallia Laranjeira Amorim

Revisão

Os autores

Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons – Atribuição - Não Comercial - Sem Derivações 4.0 Internacional.

O conteúdo abordado nos artigos, seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Lumos Assessoria Editorial

C749
Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (22. : 2026 : Brasília, DF).
Anais do XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) : geologia de engenharia : geossintéticos na engenharia : geotecnia ambiental [recurso eletrônico] / coordenador André Luís Brasil Cavalcante ... [et al.]. — 1. ed. — Recife : Omnis Scientia, 2026
Dados eletrônicos (pdf).

Inclui bibliografia.
ISBN 978-65-284-0696-8
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6

1. Engenharia civil (Geotecnia). 2. Mecânica do solo. 3. Ciência do solo. 4. Solos – Conservação. I. Cavalcante, André Luís Brasil.

CDD23: 624.15136

I-0911263

Bibliotecária: Priscila Pena Machado – CRB-7/6971

Editora Omnis Scientia

Av. República do Líbano, nº 251, Sala 2205, Torre A,

Bairro Pina, CEP 51.110-160, Recife-PE.

Telefone: +55 87 99920-5762

editoraomnisscientia.com.br

contato@editoraomnisscientia.com.br



Prefácio

O XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2026, realizado em Brasília, representa mais um importante capítulo na trajetória da Geotecnia brasileira. Promovido pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), o Congresso reafirma sua vocação histórica como o principal espaço nacional de encontro entre pesquisadores, profissionais, estudantes, empresas, instituições públicas e demais atores envolvidos no desenvolvimento da Engenharia Geotécnica no País.

Nesta edição, o tema **"Geotecnia e Mudanças Climáticas: Infraestruturas e Cidades Resilientes"** traduz um dos grandes desafios do nosso tempo. Eventos extremos cada vez mais frequentes, alterações nos regimes de precipitação, movimentos de massa, inundações, erosões e outros processos associados às mudanças ambientais evidenciam a necessidade de repensarmos a forma como concebemos, projetamos, construímos, monitoramos e mantemos nossas infraestruturas e cidades.

Nesse contexto, a Engenharia Geotécnica assume uma responsabilidade ainda maior. Mais do que responder às emergências, somos chamados a antecipar riscos, desenvolver soluções inovadoras, incorporar novas tecnologias e contribuir para a construção de uma sociedade mais segura e resiliente. **A Geotecnia precisa estar presente antes da emergência.**

O COBRAMSEG 2026 foi concebido exatamente com esse espírito: promover o encontro entre conhecimento científico, experiência profissional, inovação tecnológica e os grandes desafios da sociedade. A diversidade e a qualidade dos trabalhos reunidos nestes Anais demonstram a vitalidade da comunidade geotécnica brasileira e sua capacidade de produzir conhecimento relevante nas diferentes áreas da Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas e Engenharia Geotécnica.

Os artigos aqui publicados constituem uma importante representação do conhecimento produzido e aplicado em universidades, centros de pesquisa, empresas, órgãos públicos e instituições de todo o País. Abrangem desde temas clássicos da Geotecnia até abordagens emergentes relacionadas à sustentabilidade, mudanças climáticas, transformação digital, inteligência artificial, instrumentação e monitoramento, gestão de riscos, novos materiais e metodologias de projeto e análise.

Além da apresentação dos trabalhos técnicos, a programação científica do COBRAMSEG 2026 foi enriquecida por conferências, palestras especiais, painéis, mesas-redondas, sessões técnicas, atividades destinadas aos jovens geotécnicos e eventos integrados, proporcionando diferentes oportunidades de intercâmbio entre gerações, instituições e áreas de atuação. Esse ambiente de diálogo constitui uma das maiores riquezas do Congresso e reforça a importância da colaboração para o avanço da nossa profissão.

Brasília, cidade concebida a partir de uma visão de futuro, ofereceu um cenário particularmente simbólico para esta edição. Em um momento em que discutimos resiliência, sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas, reunir a comunidade geotécnica na capital brasileira também nos convida a refletir sobre nossa responsabilidade na construção das infraestruturas e das cidades que

desejamos deixar para as próximas gerações.

A Comissão Organizadora manifesta seu profundo agradecimento aos autores que confiaram seus trabalhos ao Congresso, aos revisores pela criteriosa avaliação das contribuições, aos palestrantes, moderadores e coordenadores de sessões, às Comissões Técnicas da ABMS, às instituições parceiras, às empresas patrocinadoras e expositoras, às equipes de apoio e a todos aqueles que dedicaram tempo, conhecimento e trabalho para tornar possível a realização do COBRAMSEG 2026.

Agradecemos especialmente à **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS**, cuja história se confunde com o próprio desenvolvimento da Geotecnia brasileira e cuja atuação continua sendo fundamental para aproximar academia e prática profissional, formar novas gerações e projetar internacionalmente a Engenharia Geotécnica produzida no Brasil.

Aos participantes, nosso reconhecimento por transformarem o Congresso em um verdadeiro espaço de encontro, aprendizado e construção coletiva.

Esperamos que estes Anais ultrapassem os limites temporais do evento e permaneçam como registro do conhecimento, das ideias e das inquietações que mobilizaram a comunidade geotécnica brasileira em 2026. Que os trabalhos aqui reunidos inspirem novas pesquisas, projetos, soluções e parcerias e contribuam para uma Engenharia Geotécnica cada vez mais inovadora, sustentável e comprometida com a sociedade.

Que o COBRAMSEG 2026 seja lembrado não apenas pelo conhecimento que compartilhamos, mas também pelas conexões que construímos e pela visão de futuro que reafirmamos juntos.

André Luís Brasil Cavalcante
Presidente do COBRAMSEG 2026

Sumário

Geologia de Engenharia

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO ENTRE 2010 E 2018: IMPLICAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS E ANTRÓPICAS.....29

AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE POROS EM ROCHAS CARBONÁTICAS SINTÉTICAS DURANTE PROCESSO DE ACIDIFICAÇÃO DE MATRIZ.....37

CARACTERIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE TOPO ROCHOSO DE ROCHAS BRANDAS.....45

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE SATURAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE ROCHAS METAVULCANOCLÁSTICAS.....53

COMPARTIMENTAÇÃO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO VISANDO A CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO GEOLÓGICO.....58

CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DO RISCO SÍSMICO EM PROJETOS DE AEROGERADORES OFFSHORE NA PLATAFORMA CONTINENTAL NE DO BRASIL.....66

CORRELAÇÕES ENTRE AS CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE UM SIENOGRANITO INTEMPERIZADO.....75

ELABORAÇÃO DE MAPA GEOLÓGICO DA CIDADE DE CASCAVEL/PR A PARTIR DE LAUDOS SPT COM USO DE FERRAMENTA SIG.....83

ESTUDO DOS FATORES CONDICIONANTES DE QUEDAS E ROLAMENTOS DE BLOCOS DE ROCHA EM MATRIZ DE MATERIAL INCONSOLIDADO.....91

INFLUÊNCIA DO INTEMPERISMO NAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E GEOMECÂNICAS DE FILITOS RELEVANTES À ESTABILIDADE DE TALUDES.....99

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO APLICADO NA DEFINIÇÃO DE TRATAMENTOS DE UM CANAL DE DESVIO DE GRANDES DIMENSÕES.....107

MAPEAMENTO GEOTÉCNICO LITOESTRUTURAL DO MACIÇO DO PORTÃO DO INFERNO – CHAPADA DOS GUIMARÃES/MT.....115

QUEDAS DE BLOCOS DE ROCHA EM MATRIZ DE MATERIAL INCONSOLIDADO: COMO CADA VARIÁVEL INFLUENCIA NO PROCESSO SEGUNDO UM VIÉS ESTATÍSTICO.....123

Geossintéticos na Engenharia

A INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS DE SOLDA NA INSTALAÇÃO DE GEOMEMBRANAS DE PEAD.....132

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS REFORÇADAS COM GEOGRELHA E NÃO REFORÇADAS.....139

ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO EM MUROS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS.....147

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE GEOTUBOS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....155

APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM TELHADO VERDE: ESTUDO DE CASO NA FAVELA DA MARÉ, RIO DE JANEIRO.....163

APLICAÇÃO DE GEOTÊXTEIS NA DRENAGEM DE PAVIMENTOS: ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE RETENÇÃO, PERMEABILIDADE E SOBREVIVÊNCIA.....171

ASPECTOS DE DIMENSIONAMENTO E EXECUÇÃO DE ATERROS ESTAQUEADOS - CASO DE OBRA EM RIO DAS PEDRAS, JACAREPAGUÁ, RIO DE JANEIRO.....177

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE LONGO PRAZO EM ATERROS REFORÇADOS SOBRE SOLOS MOLES.....185

AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-REFORÇO EM ENSAIOS DE ARRANCAMENTO CÍCLICO DE GEOGRELHAS EM BASE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO.....193

AVALIAÇÃO DA MELHORIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CAMADAS GRANULARES COM GEOCÉLULAS: SEÇÕES EXPERIMENTAIS EM ESCALA REAL EM UMA RODOVIA.....201

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO UTILIZANDO GEOSSINTÉTICO COMO REFORÇO.....209

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOMEMBRANA E MULTICAMADAS SOB ALTAS TENSÕES NORMAIS.....217

CARACTERIZAÇÃO SAZONAL DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE GEOTÊXTEIS TECIDOS EM BARREIRAS NA BAHIA.....225

COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO DE UMA GEOGRELHA EMBUTIDA EM AREIA DE FRESADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RAP).....232

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO A LONGO PRAZO DE LASTRO REFORÇADO COM GEOGRELHA SOB CARREGAMENTO CÍCLICO.....240

COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS POR RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD-R).....248

DANOS DE INSTALAÇÃO EM GEOGRELHAS TECIDAS DE POLIÉSTER: MICRODANOS E IMPLICAÇÕES NOS FATORES DE REDUÇÃO EM RAP.....256

DESENVOLVIMENTO LABORATORIAL DE GEOMEMBRANA DE PEAD PARA INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS.....264

DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE EXPOSTAS À RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM LABORATÓRIO AVALIADA POR ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO.....272

DURABILIDADE GEOTÊXTEIS TECIDOS APLICADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA.....278

EFEITOS DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR BRITADORES DE MINERAÇÃO EM ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS.....285

ENSAIOS DE TRAÇÃO EM GEOGRELHAS PRODUZIDAS EM IMPRESSORA 3D COM GARRAFAS PET RECICLADAS VISANDO APLICAÇÃO EM OBRAS DE PEQUENO PORTE.....293

ESTABILIDADE INTERNA DE MUROS DE SOLO FINO REFORÇADO COM GEOGRELHAS: ANÁLISE NUMÉRICA (PLAXIS) E COMPARAÇÃO COM MÉTODOS ANALÍTICOS.....301

ESTADO DA ARTE DE GEOSSINTÉTICOS BIODEGRADÁVEIS DE JUTA EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS.....309

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE ESPECTROFOTOMETRIA POR INFRAVERMELHO PARA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM GEOTÊXTEIS TECIDOS.....317

ESTUDO DA ADERÊNCIA NA INTERFACE DE MISTURA ASFÁLTICA REFORÇADA COM GEOSSINTÉTICOS.....325

ESTUDO LABORATORIAL DA CAPACIDADE DE SUPORTE SUPERFICIAL DE SOLO ARGILOSO REFORÇADO COM GEOGRELHAS.....333

EXPLORING THE FEASIBILITY OF COHESIVE SOILS IN REINFORCED WALLS: A REVIEW OF PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS.....341

GEOCÉLULAS EM INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA: AVANÇOS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES.....349

GEOSSINTÉTICOS E MÉTRICAS DE SUSTENTABILIDADE: EMISSÕES DE CO_2E E DIRETRIZES PARA O CONTEXTO BRASILEIRO.....357

GEOSSINTÉTICOS PARA INFRAESTRUTURA VERDE: AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO E DESEMPENHO DRENANTE DE GEOTÊXTIL EM TELHADOS ECOLÓGICOS.....365

IMPACTO DO PERÍODO DE ESTIAGEM E DO TEOR DE UMIDADE DO SUBSTRATO NA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS COM GEOSSINTÉTICO.....373

INFLUÊNCIA DA CAMADA DE AREIA ADJACENTE À GEOGRELHA NO DESEMPENHO DE MURO DE SOLO COESIVO REFORÇADO.....381

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DA CUNHA TÉRMICA NO DESEMPENHO MECÂNICO E TÉRMICO DE SOLDAS DE GEOMEMBRANAS DE PEAD.....389

MODELAGEM NUMÉRICA PARA COMPREENDER OS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM ATERROS SOBRE ESTACAS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICO.....397

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE PAVIMENTOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS SOBRE CAVIDADES.....405

MODELOS TRANSPARENTES PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS SOBRE GECS COM USO DE PTCS ENRIJECIDAS COM GEOSSINTÉTICOS.....413

REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CARBONO NA EXECUÇÃO DE ACESSO VIÁRIO DE MINA COM USO DE GEOGRELHA RIGÍDA.....421

USO DE GEOSSINTÉTICOS PARA REFORÇO DE GALERIA SOB PILHA DE ESTÉRIL: ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL.....429

Geotecnia Ambiental

AGREGADOS RECICLADOS E PNEUS INSERVÍVEIS EM MUROS DE CONTENÇÃO PROVISÓRIOS: MONITORAMENTO DE UM MODELO FÍSICO.....436

ÁLCALI-ATIVAÇÃO DE REJEITO DE FLUORITA E CINZA VOLANTE PELO MÉTODO "*ONE-PART*" PARA IMOBILIZAÇÃO DE METAIS NA PAVIMENTAÇÃO.....444

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO UTILIZANDO O MODELO RUSLE INTEGRADO A DADOS ESPACIAIS EM SOLOS DO INTERIOR DE SÃO PAULO.....452

ANÁLISE DE DESEMPENHO E ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE MISTURAS CIMENTÍCIAS DE SOLO, RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E PÓ DE PEDRA.....460

ANÁLISE DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE ETA A PARTIR DE ESTUDOS DE SUAS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS, MINERALÓGICAS E FÍSICO-QUÍMICAS.....468

ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA) APLICADO AO ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM SOLO-CIMENTO ESTABILIZADO COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....476

ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS SINTÉTICOS E RSU: PERSPECTIVAS E POSSIBILIDADES DE SIMULAÇÃO.....484

ANÁLISE GEOESPACIAL DA DINÂMICA HÍDRICA DO RIO UNA E INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NA MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS EM SÃO JOSÉ DA COROA GRANDE/PE.....491

ANÁLISE LABORATORIAL DE MISTURA SOLO-FOSFOGESSO PARA CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO.....499

ANÁLISE MECÂNICA E QUÍMICA DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE RPC E CAL PARA MELHORAMENTO DE SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....508

APLICAÇÃO DE BIOCARVÕES DE AÇAÍ E DE MADEIRA PARA MELHORAMENTO DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS.....516

APLICAÇÕES DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR (CBCA) NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA: REVISÃO SISTEMÁTICA.....524

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MADEIRA COMO ESTABILIZANTES EM SOLO: ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL.....532

AVALIAÇÃO DA ESTABILIZAÇÃO DE ARGILA MONTMORILONÍTICA POR ADIÇÃO DE LODO DE ETA.....541

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TRITURAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE RCC <4,75 MM EM SEU ESTADO NATURAL.....549

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE SOLOS ARENOSOS EM COLUNAS DE PERCOLAÇÃO SOB DIFERENTES GRADIENTES HIDRÁULICOS.....557

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM ADIÇÃO DE CINZAS DA CASCA DO CAFÉ.....564

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MELHORAMENTOS NO DESENVOLVIMENTO DE *ZEA MAYS* E NAS PROPRIEDADES DE UM SOLO CONTAMINADO.....573

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FIBRA DE COCO COMO REFORÇO DE SOLO: ANÁLISE AMBIENTAL E GEOTÉCNICA.....581

CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE UM SOLO CONSIDERANDO INFORMAÇÕES DO ESTADO DA ARTE.....589

CAMADAS DE COBERTURA EM ATERROS SANITÁRIOS E EMISSÕES DE BIOGÁS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....597

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS E DA PERMEABILIDADE DA MISTURA DE SOLO/FOSFOGESSO COMO CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO.....605

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE UM SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM RESÍDUO GRITS.....613

COLAPSO DE SOLOS EM AMBIENTES CÁRSTICOS: AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA E AMBIENTAL DE LAPÃO (BA).....621

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DIFERENTES SOLUÇÕES ELETROLÍTICAS NA REMEDIAÇÃO ELETROCINÉTICA DE SOLO CONTAMINADO POR COBRE.....628

COMPARAÇÃO DO FATOR DE RETARDO OBTIDO POR ENSAIOS DE SORÇÃO DO TIPO *BATCH* E ENSAIO DE COLUNA.....636

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS POR MEIO DE ABORDAGEM SEMI-QUANTITATIVA DE ENSAIOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....644

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO Y LABORATORIO: ENSAYOS EM LIBERTAD CLAY-URUGUAY.....652

DESEMPENHO NÃO DRENADO DE ARGILA PURA E REFORÇADA COM FIBRAS DE AÇAÍ EM ENSAIOS INUNDADOS DE DIRECT SIMPLE SHEAR (DSS).....657

DIAGNÓSTICO GEOQUÍMICO E VULNERABILIDADE HIDROGEOTÉCNICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM BOA VIAGEM, RECIFE-PE.....665

EFEITO DO ENVELHECIMENTO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SOLO E MISTURA SOLO-BIOCARVÃO (2,5%) VISANDO APLICAÇÃO GEOTÉCNICA.....673

EFEITO DO LICOR NEGRO KRAFT E CIMENTO CP II-F-32 NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO.....678

EFEITOS DA CURA NO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE UM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE SAL (CARAGO).....686

EFICIÊNCIA DE UMA BARREIRA DE PROTEÇÃO DE SOLO COMPACTADO SOB LAGOA DE LIXIVIADO.....694

ESTABILIDADE DE ATERRO SANITÁRIO COM RSU EM DIFERENTES IDADES POR MÉTODO DETERMINÍSTICO E PROBABILÍSTICO.....702

ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO TROPICAL COM ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA PRIMÁRIA.....710

ESTUDO COMPARATIVO DA GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM MUNICÍPIOS DO SERTÃO NORDESTINO: UM DIAGNÓSTICO GEOTÉCNICO AMBIENTAL.....718

ESTUDO COMPARATIVO DA MOBILIDADE DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM SOLOS LATERÍTICO E NÃO LATERÍTICO.....726

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ADUBO ORGÂNICO EM UM SOLO UTILIZADO COMO CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO.....734

ESTUDO DE CASO SOBRE SONDAGENS SPT PARA AMOSTRAGEM DE RSU DE ATERROS SANITÁRIOS.....742

ESTUDO DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DO SOLO DE UMA ENCOSTA DO ALTO DA PENHA, EM CRATO – CE.....750

ESTUDO GEOAMBIENTAL E AVALIAÇÃO DA PROPOSTA DE REABILITAÇÃO: O CASO DO ATERRO CONTROLADO EM SANTA LUZIA/MG.....758

ESTUDO MECÂNICO DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA E CINZA DE CALDEIRA EM SOLO PARA USO EM BARREIRAS MINERAIS.....766

GESTÃO DE RESÍDUOS NA GEOTECNIA: ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS REFORÇADOS COM AGREGADO LENHOSO RESIDUAL.....773

IMPROVING CITIES' RESILIENCE THROUGH NATURE-BASED SOLUTIONS (NBS).....781

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) NA RESISTÊNCIA DE SOLOS.....788

INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DEAÇÚCAR E PÓ DE VIDRO NOS PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM DIESEL.....795

INFLUÊNCIA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA NA EROSÃO DO SOLO DAS MARGENS DO RIO BELÉM (CURITIBA/PR): SOLUÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL PARA MITIGAÇÃO.....803

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO PH DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R).....811

INFLUÊNCIA DO LICOR NEGRO KRAFT E DO CIMENTO CP II-F-32 NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO.....818

INTEGRAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE VULNERABILIDADE GEOTÉCNICA EM ENCOSTAS URBANAS.....826

INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS EM COLUNA EM SOLOS RESIDUAIS COM SORÇÃO NO EQUILÍBRIO E LIMITADA CINETICAMENTE.....834

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM HEC-RAS NO RIO SÃO FRANCISCO: TRECHO PIRAPORA–BURITIZEIRO (MG) E APLICAÇÕES AO PLANEJAMENTO URBANO.....842

MELHORAMENTO COM CAL DE SOLOS DISPERSIVOS DA PLANICIE COSTEIRA SUL DO RIO GRANDE DO SUL.....851

MELHORAMENTO DE SOLO ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CÍVIL NO BRASIL: REVISÃO SISTEMÁTICA.....859

MODELAGEM TRANSIENTE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO ARGILO SILTO ARENOSO: ESTUDO DE CASO EM PONTA GROSSA-PR.....868

NATURE-BASED SOLUTIONS EM GEOTECNIA: FIBRAS NATURAIS E IMPACTO HIDRÁULICO EM SOLOS ARENOSOS SOB ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA.....876

NDVI E EUPS APLICADOS AO MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO EM PIRAPORA E BURITIZEIRO (MG).....884

POTENCIAL DE USO DO FRUTO DA *SAPINDUS SAPONARIA* COMO ESTABILIZANTE NATURAL PARA FINS GEOTÉCNICOS.....892

REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM ARGAMASSAS: UMA SOLUÇÃO ECOEFICIENTE PARA A GESTÃO DE RESÍDUOS.....900

REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DA LAPIDAÇÃO DO GRANILITE NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS DE SOLO-CIMENTO.....908

REFLEXÕES SOBRE A INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS DE MONITORAMENTO DE MOVIMENTAÇÕES EM ATERROS SANITÁRIOS E SUA APLICAÇÃO COMO INDICADOR DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL.....916

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA PRFV: ANÁLISE E EFEITO DE ESCALA.....925

RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS SINTÉTICOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.....934

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O USO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ATERROS SANITÁRIOS.....942

REVISÃO SISTEMÁTICA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE FERRO PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO.....950

SM SOILS AND BIOCHAR IN LANDFILL COVER LAYERS: SUSTAINABLE POTENTIAL FOR CONTAINMENT WORKS.....957

USO DE BIOPOLÍMEROS EM CAMADAS DE SOLOS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE BASE DE ATERROS SANITÁRIOS.....965

USO DE RESÍDUO DE MÁRMORE PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.....973

UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ (CCA) COMO AGENTE ESTABILIZANTE PARA SOLOS ARENOSOS FINOS EM PALMAS-TO.....981

UTILIZAÇÃO DE COMPOSTO ORGÂNICO COMO MATERIAL ESTRUTURANTE EM BIOPILHAS PARA TRATAMENTO DE SOLO ARENO ARGILOSO CONTAMINADO POR ÓLEO DIESEL.....989

VALORAÇÃO DE RESÍDUOS NA GEOTECNIA PARA ELABORAÇÃO DE NOVOS AGLOMERANTES ÁLCALI-ATIVADOS.....997

WATERFILL – APLICATIVO ABERTO PARA CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO EM ATERRO SANITÁRIO.....1005

COBRAMSEG 2026

ANAIS DO

XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Eixo Temático:

Geologia de Engenharia

ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Centro-Oeste
Núcleo Regional

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/1

Análise Estatística dos Escorregamentos no Município do Rio de Janeiro Entre 2010 e 2018: Implicações Geológico-Geotécnicas e Antrópicas

Raquel Batista Medeiros da Fonseca
Geóloga, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, raquelbmfonseca@gmail.com

Jenifer Roméro
Geóloga, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, jenifersromero@gmail.com

Aline Pimentel da Silva
Geóloga, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, aline.psilva@prefeitura.rio

Danielle Gondariz
Geóloga, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, dgondariz@gmail.com

RESUMO
Os movimentos de massa constituem um dos principais processos geológico-geotécnicos responsáveis por desastres naturais em áreas urbanas densamente ocupadas, especialmente em regiões tropicais montanhosas. Este trabalho apresenta uma análise estatística integrada das ocorrências de origem geológica registradas no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2018, com foco em processos de instabilização de encostas. A metodologia consistiu na sistematização de 3.316 laudos técnicos da Fundação Geo-Rio, classificando variáveis como tipo de ocupação, geometria da encosta, litologia e volume mobilizado.Os resultados indicam uma forte influência antrópica, com 47,8% das ocorrências caracterizadas como escorregamentos de solo em taludes de corte e 19,2% como rupturas de estruturas de contenção. Verificou-se que a maioria dos eventos (49,9%) mobiliza volumes reduzidos (até 10 m³), mas apresenta alto risco devido à proximidade com áreas densamente povoadas, como favelas e áreas urbanas estruturadas. As conclusões reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à manutenção contínua e ao planejamento urbano integrado para mitigação de riscos.

PALAVRAS-CHAVE: escorregamentos, ocorrências geológico-geotécnicas, risco geotécnico, análise estatística, laudos de vistoria

ABSTRACT
Landslides represent one of the main geological and geotechnical processes responsible for natural disasters in densely populated urban areas, especially in tropical mountainous regions. The methodology involved systematizing 3,316 technical reports from the Geo-Rio Foundation, classifying variables such as occupation type, slope geometry, lithology, and mobilized volume. The results indicate a strong anthropogenic influence, with 47.8% of occurrences characterized as soil slides in cut slopes and 19.2% as failures of containment structures. It was found that most events (49.9%) involve small volumes (up to 10 m³) but pose high risk due to their proximity to densely populated areas, such as favelas and structured urban areas. The conclusions reinforce the need for public policies aimed at continuous maintenance and integrated urban planning for risk mitigation.

KEYWORDS: landslides, geological-geotechnical occurrences, geotechnical risk, statistical analysis; inspection reports

1 INTRODUÇÃO

Desastres associados a movimentos de massa representam uma das principais ameaças naturais em ambientes urbanos, gerando expressivos prejuízos sociais, econômicos e ambientais. Em regiões tropicais e montanhosas, como o município do Rio de Janeiro, a suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos é intensificada pelas características fisiográficas do terreno, aliadas à elevada pluviosidade e à ocupação antrópica desordenada das encostas. No contexto carioca, os riscos geológicos estão fortemente associados à presença de maciços rochosos, encostas íngremes e solos residuais com espessura variável, geralmente rasos nas porções de topo e meia-encosta, e progressivamente mais espessos nas áreas de sopé e fundos de vale, em função dos processos de intemperismo, transporte e acúmulo de materiais coluvionares e retrabalhados (Coelho Netto, 1995). Além disso, a ocupação irregular e a execução de cortes e aterros sem critérios técnicos adequados alteraram significativamente o equilíbrio natural das encostas, fazendo com que fatores antrópicos se sobreponham, em muitos casos, às causas naturais dos acidentes geotécnicos (Dorsi et al.,2013; Azevedo, 2011;Parizzi, 2011; Fundação GEO-RIO, 2005; Terzaghi & Peck, 1967).

Nesse contexto,os laudos de vistoria técnica elaborados pela Fundação GEO-RIO representam uma das mais consistentes bases de informação sobre ocorrências geológico-geotécnicas em ambiente urbano. Considerando a relevância da análise sistemática de dados como subsídio técnico-científico à formulação de políticas públicas, este artigo tem como objetivo caracterizar estatisticamente as ocorrências geológico-geotécnicas registradas no município do Rio de Janeiro entre os anos de 2010 e 2018, analisando a relação entre tipologia de movimento, condicionantes geológicos e geotécnicos, padrões de ocupação urbana e grau de risco, a partir dos laudos técnicos elaborados pela Fundação Geo-Rio, contribuindo assim para o entendimento integrado dos processos que desencadeiam movimentos de massa em áreas urbanas.

2 METODOLOGIA

A base de dados utilizada é composta pelos laudos técnicos de vistoria elaborados pela Fundação Geo-Rio no período de 2010 a 2018, triados de modo a manter apenas aqueles classificados como ocorrência geológico-geotécnica, resultando em 3.316 laudos. Para cada registro foram sistematizadas informações relativas à localização, tipo de ocupação, tipo de encosta, litologia, tipologia principal de movimento, volume mobilizado e grau de risco. As classificações adotadas seguem os critérios técnicos estabelecidos no Manual Técnico de Encostas da Fundação Geo-Rio (2022). A análise estatística baseou-se em estatística descritiva, com cálculo de frequências relativas e elaboração de gráficos de distribuição simples e multivariados. A tipologia principal de movimento foi adotada como variável de referência nas análises integradas, permitindo avaliar sua relação com os diferentes condicionantes físicos e antrópicos (Fell et al.,2008; Guzzetti et al.,2012).

3 CARACTERIZAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS

3.1 Padrões de instabilidade associados ao planejamento territorial e uso e ocupação do solo

As ocorrências registradas entre 2010 e 2018 apresentam distribuição espacial concentrada principalmente nos Maciços da Tijuca (centro geográfco da cidade, abrange Zona Norte, Sul e Oeste), da Pedra Branca (Zona Oeste) e na Serra da Misericórdia (Zona Norte), refletindo a associação entre relevo acidentado e ocupação urbana, conforme figura 1. Temporalmente, o ano de 2010 concentrou 39% do total de registros do período, seguido de outro ponto alto em 2013, o que pode estar associado a eventos pluviométricos intensos. Em anos subsequentes (2014–2018) observa-se queda e estabilização em níveis mais baixos.

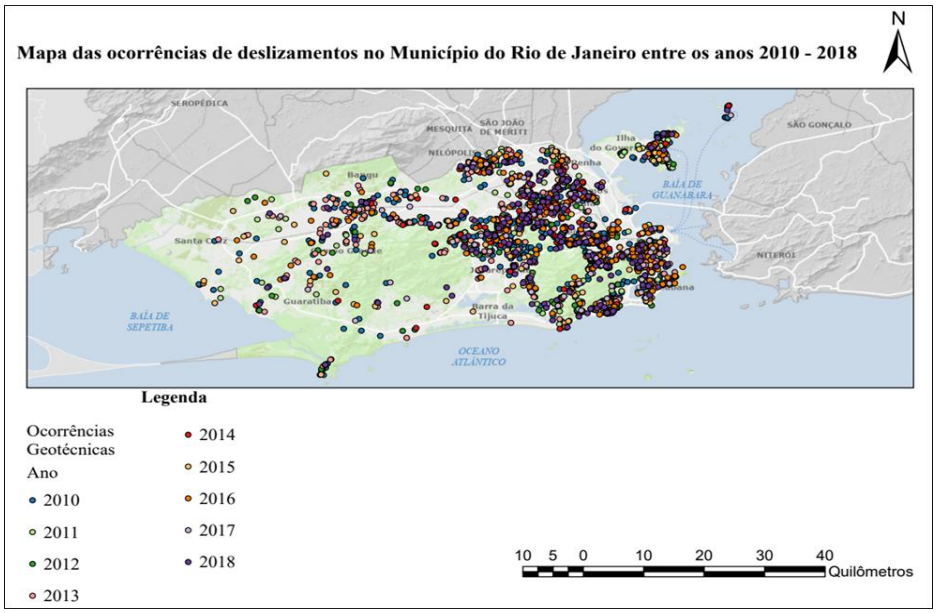


Figura 1 - Distribuição das ocorrências no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2018.

A análise por Áreas de Planejamento confirma esse padrão, com predominância na AP-3, seguida pelas AP-2 e AP-4, refletindo tanto a maior extensão territorial e densidade populacional quanto a ampla ocupação de encostas nessas regiões (Figura 2). Quanto ao uso e ocupação do solo, observa-se que favelas e áreas urbanas formalizadas concentram a maior parte dos registros, com comportamento tipológico semelhante, dominado por escorregamentos de solo em taludes de corte e rupturas de estruturas de contenção, contabilizando respectivamente 31,5% e 24% do total, indicando que a instabilidade não se restringe à ocupação informal (Figura 3a). Esse padrão é reforçado pela análise do tipo de encosta, que revela a predominância expressiva de ocorrências em taludes artificiais, especialmente de corte e aterro, confirmando que a modificação antrópica da geometria original do terreno constitui o principal condicionante dos processos de instabilização em encostas urbanas (Figura 3b).

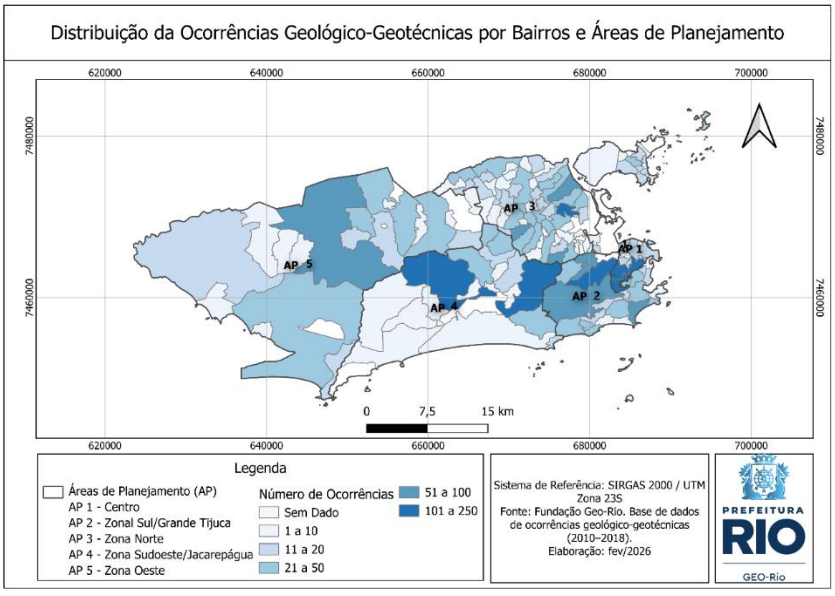


Figura 2- Distribuição das ocorrências por bairros e áreas de planejamento

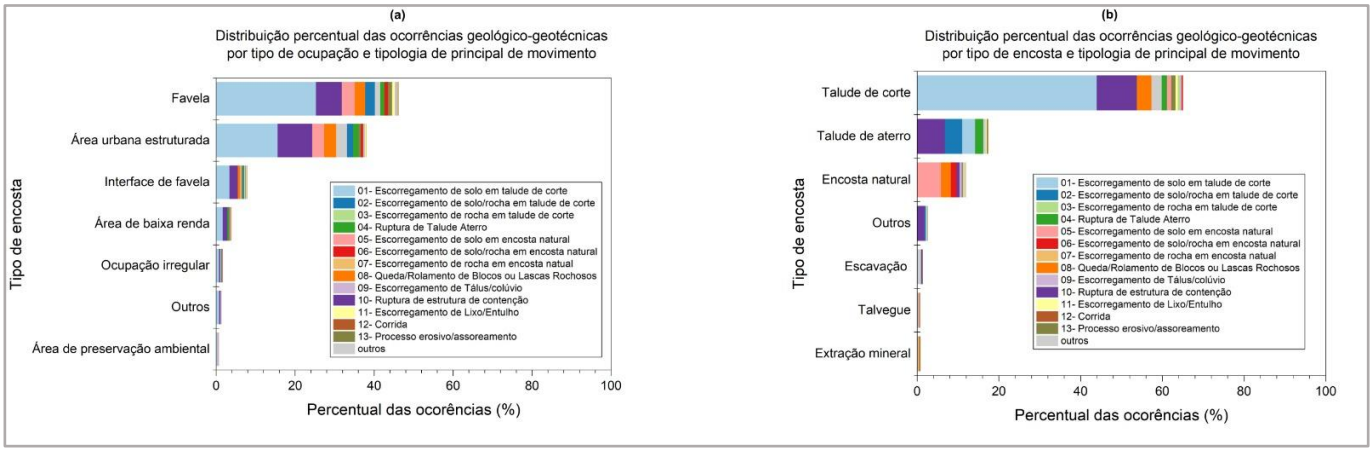


Figura 3 Distribuição das ocorrências por tipo de ocupação (a) e por tipo de encosta (b).

3.2 Tipologias de Movimento de Massa e sua relação com a litologia

A análise da distribuição das tipologias principais de movimento de massa evidencia o predomínio de escorregamentos de solo em talude de corte (47,8%) no conjunto das ocorrências, seguida por ruptura de estrutura de contenção (19,2%) e, em menor proporção, por escorregamentos em encosta natural (7,2%) e quedas de blocos (6,4%). Quando analisada em conjunto com a litologia, figura 4, observa-se que os escorregamentos de solo em talude de corte concentram-se majoritariamente em áreas desenvolvidas sobre rochas gnáissicas e graníticas, refletindo a geologia do município, nas quais predominam solos residuais de espessura variável e heterogênea, favorecendo a ocorrência de rupturas rasas e recorrentes. Destacam-se as unidades Biotita Gnaisse, Gnaisse migmatítico, Gnaisse facoidal e Granito Cinza Porfirítico, 10,22%, 9,4%, 6,9% e 5,1% do total geral, respectivamente. Observa-se participação significativa de rupturas de estruturas de contenção, indicando que a instabilização não decorre apenas de falhas de projeto ou execução, mas também da operação dessas obras sob condições distintas das originalmente previstas, em função de alterações no uso do solo, deficiência de manutenção, modificações na drenagem e introdução de sobrecargas.

Do ponto de vista geotécnico, a predominância de escorregamentos de solo em taludes de corte nas unidades gnáissicas e graníticas está associada à presença de espessos solos residuais heterogêneos e ao controle estrutural herdado da rocha sã. A execução de cortes artificiais expõe perfis originalmente não saturados, que sob a infiltração de água durante eventos de precipitação intensa, sofrem elevação do grau de saturação e redução da resistência ao cisalhamento. A presença de descontinuidades estruturais, aliada a geometrias de corte íngremes, favorece a formação de superfícies preferenciais de ruptura, resultando na recorrência de escorregamentos rasos e localizados. Além disso, a ocorrência significativa de rupturas de estruturas de contenção indica que a instabilidade decorre não apenas do comportamento do maciço natural, mas também da evolução das condições de contorno, incluindo alterações no uso do solo, deficiência de manutenção, modificações na drenagem e introdução de sobrecargas.

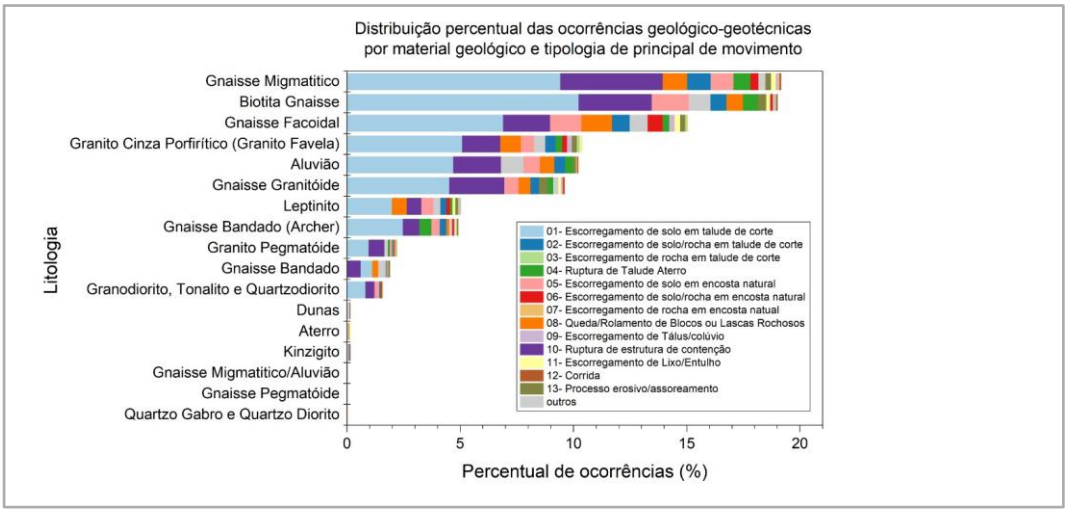


Figura 4 Relação entre litologia e tipologia principal de movimento de massa.

3.3 Magnitude e Risco dos Movimentos de Massa

A correlação entre a tipologia principal de movimento e a categoria de volume mobilizado evidencia o predomínio de eventos de pequeno porte, especialmente aqueles com volumes inferiores a 10 m³, figura 5a, associados majoritariamente aos escorregamentos de solo em taludes de corte, 29,9%. Embora esses eventos sejam individualmente de pequena magnitude, sua elevada frequência confere relevância significativa no contexto da gestão do risco, especialmente quando associados à presença de edificações, vias de circulação e redes de infraestrutura. A recorrência de processos de pequeno volume reflete um estado crônico de instabilidade em diversos setores do município, mais do que a ocorrência esporádica de eventos extremos. Ressalta-se que eventos da categoria D, embora raros, correspondem a situações de elevada severidade, associadas à saturação do maciço sob precipitações intensas, com mobilização de grandes volumes e alto potencial de impacto.

Quando analisada a relação entre tipologia principal e grau de risco, reforça as interpretações anteriores, ao demonstrar que as áreas classificadas como alto risco e médio risco concentram a maior parcela das ocorrências, figura 5b, com predomínio novamente dos escorregamentos de solo em talude de corte concentram a maior parcela das ocorrências classificadas como alto e médio risco,com 43,57 % do total. Esse resultado indica que o grau de risco não está diretamente relacionado apenas à magnitude do evento, mas sobretudo à elevada exposição de elementos vulneráveis nas áreas afetadas, como edificações, vias e infraestrutura urbana. Assim, a combinação entre alta frequência, recorrência espacial e intensa ocupação das encostas faz com que eventos de pequeno volume assumam relevância significativa do ponto de vista da gestão

do risco geotécnico, reforçando a necessidade de estratégias preventivas voltadas à manutenção, monitoramento e controle das intervenções em taludes urbanos.

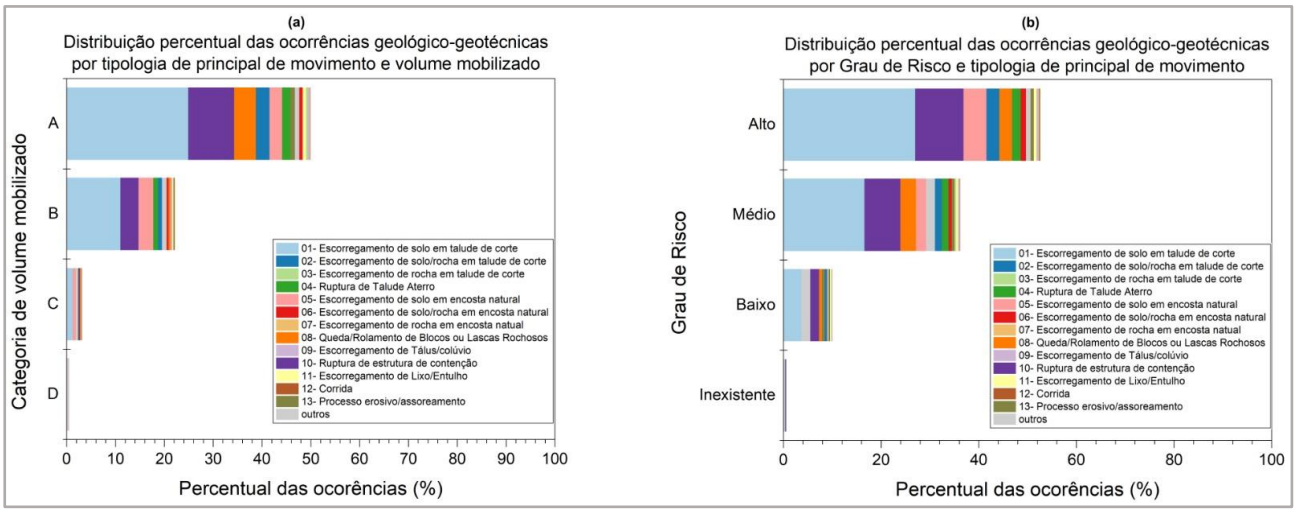


Figura 5 Distribuição de ocorrências de acordo com o volume mobilizado (a) e grau de risco (b).

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são compatíveis com os modelos conceituais clássicos de instabilização de encostas em ambientes tropicais urbanizados, nos quais a interação entre condicionantes geológicos, regime pluviométrico e intervenções antrópicas desempenha papel central na deflagração dos movimentos de massa (Terzaghi et al., 1996; Wolle & Carvalho, 1989; Azevedo, 2011; Dorsi et al., 2013).

O predomínio de escorregamentos de solo em taludes de corte (47,8%) confirma que a modificação artificial da geometria natural das encostas constitui um dos principais fatores de instabilização. A remoção do suporte lateral para a implantação de moradias altera drasticamente o equilíbrio de tensões do maciço, reduzindo significativamente o seu fator de segurança. Somado a isso, outro achado de elevada relevância geotécnica é a expressiva taxa de rupturas de estruturas de contenção (19,2%). O colapso dessas obras indica, fundamentalmente, duas situações recorrentes: execução empírica sem critérios técnicos adequados e ausência crônica de manutenção associada a sistemas de drenagem ineficientes. A obstrução de drenos e a falha na condução de águas superficiais promovem elevação de pressões neutras no maciço, conduzindo à ruptura estrutural (Guidicini & Nieble, 1984).

A execução de cortes inadequados e a ineficiência das contenções expõem diretamente o maciço à ação contínua dos agentes intempéricos e à dinâmica de infiltração. Nesses cortes, frequentemente expõem-se perfis de solos residuais gnáissico-graníticos originalmente não saturados. Conforme estabelecido classicamente por Barata (1969) e Costa Nunes (1969) para a realidade carioca, e por Lumb (1975) em solos residuais tropicais, a estabilidade temporária de cortes quase verticais nesses materiais é garantida, fundamentalmente, pela sucção matricial. Contudo, sob condições de precipitação intensa, a dinâmica de infiltração atua diretamente na redução dessa sucção à medida que o grau de saturação do solo aumenta. A combinação crítica entre precipitação acumulada antecedente e eventos intensos subsequentes é o principal motor das rupturas, conforme demonstram os estudos clássicos no Sudeste brasileiro (Guidicini e Iwasa, 1976; Tatizana et al., 1987; Pedrosa, 1994; D'Orsi et al., 2013).

O impacto prático desses limiares pluviométricos fica evidente ao se constatar que 39% das ocorrências se concentraram no ano de 2010. Naquele ano, a anomalia pluviométrica de abril causou a saturação generalizada do manto de intemperismo, o que induziu poropressões positivas na interface solo-rocha e deflagrou o movimento ao longo de superfícies de fraqueza pré-existentes.

A interação hidráulica e estrutural, em áreas densamente ocupadas, explica o paradoxo "baixo volume versus alto risco", no qual 49,9% dos eventos mobilizam menos de 10 m³ e, ainda assim, mantêm alto potencial destrutivo. Devido ao adensamento urbano desordenado, mesmo pequenos volumes de solo atingem diretamente a infraestrutura local, maximizando o risco. Corroborando essa dinâmica, Fernandes e Amaral

(1996) e Coelho Netto et al. (2011) destacam que, em relevos com intensa ocupação antrópica, movimentos de massa de pequena magnitude já são suficientes para gerar impactos significativos.

Assim, a instabilidade das encostas urbanas não pode ser atribuída exclusivamente ao comportamento do maciço natural, mas resulta da interação dinâmica entre encosta, obra e ocupação, reforçando o caráter progressivo da degradação geotécnica ao longo do tempo.

6 CONCLUSÃO

A análise estatística dos 3.316 laudos técnicos da Fundação Geo-Rio (2010–2018) demonstra que a instabilidade das encostas no município do Rio de Janeiro está intrinsecamente vinculada ao modelo de expansão urbana e adensamento territorial, abrangendo tanto favelas quanto áreas urbanas estruturadas. Os resultados indicam que a suscetibilidade natural do relevo foi amplificada pelas intervenções antrópicas, refletindo-se no predomínio de escorregamentos em taludes artificiais de corte (47,8%) e na significativa participação de rupturas de estruturas de contenção (19,2%).

Constatou-se um cenário de vulnerabilidade caracterizado por elevada frequência de eventos de pequena magnitude, mas com alto potencial de impacto devido à proximidade com edificações e infraestrutura. Nesse contexto, o risco geotécnico decorre menos da magnitude isolada dos eventos e mais da combinação entre recorrência espacial, exposição e vulnerabilidade urbana.

O banco de dados da Fundação Geo-Rio consolida-se, portanto, como instrumento estratégico de diagnóstico do espaço urbano carioca. Contudo, sua utilidade não deve restringir-se à resposta emergencial em anos de extremos pluviométricos. Ao contrário, deve subsidiar políticas públicas permanentes de planejamento urbano integrado, priorizando: o controle da expansão habitacional em encostas; a manutenção contínua de obras de estabilização e drenagem; a fiscalização de intervenções; e a promoção de programas de educação comunitária voltados à percepção e mitigação de risco.

A gestão do risco em encostas urbanas deve ser compreendida como processo contínuo e preventivo, fundamentado na integração entre geotecnia e planejamento territorial, de modo a reduzir a recorrência e os impactos dos movimentos de massa no município do Rio de Janeiro.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (Fundação Geo-Rio) por todo o suporte institucional e pela disponibilização do banco de dados que viabilizou esta pesquisa. Um agradecimento especial à todos os técnicos da instituição que, com dedicação e rigor, atuaram arduamente nas vistorias de campo e na elaboração dos mais de três mil laudos técnicos aqui analisados, cujo trabalho é a base para a gestão do risco geológico-geotécnico e para a preservação de vidas no município do Rio de Janeiro

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augusto Filho, O. (1995) Escorregamento em encostas naturais e ocupadas: Análise e controle. In: Bitar, O. Y. (Ed.) *Curso de Geologia Ambiental*. São Paulo: ABGE/IPT, p. 77-100.

Azevedo, G. F. (2011) Análise da Relação Chuva-Escorregamentos em Regiões Tropicais Montanhosas Urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

Barata, F. E. (1969) Landslides in the tropical region of Rio de Janeiro. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México, v. 2, p. 507-516.

Carvalho, C. S., Macedo, E. S., Ogura, A. T. (Orgs.) (2007) Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Coelho Netto, A. L., et al. (2011) January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum, Roma, Itália.

Costa Nunes, A. J. (1969) Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México, v. 2, p. 547-554.

D'Orsi, R. N. (2011) Correlação entre Pluviometria e Escorregamentos no Trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 287 p.

D'Orsi, R. N., Magalhães, M. A., Coelho, R. S., Paes, N. M., Costa, L. C. (2013) Análise dos Escorregamentos em Encostas do Município do Rio de Janeiro Deflagrados por Chuvas Intensas no Ano de 2010. In: VI Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, Angra dos Reis. Anais... p. 453-460.

Fell, R., et al. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, 102 (3-4), p. 85-98.

Fernandes, N. F., Amaral, C. P. (1996) Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T., Cunha, S. B. (Orgs.) Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123-194.

Fundação Geo-Rio (2022) Manual Técnico de Encostas. Rio de Janeiro.

Guidicini, G., Iwasa, O. Y. (1976) Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 48 p. (Publicação 1080).

Guidicini, G., Nieble, C. M. (1984) Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher / Ed. da Universidade de São Paulo.

Guzzetti, F., et al. (2012) Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth-Science Reviews, 112, p. 42-66.

Jones, F. O. (1973) Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras Escarpment, Brazil. Washington: United States Geological Survey Professional Paper 697, 42 p.

Lumb, P. (1975) Slope failures in Hong Kong. Quarterly Journal of Engineering Geology, London, 8, p. 31-65.

Parizzi, M. G., et al. (2010) Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. Geografias, Belo Horizonte, 6 (2), p. 49-68.

Pedrosa, M. G. A. (1994) Análise de correlações entre pluviometria e escorregamentos de taludes. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 343 p.

Tatizana, C., Ogura, A. T., Cerri, L. E. S., Rocha, M. C. M. (1987) Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo: ABGE. Anais... v. 2, p. 225-236.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/2

Avaliação da Porosidade e Distribuição de Tamanho de Poros em Rochas Carbonáticas Sintéticas Durante Processo de Acidificação de Matriz

Yago Ryan Pinheiro dos Santos
Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, yago.pinheiro@ufpe.br

Analice Lima
Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, analice.amorim@ufpe.br

Igor Fernandes Gomes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, igor.fernandes@ct.ufpb.br

RESUMO: Este trabalho avaliou as variações de porosidade em rochas carbonáticas sintéticas durante o processo de acidificação de matriz utilizando imagens de microtomografia computadorizada de Raios-X. As amostras foram produzidas a partir de pó de rocha calcária e resina epóxi e submetidas a uma injeção de fluido composto por ácido acético e água destilada, para tempos de reação de 36, 72 e 108h. Imagens de microtomografia foram geradas e analisadas utilizando o software VG Studio®, determinando-se a porosidade total, isolada e interconectada, além da distribuição de frequência de tamanho de poros, comparando com amostras não acidificadas e com resultados de porosidade total obtidos por porosimetria a gás hélio. Verificou-se um aumento progressivo da porosidade total com a evolução do tempo (de 8,89% para a amostra não acidificada para 15,18%, 28,01% e 36,16% após 36, 72 e 108h de acidificação, respectivamente), com o aumento da porosidade interconectada e decréscimo da porosidade isolada, devido à propagação dos *wormholes* gerados pelo processo nas rochas. Destacou-se ainda a transição entre o aumento de macroporos e redução de microporos, evidenciado pelo deslocamento do histograma de distribuição para a direita, em que se observou o crescimento da frequência dos poros maiores e redução dos poros menores pós-dissolução.

PALAVRAS-CHAVE: *Wormholes*, Ácido Acético, Microtomografia Computadorizada de Raios-X, Rochas carbonáticas sintéticas.

ABSTRACT: This study evaluated porosity variations in synthetic carbonate rocks during the matrix acidizing process using X-ray computed microtomography images. The samples were produced from limestone powder and epoxy resin and subjected to an injection of fluid composed of acetic acid and distilled water for reaction times of 36, 72, and 108 hours. Microtomography images were generated and analyzed using VG Studio® software, determining total, isolated, and interconnected porosity, as well as pore size distribution, comparing with non-acidified samples and total porosity results obtained by helium gas porosimetry. A progressive increase in total porosity was observed over time (from 8.89% for the non-acidified sample to 15.18%, 28.01%, and 36.16% after 36, 72, and 108 hours of acidizing, respectively), with an increase in interconnected porosity and a decrease in isolated porosity, due to the propagation of *wormholes* generated by the process in the rocks. Also noteworthy was the transition between the increase in macropores and reduction in micropores, evidenced by the moving of the distribution histogram to the right, where an increase in the frequency of larger pores and a reduction in smaller pores was observed after dissolution.

KEYWORDS: *Wormholes*, Acetic Acid, X-ray Computed Microtomography, Synthetic Carbonate Rocks.

1 INTRODUÇÃO

A acidificação de matriz é uma técnica de estimulação empregada em carbonatos e arenitos que tem por objetivo remover o dano e aumentar o escoamento de óleo e gás em regiões próximas aos poços (SU *et al.*, 2022), aumentando a produtividade em reservatórios de hidrocarbonetos (JAFARPOUR *et al.*, 2021). A técnica consiste em injetar ácidos a uma pressão abaixo da pressão de fraturamento de formação das rochas,

promovendo sua dissolução (KHALIL *et al.*, 2021; FURUI *et al.*, 2022), removendo o dano proveniente de atividades operacionais e criando canais de alta permeabilidade, chamados *wormholes* (FREDD E FOGLER, 1999; WANG *et al.*, 2023), que conduzem os hidrocarbonetos do reservatório até o poço (JAFARPOUR *et al.*, 2021). Os *wormholes* são formados no processo de dissolução da rocha, quando os poros maiores crescem em uma taxa substancialmente maior que o crescimento dos poros menores, de modo que os poros maiores passam a receber uma quantidade de fluido de dissolução em proporções cada vez maiores, observando-se a transferência de massa e reação da superfície, consumindo-se a massa da rocha e contribuindo para a formação desses caminhos, influenciando diretamente em suas propriedades petrofísicas de porosidade e permeabilidade.

O ácido clorídrico (HCl) é o ácido mais empregado para a acidificação de carbonatos, por apresentar baixo custo e alta reatividade com formações carbonáticas (FREDD E FOGLER, 1999). Entretanto, sua alta reatividade pode apresentar dissolução reduzida, criando padrões de *wormholes* indesejáveis associados às rápidas taxas de dissolução, além do alto potencial de corrosão da tubulação especialmente a altas temperaturas, sendo necessário a utilização de inibidores que elevam os custos da operação (DACCORD *et al.*, 1989). Como alternativa, são usados ácidos orgânicos, como o ácido acético (CH_3COOH) (com concentração de até 13%), que são considerados ácidos fracos, passando lentamente na matriz carbonática, elevando o tempo de contato rocha-ácido, proporcionando penetração mais profunda e melhor estimulação, apresentando baixa corrosividade (BUIJSE *et al.*, 2003).

Apesar do interesse em estudar as propriedades mecânicas e petrofísicas de arenitos e carbonatos, bem como o comportamento das rochas devido à interação entre rochas e fluidos, análises destrutivas e não-destrutivas demandam elevada amostragem de rochas. Amostras naturais são limitadas, com alta heterogeneidade, tornando-se um inconveniente para ensaios laboratoriais que requerem um número significativo de plugues para representar um determinado problema (ALMETWALLY E JABBARI, 2020; KONG *et al.*, 2019), tornando-se difícil obter um número suficiente de amostras para a quantificação desses sistemas (FEDRIZZI *et al.*, 2018). Com isso, o desenvolvimento de rochas sintéticas (rochas carbonáticas e areníticas) em laboratório se mostra como uma alternativa, representando analogamente as características das rochas naturais de interesse, aplicando-se diferentes técnicas de fabricação, incluindo processos de consolidação por compactação e impressão 3D, além de diferentes materiais (areia, pó de rocha, halimeda) e uso de aglomerantes (epóxi e cimento Portland) para fabricação.

Com a importância do estudo acerca das propriedades petrofísicas das rochas em processos de interação rocha-fluido, este trabalho tem por objetivo avaliar as variações de porosidade sofridas em rochas carbonáticas sintéticas acidificadas utilizando imagens de microtomografia computadorizada de Raios-X. As amostras foram produzidas a partir de pó de rocha calcária e resina epóxi, consolidadas por compactação e tratamento térmico em estufa e posteriormente submetidas ao processo de acidificação de matriz em laboratório usando ácido acético e água destilada como fluido reativo. Em seguida, imagens de microtomografia foram geradas após escaneamentos das rochas ensaiadas, e analisadas determinando-se a porosidade total, isolada e interconectada, além da distribuição de frequência de tamanho (diâmetro) de poros para classificação em micro, meso e macroporos, comparando os resultados com amostras não acidificadas e com resultados de porosidade total obtidos por porosimetria a gás hélio.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Descrição das Rochas Carbonáticas Sintéticas

As rochas carbonáticas sintéticas foram fabricadas em plugues cilíndricos de 7,60 x 3,80 cm (H x D) utilizando 90% de pó de rocha calcária e 10% de resina epóxi, seguindo os procedimentos descritos por dos Santos *et al.* (2024), dos Santos *et al.* (2025a) e dos Santos *et al.* (2025b), consolidadas em única camada a uma energia de compactação de 20 MPa e posterior tratamento térmico em estufa a 60 ºC durante 24h. Ao total, foram preparadas quatro amostras, sendo uma amostra para representar o cenário pré-acidificação e três amostras para os testes de acidificação para cada tempo de reação analisado (36, 72 e 108h). Suas massas foram registradas antes e após os ensaios, para fins comparativos.

2.2 Testes de Acidificação de Matriz

Os testes de acidificação de matriz foram realizados segundo dos Santos *et al.* (2025a), utilizando uma célula de injeção combinada com reservatórios de água e de solução ácida, compressor de ar e controlador de volume e pressão (Figura 1).

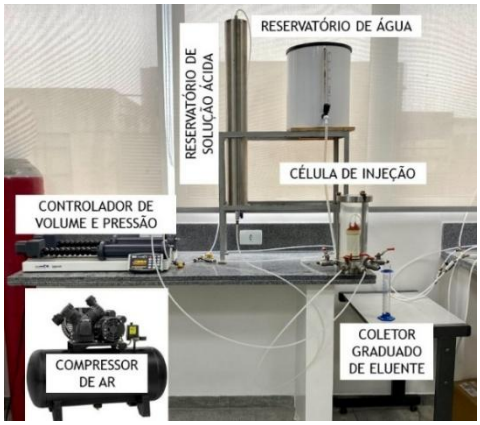


Figura 1. Sistema de injeção de fluido para testes de acidificação de matriz.

As amostras foram confinadas a uma pressão de 600 kPa (87 PSI) e submetidas a um fluxo de fluido vertical descendente (no sentido de topo a base do plugue e a uma pressão de injeção de 500 kPa – 72,50 PSI) de uma solução de 10% de ácido acético (concentração de 99,70% por pesa) e água destilada a uma temperatura de 25 ºC e pH inicial de 2,20, seguindo os tempos de reação analisados de 36, 72 e 108h. Após os testes, as amostras foram imersas em um recipiente com água destilada que era renovada constantemente até apresentar pH 7, para interromper as reações químicas preexistentes. Em seguida, as rochas foram secas em estufas a 60 ºC durante 48 h ou até a constância de massa.

2.3 Porosimetria a gás Hélio

A porosidade Φ (%) das rochas também foi determinada antes e após os testes de acidificação de matriz utilizando porosimetria a gás hélio para fins de comparação com os resultados obtidos pela técnica de microtomografia computadorizada de Raios-X. O volume poroso foi calculado baseado na Lei de Boyle, cuja porosidade total foi determinada em porcentagem utilizando o porosímetro ULTRA-PORE 300 (Core Laboratories®) com poropressão de 1,03 MPa (150 PSI).

2.4 Microtomografia Computadorizada de Raios-X

A microtomografia computadorizada de raios-X, que consiste em uma técnica de análise não destrutiva, foi realizada para verificação da morfologia interna das quatro rochas em termos de distribuição de tamanho e interconectividade de poros antes e após a acidificação. O escaneamentos foram realizados utilizando o tomógrafo industrial (Nikon Metrology®, modelo XT H 225), com voltagem de 150 kV, corrente de 63 vA, filtro de alumínio e tempo de exposição de 500 ms do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. Subdividiu-se as rochas em 1490 fatias com resolução de 55 µm; para a reconstrução das imagens, utilizou-se o software CT PRO 3D XT 3.0.3, gerando as fatias nos planos xy, xz e yz (2D). Para a visualização e análise das imagens, utilizou-se o VG Studio®, responsável pela reconstrução das amostras em três dimensões (3D) para posteriores análises.

2.5 Perfil de Distribuição de Porosidade e Distribuição de Tamanho de Poros

O perfil de distribuição de porosidade consiste em descrever a distribuição de poros ao longo do comprimento das amostras, verificando a porosidade local em que os poros se concentram; já a distribuição de tamanho de poros, do inglês *pore size distribution (PSD)*, consiste em determinar a frequência com que os diferentes diâmetros se apresentam, e as variações de frequência das suas dimensões. Ambas as análises foram realizadas em amostras não acidificadas e em amostras após testes de acidificação, comparando-as para discussão dos efeitos da dissolução química considerando estas análises, totalizando quatro amostras, sendo elas uma amostra não acidificada e uma amostra acidificada para cada tempo de reação analisado (36, 72 e 108h). A próxima etapa foi a criação da superfície de análise, ajustando-se as condições de imagem e resolução de modo que fossem captadas as regiões em preto, referentes ao volume poroso. Para ambas as análises, foi

utilizado o software VG Studio®, em que inicialmente foram importadas as fatias feitas pelos escaneamentos correspondentes ao plano xz em 16 bits, selecionando a região de interesse e passando em seguida o filtro de mediana para eliminação de possíveis artefatos das imagens (Figura 2). Por fim, através do módulo transport phenomena > capillary pressure, disponível no software, foram simulados a passagem de um fluido (água) nos espaços vazios, gerando-se em seguida os perfis de porosidade total, isolada e interconectada, assim como a distribuição do tamanho de poros.

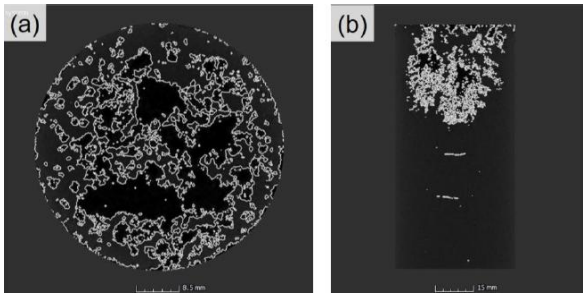


Figura 2. Seleção de superfície de análise com destaque para a região correspondente ao volume poroso no plano (a) xz e (b) xy.

O perfil de distribuição de porosidade foi determinado, apresentando a porosidade isolada, interconectada e total em (%), quantificando os poros isolados e interconectados distribuídos na estrutura interna da matriz rochosa ao longo de cada fatia segmentada de seu comprimento. Já a distribuição do tamanho de poros (PSD) foi calculado usando a abordagem de esferas inscritas máximas, cujo software utiliza esferas de tamanhos variados e as encaixa no espaço poroso; para cada ponto, é encontrada a maior esfera de ajuste que se sobrepõem a esse ponto, cujo diâmetro dessa esfera é atribuído ao diâmetro local do poro (ponto). Ao final, geraram-se os respectivos histogramas com a distribuição/frequência com que estas esferas se encaixaram nesses espaços, classificando o tamanho de poros interpartículas segundo Lonoy (2006) em faixas, distinguindo microporos (10 – 50 μm), mesoporos (50 - 100 μm) e macroporos (> 100 μm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos testes de acidificação de matriz e porosidade total

Os testes de acidificação de matriz foram realizados respeitando-se o protocolo apresentado e percebeu-se a degradação das amostras (Figura 3) causada pelo ataque do ácido acético com a evolução temporal, já que, quanto maior o tempo de ensaio, mais grãos das rochas carbonáticas são dissolvidos, causando a diminuição de massa e aumento da porosidade provocada pelo processo dissolutivo. Com a passagem do ácido na rocha, os poros vão se tornando cada vez maiores e mais interconectados, criando canais de alta permeabilidade (*wormholes*) cuja ideia central da técnica de estimulação é a formação destes canais, que conduzem os hidrocarbonetos do reservatório até o poço (JAFARPOUR *et al.*, 2021).

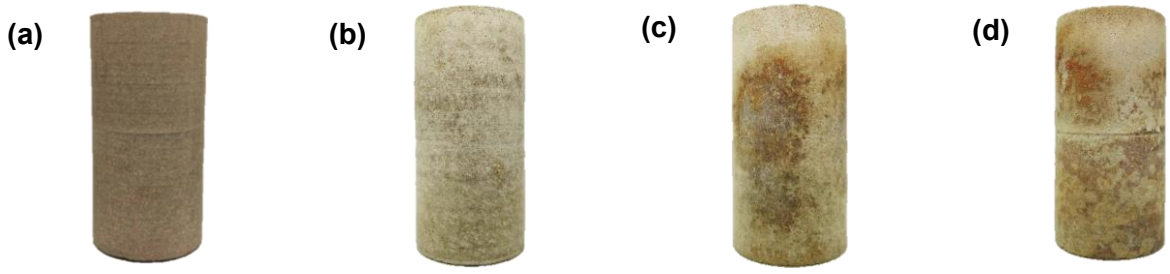


Figura 3. Rochas carbonáticas sintéticas 0 h – não-acidificada (a) e acidificadas para os tempos de reação de 36h (b); 72h (c) e 108h (d).

A Tabela 1 relaciona os valores de massa inicial e final, variação de massa (%) e porosidade inicial e final total pela porosimetria a gás hélio, apresentando um aumento de quanto a matriz rochosa foi dissolvida

comparando-se os tempos de 36h (6,36% de perda) para 72h (25,50%) e 108h (34,29%), com consequente aumento de porosidade, apontando valores de 12,14% para 37,64% após 108h de acidificação.

Tabela 1. Massa inicial e final, variação de massa e porosidade pré e pós-acidificação utilizando porosimetria a gás hélio.

Amostras	Massa			Φ (%) – Porosimetria a gás hélio	
Tempo de reação (h)	Massa inicial (g)	Massa Final (g)	Variação (%)	Pré-acidificação	Pós-acidificação
0 (não acidificada)	176,28	176,28	-	12,23	12,23
36	173,43	162,40	6,36	12,20	16,31
72	183,89	137,00	25,50	12,61	30,47
108	180,95	118,90	34,29	12,14	37,64

A taxa de reação química de dissolução além da disponibilidade iônica de H^+ presente na solução, que é mais reduzida em se tratando de ácido acético, governam a evolução do processo de dissolução da calcita, sendo representada por quanto de massa do mineral foi perdida ao longo da acidificação (SOUZA, 2023).

3.2 Perfis de Distribuição de Porosidade

A Figura 4 apresenta os perfis de distribuição de porosidade da rocha não-acidificada e das rochas acidificadas para os tempos de reação analisados, indicando os valores de porosidade total, isolada e interconectada utilizando as metodologias descritas anteriormente, baseadas em análises de imagens de microtomografia computadorizadas de Raios-X.

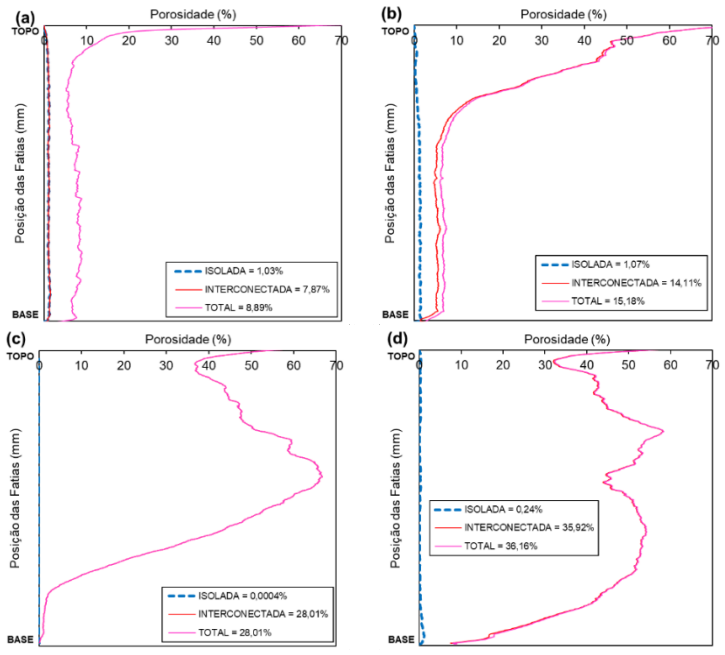


Figura 4. Perfis de distribuição de porosidade para os tempos de: 0 h (a); 36h (b); 72h (c) e 108h (d).

A amostra não-acidificada (tempo 0 h) apresenta 1,03% de poros isolados e 7,87% de poros interconectados (que permite a transmissão do fluido de um poro a outro), com um total de 8,89%; além disso, nota-se que a rocha apresenta uma distribuição de poros uniforme ao longo de seu comprimento, evidenciada pela constância do comportamento das curvas entre a sua região superior (topo) e inferior (base). Analisando a amostra após 36h de ensaio, houve um aumento da porosidade, apontando valores de 1,07% para porosidade isolada, 14,11% para porosidade interconectada e 15,18% para porosidade total; o aumento do volume de poros se concentrou na região próxima ao seu topo, e avançou até uma distância de aproximadamente 1/3 de seu comprimento, evidenciado pelo deslocamento do gráfico para a direita nesta região. Para o tempo de 72h, a amostra apresentou 0,0004% de porosidade isolada e 28,01% de porosidade interconectada e total, mostrando

que, com o avanço da dissolução, a diferença entre poros isolados e interconectados aumenta, havendo uma transição de poros isolados em interconectados e ampliação dos poros interconectados já presentes; ao analisar o comportamento do perfil, há um avanço expressivo da porosidade até 2/3 do comprimento da amostra, indicando o avanço dos *wormholes* ao longo de seu comprimento. Após 108h de ensaio, esta apresentou 0,24% de porosidade isolada, 35,92% de porosidade interconectada e 36,16% de porosidade total, onde a diferença entre a porosidade isolada e interconectada aumentou, proporcionado pela dissolução química da matriz carbonática. Analisando o comportamento dos perfis, o aumento da porosidade se dá até a base das amostras.

A Tabela 2 compara os valores de porosidade obtidos para as amostras considerando as metodologias de porosimetria a gás hélio e análise por imagem via microtomografia computadorizada (μCT).

Tabela 2. Comparativo entre a porosidade obtida por porosimetria a gás hélio e por análises de μCT.

Amostra/Tempo de Reação (h)	Φ (%)	
	Porosimetria a gás hélio	μCT
0	12,23	8,89
36	16,31	15,18
72	30,47	28,01
108	37,64	36,16

Observa-se que, para todas as amostras ensaiadas, os valores obtidos via análises por imagem (μCT) são inferiores àqueles calculados pela porosimetria a gás hélio; isso se deve ao fato desta técnica ser limitada à capacidade do equipamento e consequentemente à resolução das imagens geradas, de modo que os poros do sistema menores do que os voxels da imagem analisada não são quantificados (COSTA *et al.*, 2016), limitação esta que não é observada pela metodologia utilizando o gás hélio. Além disso, quando o voxel que contém ao mesmo tempo matriz rochosa e espaço poroso, os valores de níveis de cinza registrados representam a média dos materiais presentes, gerando incertezas na segmentação de modo que microporos podem ser interpretados como matriz rochosa; ruídos de imagem e densidade de materiais semelhantes também podem limitar as análises devido a dificuldades associadas à segmentação e resolução das imagens geradas. Observa-se na Tabela 2 que essa diferença é maior na amostra pré-acidificação onde deve conter poros menores do que os voxels da imagem.

3.3 Análise de Distribuição de Tamanho de Poros (PSD)

A Figura 5 apresenta os histogramas com a frequência do tamanho do diâmetro de poros da rocha não-acidificada e das rochas acidificadas para os tempos de reação analisados, indicando os valores de microporo, mesoporo e macroporo baseadas em análises de imagens de microtomografia computadorizadas de Raios-X.

Observa-se que, para a rocha não-acidificada (0 h), os poros se concentram na faixa de 10 μm, cuja classificação proposta por Lonoy (2006) aponta 91,37% de microporos e 8,63% de macroporos. Após 36h de ensaio, a rocha apresenta seus poros concentrando-se na faixa de 18 μm e variando até 4606 μm com predominância de microporos (80,65%) e 19,35% de macroporos. Em 72h, a rocha concentra a maior parte de seus poros na faixa de 17 μm e variam até 5571 μm, compreendendo 62,35% de microporos e 37,65% de macroporos. Por fim, para o tempo de 108h, seus poros variam entre 10 μm e 4822 μm, apresentando 36,62% de microporos e 63,38% de macroporos. À medida em que a acidificação evolui, há uma inversão entre a proporção do tamanho de poros do sistema, havendo uma tendência de deslocamento dos picos do gráfico para a direita (que representa o aumento de poros), de modo que, com o avanço do tempo, a frequência de microporos diminui, enquanto que a frequência de macroporos aumenta, mostrando a ação da dissolução do ácido acético no aumento do diâmetro de poros provocado pela estimulação ácida (ECONOMIDES *et al.*, 2012).

Para todas as análises de PSD apresentadas, não houve a quantificação de mesoporos ao ser considerada a classificação proposta por Lonoy (2006), que estabelece valores entre 50 e 100 μm para esta faixa; isto pode ser justificado pela forma como o software distribuiu a subdividiu as faixas de diâmetros analisados, não considerando e quantificando os diâmetros correspondentes à classificação de mesoporos nas análises; observa-se ainda que, diâmetros inferiores à faixa de 10 μm não foram quantificados, estando relacionado à

resolução das imagens de µCT utilizadas, as quais não foi possível identificar poros com diâmetros inferiores a estes, sendo esta uma limitação da metodologia para a presente análise.

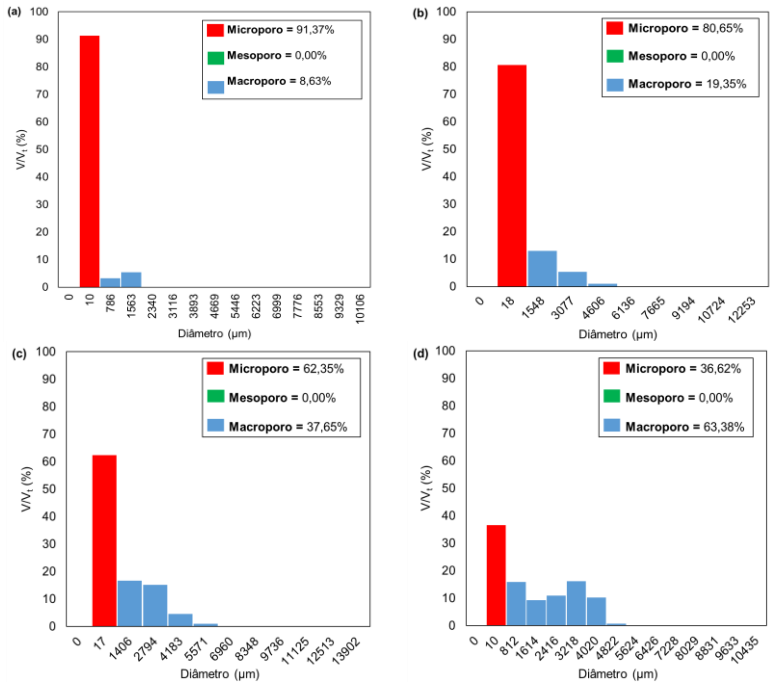


Figura 5. Histograma de distribuição de tamanho de poros (PSD) para os tempos de: 0 h (a); 36h (b); 72h (c) e 108h (d).

Apesar dos desafios em representar condições estruturais/físicas, químicas e mineralógicas de plugues reais de reservatório, semelhanças entre os resultados experimentais obtidos durante os testes de acidificação de matriz realizados nesta pesquisa em rochas sintéticas com os resultados obtidos em amostras naturais apresentados na literatura evidenciam a relevância da técnica para estudos de interação rocha-fluido, desde que as metodologias combinadas aos materiais empregados gerem condições análogas para a obtenção de amostras de representatividade satisfatória.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou a metodologia de fabricação de rochas carbonáticas sintéticas como forma de avaliar a acidificação de matriz em reservatórios de petróleo utilizando ácidos orgânicos (ácido acético), analisando as mudanças causadas pela técnica de estimulação de poços em reservatórios carbonáticos quanto à sua porosidade, provocada pela dissolução da rocha devido ao ataque ácido do fluido reativo injetado.

Mudanças nos valores de porosidade total foram evidentes após a acidificação, apresentando o aumento desses com a evolução temporal; o aumento do tempo de contato estabelecido entre o fluido injetado e a matriz rochosa provocou o aumento do volume de poros; além disso, observou-se uma transição entre poros isolados e interconectados, diminuindo-se os primeiros e aumentando-se os últimos à medida em que o tempo de ensaio aumentava, provocado pela propagação dos *wormholes* na estrutura interna nas rochas. Destacou-se a transição entre o aumento de macroporos e redução de microporos, relacionado ao diâmetro dos poros, evidenciado pelo deslocamento do gráfico de frequência de distribuição para a direita, em que se observa o crescimento da frequência dos poros maiores e redução dos poros menores após a dissolução de carbonatos. Observa-se ainda que os valores de porosidade total obtidos via análises por imagem são inferiores, porém próximos àqueles calculados pela porosimetria a gás hélio, atribuindo ao fato da técnica ser limitada à capacidade do equipamento e consequentemente à resolução das imagens geradas, de modo que os poros do sistema menores do que os voxels da imagem não são captados e quantificados durante as análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almetwally, A.G., Jabbari, H. (2020) Experimental investigation of 3D printed rock samples replicas. *J Nat Gas Sci Eng*, 76:103192.

Buijse, M., Boer, P., Breukel, B., Klos, M., Burgos, G. (2003) Organic acids in carbonate acidizing. In: SPE European Formation Damage Conference.

Costa, L.F., Antonino, A.C.D., Heck, R.J., Coutinho, A.P., Pimentel, R.M.M., Vasconcelos, T.C. *et al.* (2016) Porous space in Brazilian soils using X-ray computed tomography. *R bras Geogr Fís* 9(3):692-706.

Daccord, G., Touboul, E., Lenormand, R. (1989) Carbonate acidizing: Toward a quantitative model of the wormholing prenomenon. *SPE Prod. Eng*. 4 (01), 63–68.

dos Santos, Y. R. P., Gomes, I., Lima, A., Barbosa, J., Correia Filho, O., Antonino, A. C. D., Duarte, D., & Rodrigues, M. (2024) Production of Synthetic Carbonate Rocks Using Limestone Mining Waste: Mineralogical, Petrophysical and Geomechanical Characterization. *Resources*, *13*(6), 78.

dos Santos, Y.R.P., Gomes, I.F., Lima, A., Rodrigues, M.A.F., Silva Filho, E.D., Barbosa, J.A., Antonino, A.C.D., Duarte, D.A., Antunes, A.F.N.R. (2025a) Acid-rock interaction investigation and the influence of fractures during matrix acidizing in carbonate rocks, *Petroleum*, 11(4), p. 475-495.

dos Santos, Y.R.P., Gomes, I.F., Lima, A. *et al.* (2025b) Matrix acidizing impact on the geomechanical properties in carbonate rocks: an experimental approach using acetic acid at different contact times. *Mech Time-Depend Mater* 29, 97.

Economides, M.J., Hill, A. D., Ehlig-Economides, C. (2012) *Petroleum Production Systems*, 2 ed., Upper Saddle River: Prentice Hall.

Fedrizzi, R.M., Ceia, M.A.R., Misságia, R.M., Santos, V.H., Lima Neto, I. (2018) Artificial carbonate rocks: Synthesis and petrophysical characterization. *J. Pet. Sci. Eng.* 163, p. 303-310.

Fredd, C.N., Fogler, H.S. (1999) Optimum conditions for wormhole formation in carbonate porous media: influence of transport and reaction. *SPE J.* 4 (3), 196–205.

Furui, K., Abe, T., Watanabe, T., Yoshioka, K. (2022) Phase-field modeling of wormhole formation and growth in carbonate matrix acidizing. *J. Pet. Sci. Eng.* 209, 109866.

Jafarpour, H., Aghaei, H., Litvin, V., Ashena, R. (2021) Experimental optimization of a recently developed matrix acid stimulation technology in heterogeneous carbonate reservoirs. *J. Pet. Sci. Eng.*, 196, 108100.

Khalil, R., Emadi, H., Altawati, F. (2021) Investigating the effect of matrix acidizing injection pressure on carbonate-rich Marcellus shale core samples: an experimental study. *J. Petrol. Explor. Prod. Technol*. 11, 725–734.

Kong, L., Ostadhassan, M., Liu, B., Li, C., Liu, K. (2019) Multifractal characteristics of MIP-based pore size distribution of 3D-printed powder-based rocks: a study of post-processing effect. *Transport Porous Media*, 129:599–618.

Lonoy, A. (2006) Making sense of carbonate pore systems. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull*. 90 (9), 1381–1405.

Souza, K.B.T.G. (2023) *Estudo experimental e numérico da influência da dissolução dos minerais em rochas carbonáticas sintéticas com injeção de um fluido reativo*. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Su, H., Zhou, F., Zheng, A., Wang, L., Wang, C., Yu, F., Kang, L., Li, J. (2022) Heavy oil recovery by alkaline-cosolvent-polymer flood: a multiscale research using micromodels and computed tomography imaging. *SPE J.*, p. 1–13.

Wang, Y., Zhou, F., Zhang, Y., Wang, Y., Su, H., Dong, R., Wang, Q., Bai, H. (2023) Numerical studies and analysis on reaction characteristics of limestone and dolomite in carbonate matrix acidizing. *Geoen. Sci. Eng.* 222, 211452.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/3

Caracterização e determinação de topo rochoso de rochas brandas

Henrique de Oliveira Ramos
Geólogo Geotécnico, MZ Geológica LTDA, Cuiabá - MT, Brasil, mzgeologica@gmail.com

Ilço Ribeiro Junior
Professor, Instituto Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil, ilco.ribeiro@ifmt.edu.br

Cristiano Zandoná dos Santos
Engenheiro Civil, Zandoná Consultoria Ltda, Cuiaba -MT, Brasil, cristianozandona@uol.com.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo caracterizar o topo rochoso interceptado por campanha de escavações para implantação de passagem de nível em obra de infraestrutura urbana localizada no município de Cuiabá, estado de Mato Grosso. A geologia predominante no local é definida pela presença de metassedimentos pelíticos do Grupo Cuiabá, caracterizadas como rochas brandas compostas de filitos sericíticos ardosianos. Trazemos uma reflexão teórica acerca da caracterização dos substratos caracterizados pelas investigações geotécnicas preliminares (sondagens SPT e mista) e exposições de rochas desconfinadas, com base nas normas ABGE Nº 109/2024, ABNT NBR 6484/2020 e referências da geologia clássica, uma vez que em cotas rasas das escavações afloravam substratos de rocha em contraposição as cotas do topo rochoso até então estabelecidas pelas sondagens.

PALAVRAS-CHAVE: Topo Rochoso, rochas brandas, filitos, sondagens, escavação.

ABSTRACT: This work aims to characterize the rocky top intercepted by an excavation campaign for the implementation of a level crossing in an urban infrastructure project located in the municipality of Cuiabá, Mato Grosso state. The predominant geology at the site is defined by the presence of pelitic metasediments of the Cuiabá Group, characterized as soft rocks composed of slaty sericitic phyllites. We present a theoretical reflection on the characterization of the substrates characterized by preliminary geotechnical investigations (SPT and mixed soundings) and exposures of unconfined rocks, based on ABGE standards No. 109/2024, ABNT NBR 6484/2020 and references from classical geology, since at shallow excavation levels rock substrates outcropped in contrast to the rocky top levels established by the soundings.

KEYWORDS: Bedrock, soft rocks, phyllites, boreholes, excavation.

1 INTRODUÇÃO

Durante as perfurações das estacas tipo raiz que compõem as estruturas de sustentação do tabuleiro e da cortina da trincheira do viaduto do Complexo Leblon, no município de Cuiabá, foram observadas divergências nas cotas dos topos rochosos dos metassedimentos indicados nos relatórios de sondagem, uma vez que houve a necessidade precoce de utilização de martelo de fundo para o avanço das perfurações, equipamento este utilizado para perfuração de materiais rochosos e/ou de resistência equivalente. Não obstante, amostras retiradas das perfurações das estacas armazenadas no canteiro de obras do consórcio construtor e caracterizações geotécnicas das frentes de escavação da trincheira corroboraram com a diferenciação nas cotas do topo rochoso estabelecidos pelas sondagens preliminares, fator este que impacta diretamente nos custos projetados para a implantação das fundações da obra.

Segundo Lacerda Filho *et al.* (2004), o contexto geológico do local de implantação da obra é definido pela presença de metassedimentos pelíticos do Grupo Cuiabá, caracterizado pelos filitos sericíticos ardosianos associados a fraturas controladas e intrusões de veios de quartzo. Rochas brandas como os filitos e ardósias, segundo Leão (2017) são definidas como material geológico pouco competente, mecanicamente complexo, de alta deformabilidade e baixa resistência, que se situam, em uma escala de propriedades, entre solos e rochas

duras, fator este que influencia diretamente no estabelecimento dos parâmetros de classificação do substrato para este contexto.

Entendemos a existência de uma interface complexa na determinação do topo rochoso em se tratar de rochas brandas, pois com o desconfinamento e relaxamento do maciço, os desplacamentos tendem a facilitar as escavações com equipamentos tipo escavadeiras, escarificadores e similares. Mas em se tratando do material em estado confinado no caso de estacas e tirantes, este desconfinamento não ocorre, sendo necessária técnicas de perfuração adotadas em substratos rochosos.

Antecedendo as evidências, provocamos uma reflexão teórica acerca da classificação das rochas bandas locais pelos parâmetros das investigações geotécnicas preliminares (sondagens) em contraponto com caracterizações geotécnicas das exposições rochosas desconfinadas pelas escavações durante a implantação da obra viária, com materialização e comparação dos perfis geotécnicos definidos por ambos os estudos.

Este artigo tem como objetivo caracterizar e determinar o topo rochoso das escavações da trincheira localizada na obra do Complexo Leblon, a luz das condicionantes geológicas e geotécnicas da região, fomentando subsídios em termos de engenharia, para determinação de resistência e escavabilidade do litotipo interceptado.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA DOS FILITOS, ARDÓSIAS E ROCHAS BRANDAS

As rochas brandas como as ardósias e os filitos são suscetíveis a inúmeras influências intempéricas físico-químicas gerando perfis de intemperismo espessos de até centenas de metros, além da deterioração e enfraquecimento dos materiais pela modificação do estado inicial de tensões, associadas a processos tectônicos (LEÃO, 2017).

Aspectos como a desagregabilidade e expansibilidade, em função da textura da rocha, mineralogia e presença de minerais argilosos são importantes características para classificação das rochas brandas, exercendo influência sobre o comportamento mecânico desses materiais, devido a variação do teor de umidade e estado de tensões (PINHO, 2003). Segundo Taylor (1988), as principais condicionantes para os processos de desagregação das rochas brandas são: Presença de estruturas e descontinuidades (foliações, clivagens e fraturas); Desagregabilidade da rocha motivada pela alternância de umedecimento e secagem; Presença de minerais argilosos expansivos.

Na mecânica das rochas, são empregadas classificações para rochas duras, não considerando o fato de que a rocha branda alterada é mais dúctil, menos resistente e as pressões intersticiais têm grande influência em seu comportamento (PINHO, 2003), tendendo a fornecer parâmetros erráticos para esta variedade de rocha. A ISMR (1981) propõe os termos *"soft"* para rocha de baixa resistência e *"low strength rock"* para rochas brandas fraturadas e alteradas.

Para solos e rochas, de origem sedimentar e metamórfica, Rocha (1977) concluiu que a resistência à compressão uniaxial e a coesão são as propriedades mais adequadas para definir os limites entre solo/rocha, quando nebulosa a sua determinação (SPINK e NORBURY, 1993).

3 GEOLOGIA LOCAL

No contexto regional os metassedimentos do Grupo Cuiabá, localizados na porção centro-sul do Estado de Mato Grosso, mais especificamente na Zona Interna da Faixa Paraguai (1,85 e 1,53 Ga), apresentam evolução associada a um orógeno Neoproterozóico, correlata as faixas móveis Araguaia e Brasília, que compõem a Província Tocantins (LACERDA FILHO *et al.,* 2004).

Segundo Luz *et al.* (1980), afloram na área de estudo as rochas da subunidade 5 do Grupo Cuiabá, composto basicamente por filitos e filitos sericíticos com intercalações de lentes de metaconglomerados, metamorfizadas na fácies xisto verde, conforme observa-se na Figura 1. O material encontrado na obra, confirma a geologia regional das folheações de filitos do Grupo Cuiabá. Vecchiato (1993) descreve que o Grupo Cuiabá propõe 4 fases de deformação regionais associados a metamorfismo de grau fraco. As Fases D1, D2 e D3 apresentam *trend* NE-SW com estruturas mergulhando preferencialmente para NW.

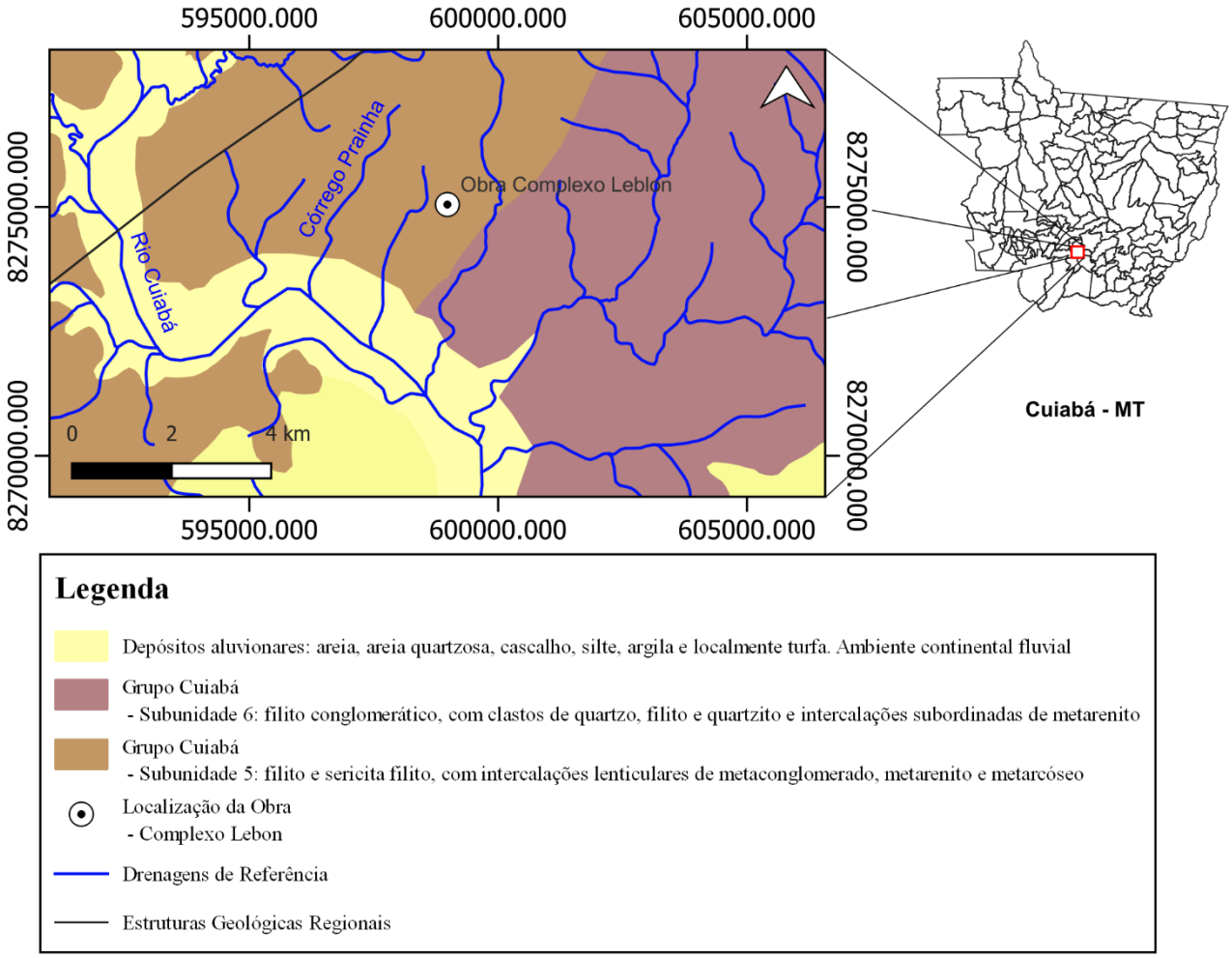


Figura 1. Mapa Geológico Regional da região central do município de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil (Alterado de Lacerda Filho *et al.*, 2006).

5 METODOLOGIA DE TRABALHO

5.1 Sondagens Rotativas

Na fase preliminar da obra foram realizadas 02 (duas) campanhas de sondagem para investigação geotécnica, colaborando para 05 (cinco) pontos de sondagem a percussão (SPT) e 06 (seis) pontos de sondagem mista (SPT + Rotativa), de acordo com as ABNT NBR 6484 (2020) e ABNT NBR 6490 (2016). Os dados das sondagens realizadas foram analisados e correlacionados com as litologias detectadas nos estudos de descrição das trincheiras e exposições de escavação, com o objetivo de reconstituir os pacotes em subsuperfície baseado em conceitos das vertentes geológica e geotécnica do local.

5.2 Descrição das Trincheiras e exposições

Compondo a fase de investigação deste estudo, para viabilidade da classificação e descrição direta do topo rochoso, foram abertas 02 (duas) trincheiras com auxílio de escavadeira hidráulica, com o objetivo de expor o contato do pacote de solo (superior) com as rochas alteradas da base.

A descrição do maciço foi realizada com base nas exposições das faces de escavação, em 04 (quatro) pontos, espaçados em aproximadamente 50 (cinquenta) metros, para cobertura/investigação total da área da obra. As descrições geotécnicas são baseadas em caracterizações qualitativas e quantitativas dos litotipos

presentes, com foco nas cotas de topo e base, grau de alteração, coerência, estruturas principais (acamamentos, foliações, fraturas) e disposição dos contatos.

Nos afloramentos descritos foram verificadas as profundidades dos contatos solo-rocha, auxiliado de equipamentos de aferição métrica, além das análises dos parâmetros físicos e estruturais dos pacotes, auxiliados de equipamentos como martelo de geólogo, lupa, bússola, caneta magnética e caderneta de campo.

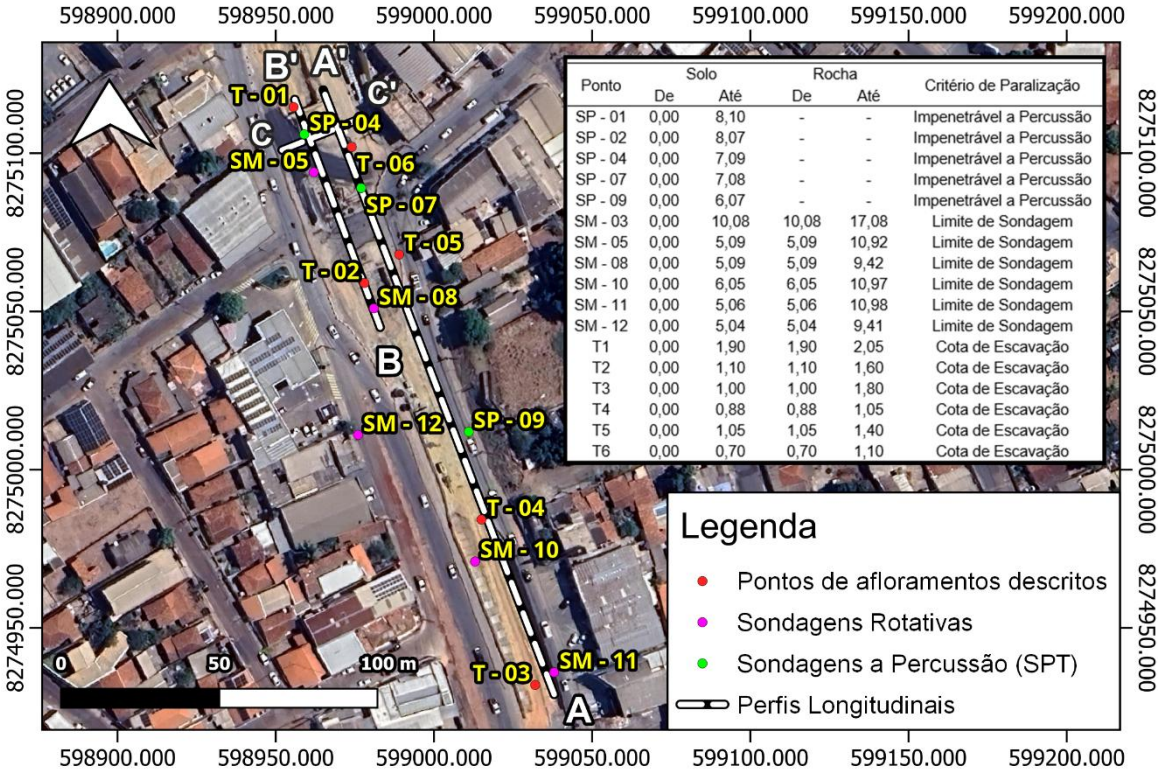
A classificação geológica geotécnica do topo rochoso obedeceu a norma da ABGE Nº 109 (2024) para simples classificação litológica macroscópica, considerando o grau de alteração, grau de coerência, grau de fraturamento e caracterização das descontinuidades como via plausível de correlação das exposições de rocha com as sondagens rotativas executadas inicialmente.

A ABGE (2021) define que o grau de alteração indica os estágios de modificação física e química da assembleia mineral de uma rocha decorrente de processos de intemperismo. As influências das ações intempéricas nos maciços rochosos colaboram com a perda de resistência mecânica do material. Durante as descrições geotécnicas de rochas brandas é importante avaliar a correlação do Grau de Alteração com o Grau de Coerência, devida a aplicação preferencial da coesão para esta litologia, para assim facilitar a identificação e distinção dos horizontes do perfil de intemperismo. O grau de coerência avalia a resistência da rocha por meio de esforços a compressão, resistência a risco e impacto do martelo de geólogo, descrevendo assim a sua fragilidade, dureza e tenacidade. O Grau de Fraturamento é o parâmetro que expressa a quantidade de descontinuidades (fraturas/juntas) contidas por metro linear, complementando com a caracterização da orientação destas estruturas e natureza das paredes das descontinuidades.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo são referentes a correlação dos resultados da investigação das sondagens mistas associadas a caracterização geológica das exposições de rocha dos taludes de escavação, provocando uma discussão focada na qualificação e caracterização geotécnica destes materiais.

A Figura 2 mostra a locação dos pontos de sondagens mista e a percussão (SM e SP) realizados na etapa preliminar da obra, bem como os pontos de descrição de trincheira (T), com o resumo dos perfis estabelecidos por meio das investigações diretas, com foco nos contatos solo-rocha estabelecidos.



Ponto	Solo De	Solo Até	Rocha De	Rocha Até	Critério de Paralização
SP - 01	0,00	8,10	-	-	Impenetrável a Percussão
SP - 02	0,00	8,07	-	-	Impenetrável a Percussão
SP - 04	0,00	7,09	-	-	Impenetrável a Percussão
SP - 07	0,00	7,08	-	-	Impenetrável a Percussão
SP - 09	0,00	6,07	-	-	Impenetrável a Percussão
SM - 03	0,00	10,08	10,08	17,08	Limite de Sondagem
SM - 05	0,00	5,09	5,09	10,92	Limite de Sondagem
SM - 08	0,00	5,09	5,09	9,42	Limite de Sondagem
SM - 10	0,00	6,05	6,05	10,97	Limite de Sondagem
SM - 11	0,00	5,06	5,06	10,98	Limite de Sondagem
SM - 12	0,00	5,04	5,04	9,41	Limite de Sondagem
T1	0,00	1,90	1,90	2,05	Cota de Escavação
T2	0,00	1,10	1,10	1,60	Cota de Escavação
T3	0,00	1,00	1,00	1,80	Cota de Escavação
T4	0,00	0,88	0,88	1,05	Cota de Escavação
T5	0,00	1,05	1,05	1,40	Cota de Escavação
T6	0,00	0,70	0,70	1,10	Cota de Escavação

Figura 2. Pontos de Afloramentos Descritos (T), Sondagens Rotativas (SM), Sondagens a Percussão (SP) e Perfis Longitudinais (A-A', B-B' e C-C'), anexa ao resumo de profundidades dos contatos solo-rocha.

Foram traçados perfis longitudinais A – A', B – B' e C – C', locados conforme a Figura 2 e expressos conforme Figura 3. Nos pontos T1 e T2 foram abertas trincheiras para acesso ao contato rocha-solo, enquanto nos pontos T3 a T6 foram descritos aproveitando as frentes de escavação.

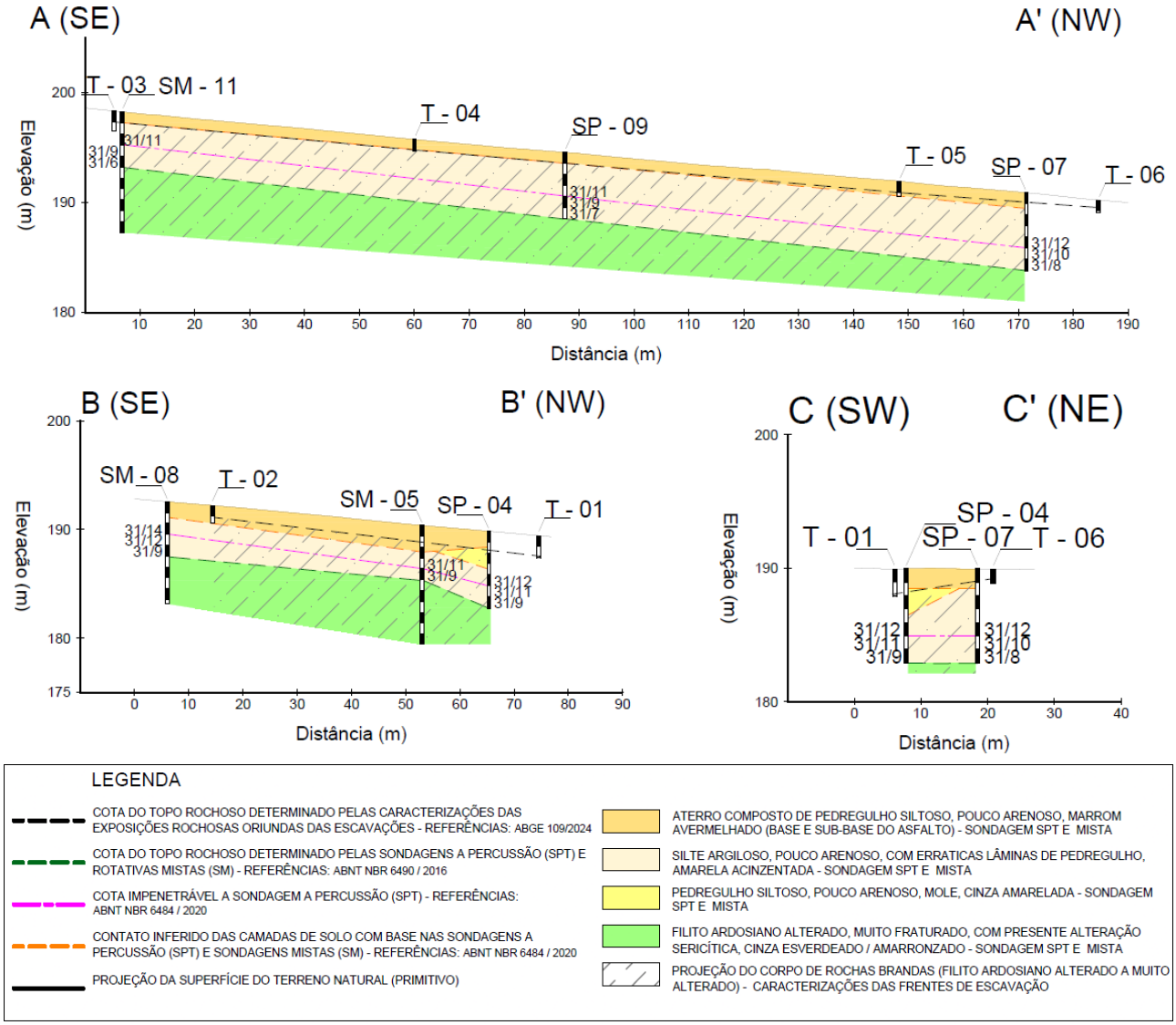


Figura 3. Perfis longitudinais A-A', B-B' e C-C' com legenda correspondente.

Baseado nos resultados de SPT e das sondagens mistas, neste primeiro momento se estabelece as cotas de transição entre solo e rocha no nível "Impenetrável a Percussão" dos perfis.

Segundo a ABNT NBR 6484 (2020), o nível de solo será considerado "Impenetrável a Percussão" quando na cota de fundo da manobra, em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar de 30 ou se não for observado o avanço do amostrador durante a aplicação de 5 golpes sucessivos do martelo. Considerando estas definições, foram observados estes cenários nos perfis de sondagem entre as profundidades de 3 e 4 metros, com exceção do SM – 3, nos permitindo constatar o início de níveis "duros" nestas profundidades, em razão da interceptação de pacotes menos alterados das rochas brandas, possibilitando o avanço do ensaio somente por meio de lavagem do furo.

A sondagem SPT caracteriza a resistência a penetração do amostrador padrão, entretanto em função do ângulo de mergulho da foliação pode haver maior facilidade em relação à penetração, maculando a interpretação do topo rochoso (PINHO, 2003).

Os pontos de descrição das escavações foram posicionados a montante e jusante dos pontos investigados previamente por meio das sondagens (SPT e Rotativa), com o objetivo de correlacionar lateralmente as litologias observadas nos dois momentos.

Nos perfis longitudinais da Figura 3 podem ser observados os dados coletados a partir dos pontos sondados em contraponto com o observado nas escavações iniciais da obra, com a exposição dos filitos da Baixada Cuiabana.

Os contatos solo-rocha nos pontos das sondagens variaram entre as profundidades de 5,04 m e 10,08 m, em relação a cota de boca de cada furo, dados estes que variam de acordo com a sua locação, ocorrendo solos mais rasos no SM – 11 (cota alta do terreno) e os mais espessos no SM – 03 (cota baixa do terreno).

De maneira global, as sondagens mistas executadas caracterizam o substrato rochoso como filitos sericíticos, com planos de foliação bem definidos, por vezes ocorrendo clivagem ardosiana, muito a extremamente alterada (A3/A4), pouco coerente a incoerente (C3/C4), com *Rock Quality Designation* (RQD) de grau 5 (muito pobre), extremamente fraturada (F5), com planos das descontinuidades preferencialmente lisas (S2) e de inclinações suborizontais a Inclinadas (SH/I), e colorações variando entre verde e cinza.

Com relação às descrições das paredes escavadas e trincheiras foram detectados níveis de solo mais rasos quando comparados aos ensaios de sondagem, com o topo rochoso variando entre 0,7 m e 1,90 m de profundidade, sobrepostas por camadas de aterro altamente compactadas que compõem a base e sub-base da pavimentação da Avenida Miguel Sutil, como pode ser visto nas Figuras 4A.

Os afloramentos são compostos de filito ardosiano, parcialmente oxidado, com presente alteração sericítica e planos de foliação/clivagem bem definidos mergulhando para noroeste em médio ângulo (*trend* NE-SW), ocorrendo rochas alteradas moles (A3), pouco a mediamente coerente (C2 - C3), mediamente fraturada (F3), com planos das descontinuidades preferencialmente lisas (S2) representados por fraturamentos inclinados a subverticais (I - SV) preferencialmente preenchidas por película de oxidação (Figura 4B) mergulhando em alto ângulo para nordeste (*trend* NW-SE), perfazendo colorações que variam entre marrom acinzentada a esverdeada.

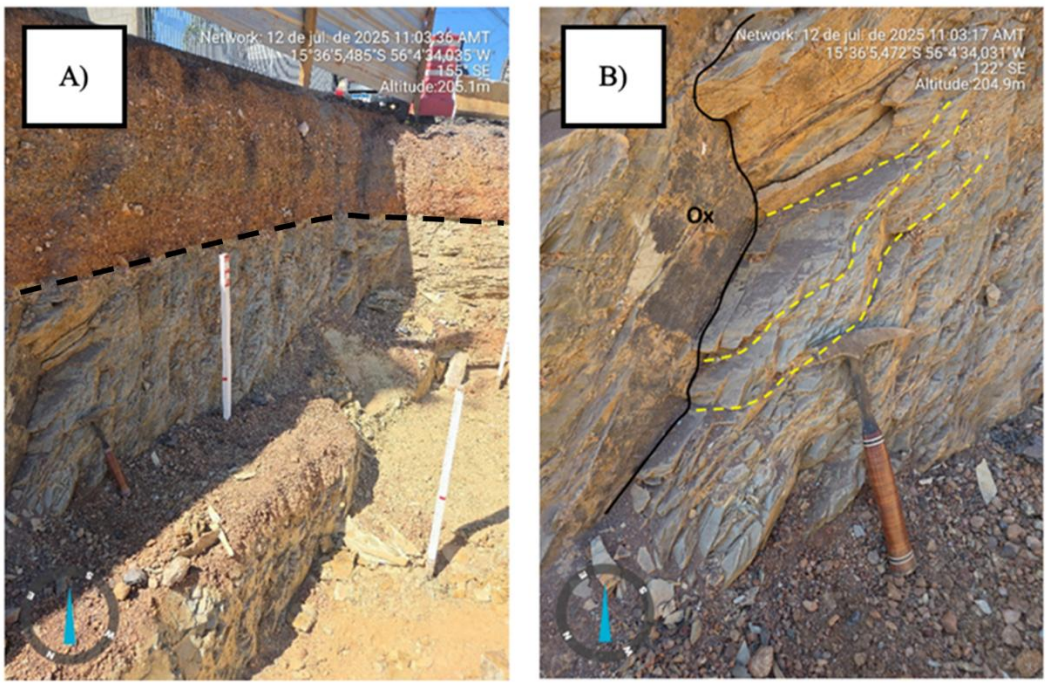


Figura 4. A) Contato (linha tracejada preta) da base de solo compactado do pavimento asfáltico sobrepondo os filitos sericíticos do Grupo Cuiabá em cotas rasas do terreno. B) Detalhe da clivagem ardosiana (linha tracejada amarela) do metassedimento e fraturamento perpendicularizado (linha preta) preenchidos por oxidação.

Os níveis do filito caracterizado são escaváveis com escarificadores (característica restrita das rochas brandas), com intensa transformação físico-química, quebrável ao golpe de martelo de geólogo, onde a lâmina provoca sulcamento na superfície durante o teste de coesão.

Nos planos de clivagem, por se tratar de zonas de fraqueza da rocha, observa-se veios de quartzo concordantes com estas estruturas, além do fraturamento penetrativo próximo a estas zonas. As estruturas de deformação (foliação, clivagem) observadas nos filitos expostos pelas escavações da obra, geometricamente, apresentam relação angular com as estruturas reliquiares (acamamentos – S_0) do protólito destas rochas.

Ao longo das descrições dos afloramentos foi possível observar que nas bordas das frentes de escavação ocorrem desplacamentos expressivos concordantes aos planos de clivagem e de fratura. Segundo Ribeiro Junior (2022) a instabilidade, ou desplacamento, dos solos e metassedimentos da Baixada Cuiabana podem ser ativados devido ao acréscimo de umidade, presença de argilominerais expansivos ou alívio das tensões de confinamento sobre o material, fatos estes que colaboram para o desmonte dos níveis saprolíticos durante atividades de escavação.

Exclusivamente no ponto de sondagem SPT – 04, foi descrito um nível de "Pedregulho argiloso, variegado, mole", com número máximo de SPT igual a "2", situação similar com a observada em T – 01, devido a ocorrência do saprólito muito alterado, mole, com expressiva umidade, amarelo a esverdeado, apresentando surgência e fortes sinais de fluxo d'água. Também foi observada a surgência de água no ponto investigado T – 02, a partir de 1,40 m, porém com a surgência d'água associada ao topo rochoso.

Segundo os estudos de classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em ambientes tropicais de Vaz (1996), nos permite classificar como RAM (Rocha alterada mole) as rochas interceptadas pelas frentes de escavação, onde o autor descreve este horizonte como sendo um intervalo que pode ser escavado manualmente com auxílio de picareta e martelo de geólogo, ou mecanicamente. Vaz (1996) complementa que estes níveis são perfuráveis pelo processo de lavagem da sondagem a percussão, se assemelhando aos materiais de 2ª categoria nos níveis de escavabilidade.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve sua concepção a partir da dificuldade sobre a definição do topo rochoso dos metassedimentos nas fases de perfuração das estacas raiz, utilizadas como fundação do tabuleiro da trincheira do complexo Leblon, na Cidade de Cuiabá – MT. As amostras extraídas em cotas rasas das perfurações das estacas perfaziam características de rocha em contraposição aos níveis do topo rochoso até então estabelecidas pelos *logs* de sondagens preliminares. Com a escavação da trincheira propriamente dita, foi possível observar com clareza o topo rochoso existente, possibilitando a assertividade nos resultados, com base na ABGE Nº 109 (2024) e ABGE (2021).

Segundo autores, a divergência de cotas encontradas entre as sondagens e a visualização em campo está relacionada com o próprio processo de execução das sondagens, pois os filitos possuem diferentes resistências conforme o plano de clivagem ardosiana, face ao ângulo de penetração do amostrador em relação à superfície, bem como a perda de resistência por percussão com lavagem, induzindo a classificação do topo rochoso como material inconsolidado.

É perfeitamente visível nas paredes/faces das escavações a presença dos filitos do Grupo Cuiabá, seja pelas estruturas primárias da rocha (foliações e clivagens) e/ou pelas descontinuidades presentes (juntas e fraturas), produzindo desprendimentos em blocos, divergindo de eventos naturais observados em solos residuais.

Se tratando de rocha RAM (Rocha Alterada Mole), são mantidas as características matrizes da rocha mãe, necessitando ainda de processos de intemperização e/ou alterações físico-químicas, para transformar-se em solo residual jovem, diferenciando assim as rochas alteradas dos saprólitos em relação a resistência ao golpe do martelo de geólogo e pressão dos dedos.

A determinação do topo rochoso numa obra é fundamental pois define o tipo de escavabilidade do material, e por consequência o impacto financeiro, uma vez que é ponto crucial para a remuneração das escavações, determinação dos consumos de concreto nos processos de injeção e manutenção das faces de escavação devido ao alívio de tensões / relaxamento do rocha, bem como do ponto de vista estrutural, para obtenções das resistências do maciço e consequente capacidade de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2021) *Investigação geológico-geotécnicas: guia de boas práticas*. In: MONTICELLI, J. J. (Editor). São Paulo.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2024). Norma ABGE 109/2024: *Descrição e classificação de sondagens.* 1ª ed. São Paulo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) NBR 6484 - Solo — *Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

ISRM (1981) Basic Geotechnical Description for Rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18.

Lacerda Filho *et al.* (2004) Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso: texto explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso. CPRM; SICME-MT. Mato Grosso.

Leão, M. F. (2017) *Comportamento Geomecânico de Frente de Intemperismo em Filito da Região do Quadrilátero Ferrífero.* Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Luz, J. S. *et al.* (1980) *Projeto Coxipó*. DNPM/CPRM. Volume 136 P. (Relatório Final). Goiânia.

Pinho, A.B. (2003) *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência – o flysch do baixo alentejo. 2003. 283f.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia, Universidade de Évora, Évora.

Ribeiro Junior, I. (2022) *Influência da Estrutura Reliquiar no Comportamento Geomecânico de um Perfil de Solo Residual da Baixada Cuiabana*. Tese de Mestrado, Faculdade de Geociências (FAGEO), Universidade Federal de Mato Grosso. Mato Grosso.

Rocha, M. (1977) Alguns problemas relativos à Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência. Memória n°491, LNEC, Lisboa.

Spink, T. W.; Norbury, D. R. (1993) The engineering geological description of weak rocks and overconsolidated soils. The Engineering Geology of Weak Rock. In: 26 Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society, *Anais...* Leeds, United Kingdom.

Taylor, R. K. (1988) Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes. *Quartely Journal Engineering Geology*, 21.

Vaz, L. F. (1996) Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. Solos e Rochas, v.19, nº.2, São Paulo.

Vecchiato, A. B. (1993*) Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Cuiabá – MT (Escala 1:25.000).* Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/4

Comparação entre Métodos de Saturação de Corpos de Prova em Ensaios de Caracterização Física de Rochas Metavulcanoclásticas

Alice Silva Santos
Engenheira Geóloga, Vale, Belo Horizonte, Brasil, alice.ass.santos@gmail.com

Bárbara Emilly Vieira Firmino e Souza
Engenheira Geóloga, Vale, Belo Horizonte, Brasil, e.barbara@yahoo.com

RESUMO: Este estudo compara dois métodos de saturação aplicados em ensaios de caracterização física de rochas metavulcanoclásticas, com foco nos parâmetros de densidade aparente, absorção aparente e porosidade aparente. O primeiro método combina as recomendações da International Society for Rock Mechanics (ISRM) com a norma NBR 15.845-2, enquanto o segundo segue exclusivamente a NBR 15.845-2. No método ISRM + NBR, os corpos de prova foram submetidos à saturação completa por no mínimo 24 horas, podendo chegar a 48 horas conforme a litologia, seguida de secagem em estufa por até 48 horas para garantir a remoção total da água absorvida. Já o método da NBR 15.845-2 adota saturação em três etapas sucessivas, totalizando 48 horas. Os resultados obtidos em sete corpos de prova indicaram variações inferiores a 0,2% na densidade aparente e entre 0,004% e 0,023% para absorção e porosidade aparente, evidenciando que não há diferenças significativas entre os métodos quando a mesma massa natural é utilizada no cálculo. Ambos os procedimentos são consistentes e atendem às normas vigentes, apresentando vantagens específicas conforme a permeabilidade do material. O estudo reforça que a escolha do método deve considerar características petrográficas e o nível de controle desejado no processo de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Saturação, ISRM, NBR 15.845, Densidade Aparente, Porosidade Aparente.

ABSTRACT: This study compares two saturation methods applied in physical characterization tests of metavolcanoclastic rock specimens, focusing on bulk density, apparent absorption, and apparent porosity. The first method combines recommendations from the International Society for Rock Mechanics (ISRM) with the Brazilian standard NBR 15.845-2, while the second follows NBR 15.845-2 exclusively. In the ISRM + NBR approach, specimens were fully saturated for at least 24 hours—extending to 48 hours depending on lithology—followed by oven drying for up to 48 hours to ensure the complete removal of absorbed water. The NBR 15.845-2 method adopts a three-stage saturation procedure totaling 48 hours. Results obtained from seven specimens showed variations below 0.2% in bulk density and between 0.004% and 0.023% for apparent absorption and apparent porosity, indicating no significant differences between methods when the same natural mass is used for calculations. Both procedures comply with technical standards and provide consistent results, each offering specific advantages depending on material permeability. The ISRM + NBR method may accelerate testing depending on lithology, while the stepwise NBR procedure can enhance saturation efficiency by reducing the likelihood of unsaturated micropores. This study supports methodological standardization in rock mechanics laboratories and highlights that method selection should consider petrographic characteristics and the required level of saturation control.

KEYWORDS: Saturation, ISRM, NBR 15.845, Bulk Density, Apparent Porosity.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização física de rochas é um componente fundamental em estudos geotécnicos, geomecânicos e tecnológicos. Parâmetros como densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente influenciam diretamente análises estruturais, estimativas de resistência, comportamento mecânico e interpretações

hidrogeológicas (Goodman, 1989; Fjaer et al., 2008). Por se tratar de propriedades dependentes das massas seca, saturada e hidrostática, sua determinação é sensível ao estado de saturação do corpo de prova (ISRM, 2007).

Nesse contexto, laboratórios enfrentam o desafio de padronizar procedimentos de saturação para garantir reprodutibilidade e comparabilidade entre ensaios. A ISRM (2007) recomenda saturação prolongada, tipicamente entre 24 e 48 horas, com secagem rigorosa para remoção completa de água absorvida. Por outro lado, a NBR 15.845-2 (ABNT, 2019) estabelece um método de saturação em três etapas, concebido para melhorar a eficiência da infiltração e reduzir aprisionamento de ar em poros.

Apesar da ampla utilização dessas metodologias, não há consenso sobre qual procedimento oferece maior precisão para amostras com diferentes texturas e permeabilidades. Além disso, na prática laboratorial, a escolha muitas vezes depende de rotinas internas, disponibilidade de equipamentos, prazos de entrega e características particulares da rocha — fatores que podem provocar divergências entre resultados de diferentes laboratórios.

Dessa forma, investigar se esses procedimentos levam a diferenças significativas nos parâmetros medidos é crucial para aperfeiçoar protocolos e orientar a padronização técnica. Ensaios comparativos, como o desenvolvido neste estudo, contribuem para consolidar boas práticas e para ampliar o entendimento sobre a sensibilidade dos ensaios às condições de saturação (ISRM, 2007; ABNT, 2019).

2 OBJETIVO

O estudo reforça que a escolha do método de saturação não deve ser feita de forma rígida ou automática, mas sim considerando o tipo de rocha analisada e o grau de controle que o laboratório deseja exercer sobre o processo. Em materiais mais compactos ou com menor permeabilidade, pode ser vantajoso adotar um procedimento mais detalhado, como a saturação em etapas prevista na NBR 15.845-2, que tende a reduzir a presença de ar retido nos poros. Já em rochas mais permeáveis ou quando o tempo de ensaio é um fator relevante, o método combinado ISRM + NBR pode ser suficiente, oferecendo maior agilidade sem comprometer a qualidade dos resultados. Assim, a decisão entre os métodos deve levar em conta tanto as características da amostra quanto as necessidades operacionais do ensaio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras

Foram analisados sete corpos de prova de rocha metavulcanoclástica, As amostras utilizadas corresponderam ao material disponível no laboratório no período de execução dos ensaios, não havendo seleção prévia direcionada por critérios litológicos. Apesar disso, a condução dos procedimentos seguiu rigorosamente as prescrições técnicas estabelecidas pelas normas aplicáveis (ABNT, 2019; ISRM, 2007).

3.2 Métodos desenvolvidos

3.2.1 Método A — ISRM + NBR 15.845-2

Saturação completa por ≥ 24 h (podendo chegar a 48 h conforme litologia), seguida de secagem em estufa por até 48 h visando à remoção total da água (ISRM, 2007; ABNT, 2019). A extensão do tempo de secagem foi adotada devido à maior densidade de algumas amostras, mitigando água retida em microporos (Deere & Miller, 1966; Fjaer et al., 2008).

3.2.2 Método B — NBR 15.845-2

Saturação em três etapas:
(i) submersão de 1/3 do corpo por 4 h;
(ii) submersão de 2/3 por 4 h;
(iii) saturação completa por 40 h (ABNT, 2019).
O racional é promover entrada gradual da água, reduzindo aprisionamento de ar e aumentando a eficiência em materiais de baixa permeabilidade (ABNT, 2019; ISRM, 2007).

3.3 Parâmetros determinados e cálculo

Em ambos os métodos, ao término da saturação, foram determinadas a densidade aparente (kg/m³), a absorção aparente (%) e a porosidade aparente (%), conforme fórmulas e orientações estabelecidas por ISRM (2007) e ABNT (2019). Para avaliar diferenças entre os métodos, foram calculadas estatísticas descritivas, intervalos de confiança (95%) e teste t pareado, seguindo recomendações clássicas de análise de dados experimentais em mecânica das rochas (Deere & Miller, 1966; Goodman, 1989).

4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as sete amostras ensaiadas, comparando os valores de densidade aparente, absorção aparente e porosidade aparente obtidos pelos dois métodos de saturação: o procedimento combinado NBR 15.845-2 + ISRM (saturação padrão do laboratório) e o método exclusivo da NBR 15.845-2 (saturação escalonada). Cada amostra foi ensaiada pelos dois métodos, permitindo a comparação direta dos parâmetros físicos.

Tabela 1. Resultados obtidos das sete amostras ensaiadas.

Amostra	**Saturação Padrão (RDEN) - NBR15.845 + ISRM**			**Saturação Norma (NBR 15.845)**		
	Densidade Aparente (kg/m³)	Absorção Aparente	Porosidade Aparente	Densidade Aparente (kg/m³)	Absorção Aparente	Porosidade Aparente
01	2929.988	0.020%	0.020%	2925.146	0.040%	0.040%
02	2943.029	0.064%	0.064%	2941.210	0.041%	0.041%
03	2906.515	0.039%	0.039%	2903.528	0.031%	0.031%
04	2994.498	0.040%	0.040%	2992.734	0.029%	0.029%
05	3049.608	0.026%	0.026%	3045.675	0.037%	0.037%
06	3065.741	0.024%	0.024%	3062.313	0.030%	0.030%
07	2917.265	0.043%	0.043%	2914.947	0.039%	0.039%

Os resultados obtidos para densidade aparente, absorção aparente e porosidade aparente apresentaram diferenças numéricas pequenas entre os dois métodos de saturação. Para densidade aparente, a diferença média entre os métodos foi de 3,013 kg/m³, equivalente a aproximadamente 0,10% do valor médio do material. O intervalo de confiança de 95% para essa diferença situou-se entre 1,96 e 4,07 kg/m³.

No caso da absorção aparente e da porosidade aparente, ambas expressas em porcentagem, as diferenças foram ainda menores. A média das diferenças foi de +0,0013 ponto percentual, com intervalo de confiança variando de –0,0122 a +0,0148 p.p., valores compatíveis com o nível de ruído esperado para esse tipo de ensaio (ISRM, 2007).

A análise estatística indicou $p < 0,001$ para as diferenças de densidade aparente e $p = 0,823$ para absorção e porosidade, o que confirma que somente a densidade apresenta diferença sistemática detectável pelos testes, enquanto os demais parâmetros não apresentam diferença estatística entre os métodos (ABNT, 2019; ISRM, 2007).

Esses resultados são também visíveis no gráfico de boxplots (Figura 1). Nos painéis superiores, observa-se que os valores de densidade obtidos pelo método ISRM+NBR apresentam leve deslocamento para valores maiores em relação ao NBR 15.845-2, enquanto absorção e porosidade mostram sobreposição

praticamente completa entre os métodos. Nos painéis inferiores, os boxplots das diferenças (Δ = ISRM+NBR – NBR) mostram que as diferenças de densidade permanecem acima de zero, ao passo que absorção e porosidade oscilam simetricamente em torno desse valor. Assim, o gráfico evidencia a pequena magnitude das diferenças observadas e a forte coerência entre os dois métodos em todos os parâmetros avaliados.

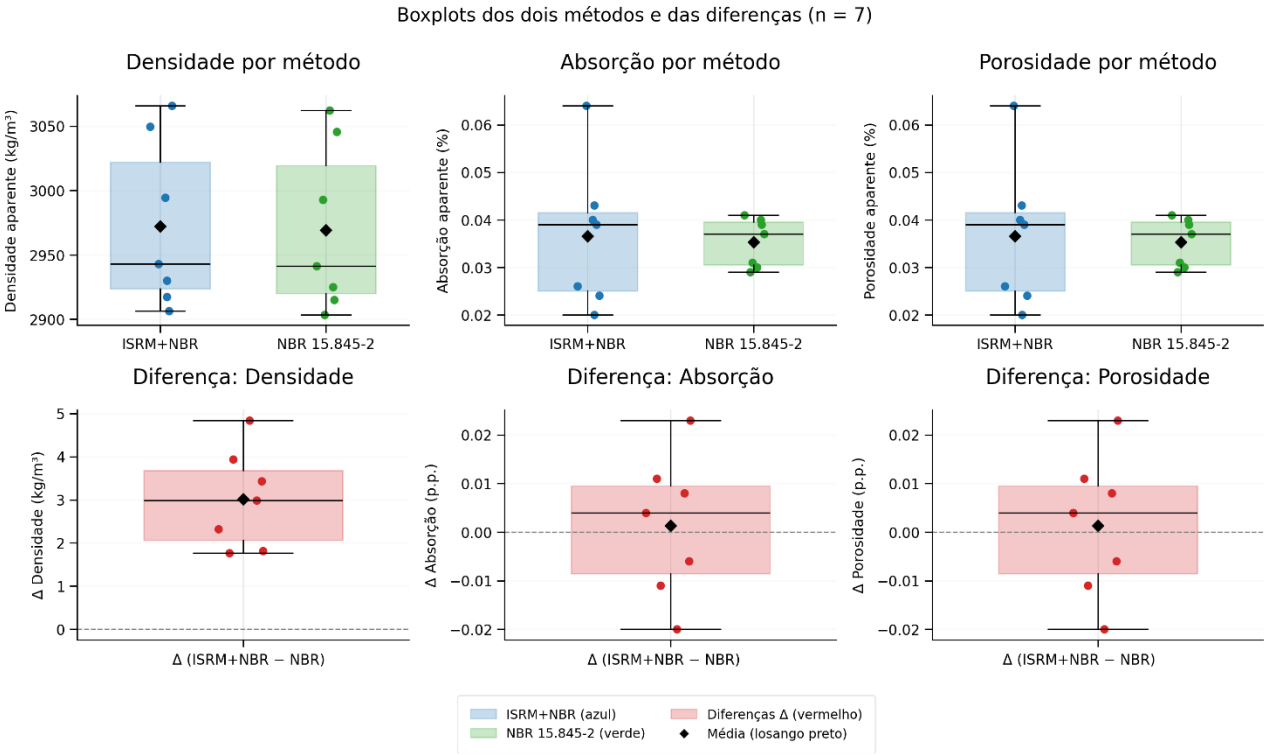


Figura 1: Distribuição dos valores de densidade, absorção e porosidade para os métodos ISRM+NBR e NBR 15.845-2.

5 DISCUSSÃO

Os resultados indicam que os dois métodos de saturação fornecem valores altamente consistentes entre si. A diferença observada na densidade aparente — embora estatisticamente identificável devido à baixa variabilidade interna desse parâmetro — é extremamente pequena e não altera interpretações práticas, corroborando observações clássicas sobre variabilidade de propriedades físicas de rochas (Deere & Miller, 1966; Goodman, 1989).

A proximidade dos resultados de absorção e porosidade sugere que ambos os métodos foram igualmente eficazes em saturar os poros acessíveis da rocha. A variação de apenas milésimos de ponto percentual reforça que qualquer diferença se encontra dentro do ruído experimental esperado para ensaios com água, massa saturada e massa seca (ISRM, 2007).

Do ponto de vista operacional, os dois procedimentos apresentam características complementares. O método ISRM + NBR pode trazer maior agilidade em rotinas laboratoriais, especialmente quando a litologia não apresenta baixa permeabilidade. Por outro lado, o método escalonado da NBR 15.845-2 pode oferecer maior controle da infiltração, reduzindo potenciais bolsões de ar em rochas mais compactas (ABNT, 2019). Assim, a escolha prática do método pode considerar fatores como permeabilidade do material, tempo disponível e padronização interna de cada laboratório.

A convergência entre os métodos demonstra que a saturação, quando conduzida adequadamente, tende a produzir resultados estáveis e reprodutíveis, em consonância com recomendações internacionais sobre caracterização física de rochas (ISRM, 2007; Fjaer et al., 2008).

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que os dois métodos de saturação avaliados — o procedimento combinado ISRM + NBR e o método exclusivo da NBR 15.845-2 — são, na prática, equivalentes para a determinação de densidade aparente, absorção aparente e porosidade aparente em rochas metavulcanoclásticas. Embora o teste estatístico tenha indicado uma diferença sistemática na densidade aparente, essa diferença apresentou magnitude extremamente reduzida, em torno de 0,10%, situando-se muito abaixo de qualquer limiar que impactaria interpretação, classificação ou aplicações geotécnicas. Para absorção e porosidade, as diferenças foram ainda menores e estatisticamente indistinguíveis de zero, reforçando que ambos os procedimentos conduzem à mesma condição de saturação dentro do erro experimental esperado.

Esses achados confirmam que, quando executados adequadamente, os dois métodos atendem plenamente às exigências normativas e produzem resultados confiáveis e reproduzíveis. Assim, a escolha entre um procedimento e outro pode ser orientada por critérios de praticidade, tempo disponível, rotinas internas do laboratório ou particularidades da litologia estudada, sem risco de comprometer a qualidade da caracterização física. De modo geral, o método ISRM + NBR tende a oferecer maior agilidade, enquanto a saturação escalonada da NBR pode ser vantajosa em materiais de menor permeabilidade. Em ambos os casos, os parâmetros obtidos demonstraram robustez e coerência, consolidando a conclusão de que os dois métodos são igualmente adequados para ensaios físicos de rochas dentro do escopo considerado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 158452. Rochas para Revestimento – Determinação das Propriedades Físicas – Parte 2. Rio de Janeiro.

International Society for Rock Mechanics (2007). ASTM D2166: *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties of Rocks.* In: The ISRM Suggested Methods (Blue Book).

Deere, D. U.; Miller, R. P. (1966) *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock.* Illinois: University of Illinois.

Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics. 2. ed. New York: Wiley.*

Fjaer, E.; Holt, R. M.; Horsrud, P.; Raaen, A.; Risnes, R. (2008) *Petroleum Related Rock Mechanics. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.*

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/5

Compartimentação do Estado do Espírito Santo visando a caracterização e classificação do risco geológico

Jaime Mesquita de Souza
Geólogo, Colúvio Consultoria, Vitória, Brasil, coluvio@outlook.com

Luiza Almeida Vaillant
Geóloga, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, luizaavaillant@gmail.com

RESUMO: O estado do Espírito Santo apresenta uma compartimentação geológica e geomorfológica que condiciona o risco em algumas cidades somado a expansão urbana, peculiar aos municípios em franco crescimento econômico e populacional. Geologicamente, o Espírito Santo pode ser dividido em 3 compartimentos distintos: a região litorânea, uma porção central e a região do extremo oeste. Os sedimentos fluviais, marinhos e flúvio-lagunares dominam territorialmente a região litorânea juntamente com o Grupo Barreiras. A porção central tem as unidades geológicas neoproterozóicas e a porção oeste onde ocorrem os terrenos neo e paleoproterozóicos. Em todas as porções, as Suítes Intrusivas Cambrianas ocorrem pulverizadas e centralizam as atenções em locais densamente populosos e com características intrínsecas a ocorrências de movimentos de massa. A compartimentação geomorfológica divide o estado também em três porções. Os Depósitos Sedimentares compõem a faixa litorânea e a Faixa de Dobramentos Remobilizados prevalece na porção sudoeste e central com pouca representação ao norte. Na região noroeste os Maciços Plutônicos compõem a porção de menor representatividade geomorfológica. Ações no âmbito estadual e municipal vêm atuando para o entendimento do risco geológico, porém sem uma informação que se concentre no entendimento da susceptibilidade de cada unidade geológica e oferecendo uma visão regional dos condicionantes do meio físico para entendimento dos processos instabilizadores. O entendimento dos processos geradores de risco dentro de cada unidade geológica e geomorfológica tem por objetivo apresentar uma visão mais técnica e é fundamental para detecção do risco visando uma atuação preventiva.

PALAVRAS-CHAVE: risco geológico, caracterização geomorfológica, Espírito Santo.

ABSTRACT: The state of Espírito Santo presents a geological and geomorphological compartmentalization that conditions the risk in some cities, added to the urban expansion, peculiar to municipalities in strong economic and population growth. Geologically, Espírito Santo can be divided into 3 distinct compartments: the coastal region, a central portion, and the far western region. Fluvial, marine, and fluvio-lagoonal sediments territorially dominate the coastal region along with the Barreiras Group. The central portion has Neoproterozoic geological units, and the western portion where Neo- and Paleoproterozoic terrains occur. In all portions, Cambrian Intrusive Suites occur dispersed and focus attention on densely populated locations with characteristics intrinsic to mass movement occurrences. Geomorphological compartmentalization also divides the state into three portions. Sedimentary deposits comprise the coastal strip, and the Remobilized Fold Belt prevails in the southwestern and central portions, with little representation in the north. In the northwestern region, Plutonic Massifs make up the least geomorphologically representative portion. Actions at the state and municipal levels have been working towards understanding geological risk, but without information that focuses on understanding the susceptibility of each geological unit and offering a regional view of the physical environment's conditioning factors for understanding destabilizing processes. Understanding the risk-generating processes within each geological and geomorphological unit aims to present a more technical view and is fundamental for risk detection, aiming at preventive action.

KEYWORDS: geological risk, geomorphological characterization, geological characterization, Espírito Santo.

1 INTRODUÇÃO

O estado do Espírito Santo experimenta anualmente inúmeros casos de movimentos de massa que através de levantamentos de órgãos municipais, estaduais e federais, determinam um grau de risco e a probabilidade, embasados na informação dos acidentes ocorridos e nos mapeamentos de risco. O conjunto de informações geradas estabelece de maneira objetiva onde os acidentes ocorreram e os mapeamentos determinam os locais com elevada probabilidade de ocorrência de eventos ligados a movimentos de massa. Ambos os atendimentos, Defesa Civil e Mapeamentos de Risco, executam de forma satisfatória os seus objetivos, atendimento à população atingida e ação preventiva contra eventuais acidentes, respetivamente. O foco dos levantamentos de risco são os eventos causados por movimentos de massa, como para inundações e enchentes. Quando se trabalha com inundações e enchentes, ou seja, eventos controlados pela dinâmica fluvial, principalmente, estudam-se eventos que ocorrem além dos domínios municipais, como também por vezes, estaduais. Estes eventos, quando relacionados dentro do âmbito municipal, determinam o risco nas planícies de inundação e quando estas são inteiramente tomadas, assumem uma área que extrapola os domínios fluviais. Os eventos mais catastróficos são aqueles que solapam as margens dos rios tomadas por construções ou por escoamento de água muito rápido, capazes de ceifar vidas e destruir a infraestrutura do entorno.

As ações preventivas de Defesa Civil como o mapeamento de risco necessitam do conhecimento transmitidos dos relatos dos eventos deflagradores e predisponentes dos movimentos de massa, que devem ser embasados pelas características do meio físico, mais exatamente do comportamento dos materiais e das formas que o relevo se caracteriza em cada região do estado do Espírito Santo. Assume-se nesse artigo, que o conhecimento numa escala regional da influência da geologia e geomorfologia é fundamental para que os levantamentos de campo, visando setorizar as áreas de risco e detalhar os processos instabilizadores, forneçam uma informação precisa dos agentes deflagradores de movimentos de massa.

2 OBJETIVOS

O Estado do Espírito Santo apresenta uma compartimentação de suas unidades geológicas e geomorfológicas inerente a distribuição dos principais processos geradores de risco geológico. A detecção dos processos instabilizadores em associação com as características do meio físico, numa escala regional é de suma importância para as ações preventivas, no que tange à realização de mapeamentos, como principal fomentador de informações sobre o risco geológico.

Assim, o principal objetivo desse artigo é apresentar uma proposta de distribuição das unidades geológicas e geomorfológicas, agrupando-as através de suas similaridades e discorrer sobre os principais processos instabilizadores para cada unidade.

Secundariamente, esses processos instabilizadores serão exemplificados com registros já ocorridos, informação essa subsidiada pelos mapeamentos de risco já realizados nos municípios capixabas e relatos obtidos na mídia.

Os eventos de ordem hidrológica determinam que estudos mais apurados sejam realizados para entendimento dos processos geradores de risco, demandando que este conhecimento extrapole o entendimento geológico e geomorfológico que este artigo oferece. Assim, enchentes e inundações e os processos correlatos ao risco por eventos hidrológicos estão excluídos da compartimentação proposta neste artigo.

3 ASPECTOS FÍSICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

3.1 Geologia

Geologicamente, o Brasil encontra-se dividido em Províncias Estruturais definidas por Almeida *et al*. (1981), cada uma com sua peculiaridade quanto à evolução geológica e tipo litológico. O estado do Espírito Santo se apresenta geologicamente, conforme proposto por Hasui (1982), inserido dentro do setor Central da Província Mantiqueira. Pode ser subdividido em três grandes grupos distintos, em idade e litotipos, como: Embasamento Proterozóico, Suítes Intrusivas e Coberturas Cenozóicas (Figura 1).

Dentro do contexto geocronológico Bizzi *et al*. (2003) inclui as rochas mais antigas da Província da Mantiqueira, no seu setor Central, na idade neoproterozóica, perfazendo, numa visão geral, o embasamento geológico no estado do Espírito Santo. Os litotipos mais expressivos são os gnaisses, xistos, quartzitos e rochas metamórficas de filiação básica

As rochas ígneas, que representam o Cambriano no Espírito Santo e são observadas na capital do estado e na sua região metropolitana, pertencem a Suíte Intrusiva Espírito Santo, que juntamente com as Suítes Intrusivas Aimorés, Santa Angélica, que representam num contexto tectônico, a Granitogênese do Orógeno Araçuaí. As Suítes Intrusivas ocorrem intrudidas no Complexo Paraíba do Sul desde a divisa com o estado do Rio de Janeiro até a cidade de Vitória, apresenta formas circulares ou ligeiramente alongadas e bandamento incipiente, conforme orientação imposta pelo Ciclo Brasiliano. O seu principal tipo litológico, o granito, pode ser facilmente identificado na porção insular da cidade de Vitória, através do maciço central e dos morros isolados. Estes maciços apresentam duas direções de fraturas: NE/SW e NW/SE, que segundo Salaroli (2003) as fraturas NW/SE estão associadas à ação do intemperismo. Estas fraturas permitiram maior dissecação do relevo, compartimentando o maciço rochoso, gerando os trechos mais abatidos e vales mais profundos. O aprofundamento das linhas de fratura NE/SW, também associadas à ação do intemperismo, tem menor influência na morfologia, formando pequenos talvegues.

As Coberturas Cenozóicas são representadas no estado do Espírito Santo pelo Grupo Barreiras e os sedimentos inconsolidados, que geralmente ocupam generosas porções litorâneas.

O Grupo Barreiras (Amador & Dias, 1978; Machado Filho *et al*., 1983) representa o contexto geológico de idade Terciária no Espírito Santo. Este Grupo ocorre ao longo do litoral capixaba em uma faixa variando de 10 km, no sul do estado, a até 90 km, na divisa com o estado da Bahia, ao norte. Amador (1982) reconheceu duas fases de sedimentação de um mesmo material de origem continental. Na primeira fase, o feldspato é praticamente nulo e quando encontrado já se apresenta intemperizado na forma de caulinita. A segunda fase é representada por sedimentos imaturos, com um volume de feldspato de até 40%. Os sedimentos arenosos são cimentados por material ferruginoso. Segundo Féboli (1993), a natureza do material que constitui o Grupo Barreiras evidencia um transporte curto e mais ou menos rápido, por meio de correntes incapazes de selecionar material.

Os sedimentos inconsolidados encontrados na faixa litorânea e nas planícies de inundação dos rios representam o Quaternário no estado do Espírito Santo. Esses sedimentos são resultado da intemperização de rochas mais antigas que se depositam nas praias e ao longo dos rios. Por vezes, os sedimentos de origem marinha retornaram ao continente através de eventos de transgressão. Esses eventos elevaram o nível do mar permitindo a deposição de sedimentos de origem marinha em até 12 km de distância da linha de praia atual.

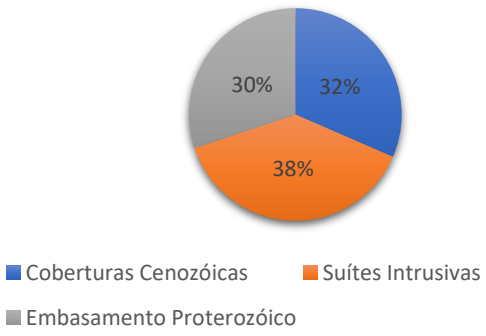


Figura 1. Percentual de ocupação das principais unidades geológicas no estado do Espírito Santo.

3.2 Geomorfologia

A análise das formas do relevo produz um importante arcabouço de informações que caracterizam o meio físico. As características do ambiente natural, mesmo numa escala macro, apresenta subsídios importantes para uma ocupação racional do território, como para o desenvolvimento das cidades, apontando os locais mais propensos a ocupação, como também apresentando as limitações de alguns espaços, quanto ao seu desenvolvimento. Segundo o mapeamento geomorfológico elaborado pelo IJSN (2012):

O estudo apresentado também pode servir de fundamento para o mapeamento de áreas de risco, onde tanto o relevo fortemente acidentado quanto o demasiadamente plano ocasionalmente indicam áreas que estão respectivamente mais propicias aos deslizamentos de encostas e sujeitas à inundação em eventos extremos. Esse ainda possui um viés social, visto que influencia na alocação de unidades habitacionais, reduzindo as perdas que acontecem com os eventos anteriormente citados.

O mesmo estudo supracitado apresenta a subdivisão do Estado do Espírito Santo em três unidades morfoestruturais: Depósitos Sedimentares, Faixa de Dobramentos Remobilizados e Maciços Plutônicos (Figura 2).

A Faixa de Dobramentos Remobilizados caracteriza-se pelas evidências de movimentos crustais, com marcas de falhas, deslocamentos de blocos e falhamentos transversos, impondo nítido controle estrutural sobre a morfologia atual.

Por sua vez, a unidade Maciços Plutônicos destaca-se pela ocorrência de grandes massas intrusivas predominante mente ácidas de idades diferentes, correspondentes a suítes intrudidas em rochas proterozóicas de litoestruturas variáveis.

Representado pelo Grupo Barreiras e os ambientes costeiros e nas cercanias dos principais rios, depositados durante a era Cenozoica a unidade Depósitos Sedimentares caracteriza-se pela ocorrência de sedimentos arenosos e argilo-arenosos com níveis de cascalho.

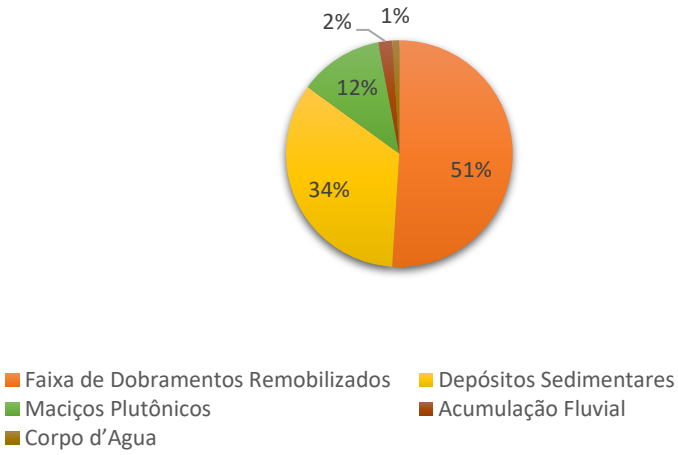


Figura 2. Percentual de ocupação das morfoestruturas no estado do Espírito Santo.

4 ANÁLISE DOS AGENTES DEFLAGRADORES DE MOVIMENTO DE MASSA

Segundo Guidicini & Nieble (1983) os agentes deflagradores de movimentos de massa são divididos entre agentes predisponentes e agentes efetivos. Os agentes predisponentes são intrínsecos ao meio físico, reunindo o conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais. Os agentes responsáveis pela deflagração do movimento de massa são nomeados como efetivos. Esses são divididos em preparatórios e imediatos. As chuvas intensas e prolongadas, os processos erosivos e ação antrópica são os principais agentes imediatos. Dentre os agentes preparatórios mais importantes o regime pluviométrico e a consequente oscilação do nível do lençol freático assumem um papel relevante, quando se trata de movimentos de massa.

Movimento de massa foi definido por Patton & Hendron Jr. (1974) *apud* Souza (2012) como *"*o termo usado para descrever os processos de encostas pelos quais movimentos descendentes de solos e rochas ocorrem induzidos pelo campo de tensão gravitacional*"*. A classificação dos movimentos de massa proposta por Varnes (1978) possui grande aceitação dentre os profissionais atuantes na área de risco geológico e é adotada pela Associação Internacional de Geologia de Engenharia – IAEG (Parizzi, 2004). A Tabela 1 apresenta a classificação adotada nesse artigo para descrever os movimentos de massa no âmbito das unidades geológicas e geomorfológicas no estado do Espírito Santo.

Tabela 1. Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).

Tipo de movimento			Substrato Rochoso	Tipo de material Solos (Engenharia) Predominantemente grosso	Predominantemente fino
Escorregamentos	Quedas Tombamentos		Rocha	Detritos	Terra
	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha Blocos rochosos	Abatimento de detritos Blocos de detritos	Abatimento de terra Blocos de terra
	Translacional	Muitas unidades	Rocha	Detritos	Terra
	Expansões laterais		Rocha	Detritos	Terra
	Corridas/Escoamentos		Rocha (rastejo profundo)	Detritos (rastejo de solo)	Terra (rastejo de solo)
	Complexos		Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos		

5 ASSOCIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MEIO FÍSICO COM OS PROCESSOS INSTABILIZADORES

Quando se observa a subdivisão apresentada, tanto para as unidades geológicas, como para as unidades Morfoestruturais, obtém-se duas faixas representando as Coberturas Cenozóicas e o Embasamento, com as Suítes Intrusivas distribuídas em todo o estado.

5.1 Associação entre Embasamento Proterozóico e a Faixa de Dobramentos Remobilizados

Os solos que constituem os perfis de intemperismo proveniente das rochas proterozóicas são maduros e possuem granulometrias diversas, predominando os solos de comportamento coesivo. O mecanismo instabilizador característico são os escorregamentos rotacionais, caracterizados por horizontes de solo espessos e homogêneos. Por vezes, solos provenientes de rochas gnáissicas e suas afiliações ou rochas com bandamento incipiente ou xistosidade, produzem perfis de solo jovem ou saprólito com estruturas reliquiares que tendem a produzir escorregamentos translacionais, a partir dos planos produzidos pelas descontinuidades, que produzem estruturas reliquiares desfavoráveis a estabilidade.

5.2 Associação entre Suítes Intrusivas e Maciços Plutônicos

As condições impostas ao relevo devido as características morfoestruturais tem relação direta com movimentos de massa ocorridos na região metropolitana do Espírito Santo e algumas cidades no interior do estado. Souza *et. al.* (2004) descreveu escorregamentos durante intensas chuvas em janeiro de 2004 na capital, associando as características morfoestruturais inerentes as Suítes Intrusivas, mais precisamente a Suíte Espírito Santo. Em linhas gerais, os escorregamentos ocorridos nos domínios das Suítes Intrusivas apresentam talvegues delineados por descontinuidades de direções NW/SE NE/SW, característicos do lineamento estrutural Vitória-Ecoporanga e da Faixa Ribeira, respectivamente. Esse *trends* estruturais são os causadores da fragmentação e formação de blocos centimétricos e métricos que preenchem os talvegues. Dentro de um quadro evolutivo natural do relevo, esses mesmos blocos, através dos processos intempéricos, formam delgadas camadas de solo sobre o substrato rochoso, se juntando aos blocos rochosos, perfazendo os característicos Depósitos de Tálus.

5.3 Associação entre Coberturas Cenozóicas e Depósitos Sedimentares

As Coberturas Cenozóicas apresentam um relevo plano, constituído por diversas granulometrias de sedimentos inconsolidados geralmente saturados. Podem constituir um risco hidrológico pois são áreas susceptíveis a inundações e solapamentos. O relevo caracterizado pelo Grupo Barreiras apresenta-se com encostas naturais, representado pelos Tabuleiros Costeiros, com inclinações predominantemente inferiores a 30° ora com a exposição de horizontes mais susceptíveis a processos erosivos, ora com horizontes com comportamento coesivo, representando as unidades inferior e superior, segundo Amador (1982). A exposição da unidade inferior tende a gerar processos erosivos que culminam no descalçamento da encosta gerando escorregamentos rotacionais e por vezes quedas de blocos, em função da unidade superior mostrar uma coesão verdadeira devido a cimentação por óxido de ferro dos sedimentos (Souza, 2012). Quando horizontes não coesivos são expostos, seja por escavações manuais ou mecanizadas ou por processos erosivos atuantes continuamente, o maciço fica propenso a movimentos de massa com grande poder destrutivo.

6 CONCLUSÕES

É impossível desvincular as ocorrências de movimentos de massa da ação antrópica, principalmente quando se trata das grandes cidades do estado ou dos seus municípios mais populosos. A ação antrópica pode ser um fator efetivo decisivo num escorregamento cujo talude foi escavado num ângulo crítico para a sua estabilidade, a ocorrência de vazamentos em tubulação de água e esgoto saturaram o solo, a retirada de vegetação da encosta e outras mais ações provenientes da ocupação humana. A apresentação de um padrão explicitado na Tabela 2 mostra tão somente as características do meio físico completamente desvinculadas da ação humana, enfatizando tão somente as características intrínsecas as encostas naturais.

Em geral, a morfoestrutura que integra a Faixa de Dobramentos Remobilizados tem os seus mecanismos de instabilização potencializados pelas modificações impostas para a ocupação humana. Assim, os fatores antrópicos são os principais geradores de risco quando se trata das áreas cobertas pelo Embasamento Proterozóico. Os cortes para a construção de moradias e eventualmente estradas vicinais, tendem a acelerar os processos erosivos, pois em geral não disciplinam as águas servidas e/ou pluviais. Por sua vez, a evolução dos processos erosivos determina o surgimento de feições de instabilidade, culminando em geral em escorregamentos rotacionais.

Tabela 2. Relação entre o Meio Físico e os Processos Instabilizadores.

Unidade Geológica	Unidade Morfoestrutural	Processo Instabilizador Predominante	Material Predominante
Embasamento Proterozóico	Faixa de Dobramentos Remobilizados	Escorregamento Rotacional Escorregamento Translacional	Solo
Suítes Intrusivas	Maciços Plutônicos	Escorregamento Translacional Tombamento Queda	Solo e Rocha Rocha Rocha
Coberturas Cenozóicas	Depósitos Sedimentares	Escorregamento Rotacional	Solo

Apesar da estruturação do relevo ser o agente potencializador de movimentos de massa, o fator antrópico também deve ser discutido. A retirada de vegetação que cobre o delgado horizonte de solo facilita a percolação de água até o maciço rochoso tornando um importante agente potencializador de escorregamentos planares. Em geral, a Unidade Suítes Intrusivas é a que menos oferece margem para que ações antrópicas tenham uma

ação eficaz e decisiva para a ocorrência de movimentos de massa, pois a formação de depósito de Tálus ou quedas e tombamentos de blocos são processos governados pela estruturação do relevo. O escorregamento ocorrido no Morro dos Macacos ilustra a afirmação de pouca relevância nas modificações antrópicas para aceleração de processos erosivos ou uma ação direta sobre o maciço rochoso fraturado (Figuras 3 e 4).

O Grupo Barreiras apresenta problemas ligados a ocupação desordenada, como também em áreas litorâneas, onde os processos erosivos marinhos atuam fortemente. No litoral sul, no município de Guarapari, as margens da ES-060, os processos erosivos atingiram a mencionada rodovia estadual.

O estabelecimento de uma relação entre as unidades geológicas e geomorfológicas com os mecanismos instabilizadores pode ser extrapolado para regiões onde existem características comuns do meio físico apresentadas nesse artigo. É importante ter o devido cuidado na aplicação da Tabela 1 principalmente quando se trata de características estruturais numa escala de detalhe, que pode eventualmente condicionar a situações não citadas.

O reconhecimento das feições e características descritas nesse artigo contribui para um melhor entendimento dos fatores de riscos que são características naturais do meio físico. Deve-se levar em conta que apesar de todas as modificações no relevo impostas pela ocupação humana, as características originais e evolução natural do relevo possui um caráter decisivo e extremamente eficaz quando se trata do entendimento do fenômeno e da indicação da solução para eliminação do risco.

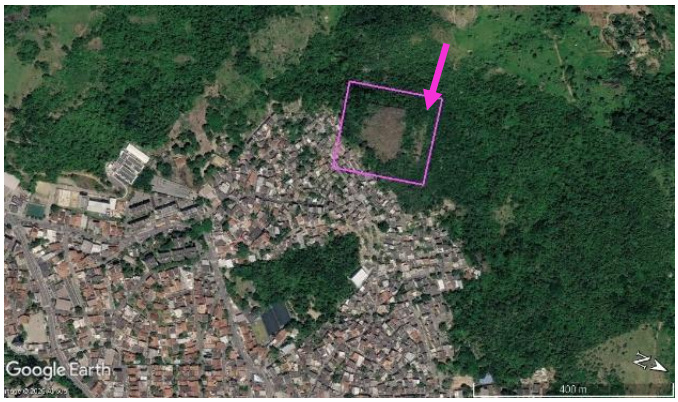


Figura 3. Vista área do Morro do Macaco, na capital do Espírito Santo. Em destaque talvegue preenchido por vegetação. Fonte: Google Earth modificado.

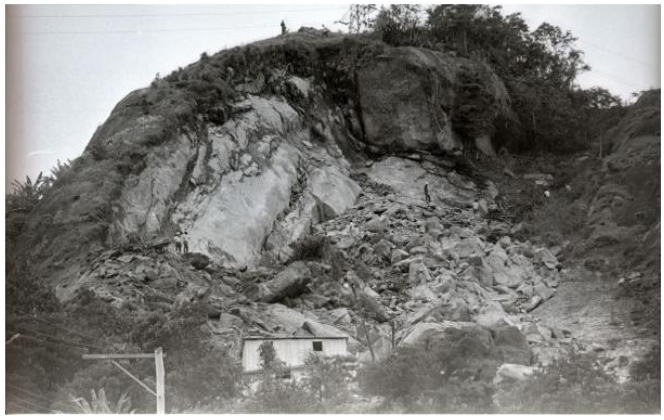


Figura 4. Vista frontal do maciço que se desprenderam blocos gerando escorregamento que vitimaram 40 pessoas em 15 de janeiro de 1985 no Morro do Macaco. Fonte: A Gazeta (2025).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A Gazeta. (2025). Morro do Macaco em Vitória: recontar a tragédia para que ela não se repita. Disponível em: < https://www.agazeta.com.br/editorial/morro-do-macaco-em-vitoria-recontar-a-tragedia-para-que-ela-nao-se-repita-0125>. Acesso em: 03 mar. 2026.

Almeida, F. F. M, Hasui, Y, Brito Neves, B. B, Fuck, R. A. Brazilian Structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews*, Amsterdam, v.17, p.1-29, 1981.

Amador, E.S., Dias, G.T. Considerações preliminares sobre depósitos do Terciário Superior do norte do Espírito Santo. *Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 50, n.1, p.121-132, 1978.

Amador, E.S. Depósitos relacionados à unidade inferior do Grupo Barreiras no Estado do Espírito Santo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, 1982, Salvador, *Anais*... Salvador: SBG, 1982. v. 4, 1982, P. 01-61.

Bizzi, L.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (Ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. Escala 1:2.500.000. Sistema de Informações Geográficas - SIG.

Féboli, W. L. (Org). Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Piúma. Folha SF.24-V-A-VI. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília: DNPM/CPRM, 1993. 114p.

Guidicini, G., Nieble, C.M 1983. Estabilidade de Taludes naturais e de Escavação. São Paulo, Edgard Blücher Ltda & Universidade de São Paulo, 212p.

Hasui, Y. The Mantiqueira Province: Archean Structure and Proterozoic Evolution. In: INTERNATIONAL Symposium on Archean and Proterozoic Geologic Evolution and Metallogenesis, 1, 1982, Salvador, Anais... Salvador: RBG, 1982. V.12, P. 167-171.

Instituto Jones dos Santos Neves Mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo. Vitória, ES, 2012. 19f.: il. (Nota técnica, 28)

Machado Filho, L., Ribeiro, M.W., Gonzales, S.R., Schemini, C.A., Santo neto, A., Palmeira, R.C.B., Pires, J.L., Teixeira, W., Castro, H.E. Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL, Folhas SF-23/24 - Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983. v.32, p. 29-304.

Parizzi, M. G. *Condicionantes e Mecanismos de ruptura de taludes na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG*. 2004. 213 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) – Departamento de Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Patton, F.D.; Hendron Junior, A.J. General report on Mass Movements. In: International Congress of the IAEG, 2th, 1974, São Paulo. Proc…São Paulo: ABGE. v.2, p. 1-57.

Salaroli, I. S. *Movimentos de Massa no Município de Vitória-ES: Inventário, Caracterização e indicativos de um Modelo Comportamental*. 2003. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

Souza, J. M.; Temoteo, J.P.S.; Castro Junior, R. M; Gomes, E.S. Avaliação da Geologia Estrutural como Agente Predisponente a Movimentos de Massa no Município de Vitória/ES. In: 42º Congresso Brasileiro de Geologia, 2004, Araxá. Anais do 42º Congresso Brasileiro de Geologia, 2004.

Souza, J.M. (2012). *Abordagem qualitativa e quantitativa de encostas urbanas aplicada a dois taludes no município de Vitória*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 214 p.

Varnes, D.J. (1978), “Slope Movement and Types and processes”. In: Schuster, R.L. e Krizek, R.J. (eds), Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington DC, 11-33pp.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/6

Considerações sobre a Análise do Risco Sísmico em Projetos de Aerogeradores *Offshore* na Plataforma Continental NE do Brasil

Alexandre da Costa Pereira
EIES MGI, Docente, IFRN, Natal/RN, Brasil, alexandre.pereira@ifrn.edu.br

Alessander C. M. Kormann
Docente, UFPR, Curitiba/RN, Brasil, alessander.kormann@fugro.com

Aderson Farias do Nascimento
Docente, UFRN, Natal/RN, Brasil, aderson.nascimento@ufrn.br

José Augusto Silva da Fonsêca
Professor assistente, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Poland, jfonsec@igf.edu.pl

RESUMO: O estudo investiga os desafios geológicos associados aos projetos de parques eólicos marinhos ao longo da costa nordeste brasileira, contemplando a revisão da literatura e mapeamentos que abordam a ameaça sísmica no NE brasileiro, com o objetivo de aplicação na análise de riscos geológicos e na definição de práticas para investigações geológicas, geofísicas e geotécnicas. O trabalho busca ainda consolidar um entendimento amplo sobre a temática do risco sísmico, propondo mapas preliminares para apoiar o planejamento de parques eólicos marinhos, auxiliando na identificação de potenciais áreas de interesse, de riscos associados e de recomendações para planos de investigação geológico-geotécnica, visando contribuir tecnicamente para a viabilidade dos projetos. Considera-se que os resultados do trabalho possam agregar critérios geológicos e geotécnicos para subsidiar no estabelecimento de critérios técnicos, ambientais, sociais e econômicos para identificação de áreas mais aptas para instalação de projetos de geração eólica *offshore*, consistindo os conhecimentos sobre o risco sísmico de projetos de fundações de aerogeradores *offshore* elemento com potencial relevante para contribuir com a regulamentação desde a definição de critérios para a seleção de áreas, segundo abordagem territorial na forma de zoneamento do risco geológico e geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Risco Sísmico, Ameaça Sísmica, Aerogeradores Offshore.

ABSTRACT: The study investigates the geological challenges associated with offshore wind farm projects along the northeastern coast of Brazil, includes a literature review, preliminary seismic hazard mapping of the Northeast Brazilian Region for application in geological risk analysis, and practices for geological, geophysical, and geotechnical investigations. The work also seeks to consolidate a comprehensive understanding of seismic risk approach and propose preliminary maps to support the planning of offshore wind farms, assisting in the identification of potential areas of interest, associated risks, and recommendations for geological-geotechnical investigation plans, aiming to contribute technically to the feasibility of the projects. It is considered that the results of the work can add geological and geotechnical criteria to support the establishment of technical, environmental, social and economic criteria for identifying the most suitable areas for the installation of offshore wind power generation projects, with knowledge about the seismic risk of offshore wind turbine foundation projects being a relevant element to contribute to regulation, from the definition of criteria for the selection of areas, according to a territorial approach in the form of geological and geotechnical risk zoning.

KEYWORDS: Seismic Risk, Seismic Hazard, Offshore Wind Turbines.

1 INTRODUÇÃO

O campo de estudo da geodinâmica e geofísica aplicadas à geotecnia é uma fronteira aberta à investigação associada a projetos de infraestrutura, sobretudo em obras em ambiente offshore, onde a geologia costeira e marinha implica desafios notáveis para a engenharia. Especificamente, a geologia da região Nordeste brasileira é caracterizada por uma diversidade de estruturas e de aporte de sedimentos carbonáticos, localizadas em áreas com registros de sismos.

Este trabalho visa explorar os temas da ameaça e do risco sísmicos em áreas offshore, bem como os principais riscos sísmicos e geológicos associados. A compreensão dos processos sedimentares e tectônicos que moldam a costa brasileira é fundamental para a implementação de políticas eficazes de gestão costeira e para o planejamento de projetos de infraestrutura *offshore*, como é o caso da exploração da energia eólica na plataforma continental do Nordeste brasileiro.

2 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho compreende levantamentos de referências bibliográficas relacionadas com o estado da arte na área da ameaça sísmica, do risco sísmico e do geotécnico, associados a áreas na plataforma continental brasileira avaliadas para a implantação de parques eólicos marinhos, direcionando-se o estudo a desafios geológicos da costa brasileira.

Para a determinação do valor para o Fator de Segurança frente à liquefação (Fs_{liq}), considera-se a razão entre CSR (razão de tensão cíclica induzida) e CRR (razão de resistência cíclica), representando o primeiro parâmetro a tensão cisalhante média provocada pelo sismo, conforme proposto por Seed e Idriss (1971), sendo o divisor correspondente à razão de resistência cíclica, que representa a capacidade do solo em resistir à liquefação, geralmente obtido mediante correlações empíricas a partir de resultados de ensaios de campo (SPT, CPT,...) ou da velocidade de ondas cisalhantes (Vs), conforme equações 1 e 2 apresentadas a seguir:

$$FS_{liq} = CRR / CSR \qquad \text{Equação 1}$$

e

$$CSR = 0{,}65.\ (a_{máx} / g).(\sigma_v / \sigma'_v).r_d \qquad \text{Equação 2}$$

onde:

$a_{máx}$: aceleração máxima na superfície do terreno (PGA)
g : aceleração da gravidade
σ_v : tensão vertical total na profundidade de interesse
σ'_v : tensão vertical efetiva na profundidade de interesse
r_d : fator de redução de tensão (ou coeficiente de flexibilidade)

Para a determinação dos valores para $a_{máx}$ para a região de estudo (plataforma continental NE brasileira), recorreu-se a dados sobre a sismicidade na área de estudo levantados no LabSis UFRN.

O estudo busca ainda consolidar um entendimento amplo sobre os materiais geológicos costeiros presentes no Nordeste do Brasil, revisando-se criticamente os mapeamentos existentes, reinterpretando-se as informações disponíveis e propondo-se mapas preliminares para apoiar o planejamento de parques eólicos marinhos, auxiliando na identificação de potenciais áreas de interesse, de riscos associados e de recomendações para planos de investigação geológico-geotécnica.

3 SOBRE O RISCO DE LIQUEFAÇÃO DE SOLOS DE FUNDAÇÃO PARA AEROGERADORES OFFSHORE

Interessante destacar o trabalho “Seismic Design of Offshore Wind Turbines: Good, Bad and Unknowns”, também com a participação do pesquisador Bhattacharya, que aborda questões relevantes segundo a abordagem crítica da temática do projeto sísmico de aerogeradores offshore, incluindo questões relacionadas à eficiência e ao rendimento das turbinas, além da própria dinâmica inerente ao mecanismo das pás e das turbinas.

Convém que se dediquem inicialmente algumas considerações a respeito da terminologia e alguns conceitos fundamentais sobre o risco sísmico e como diferenciá-lo da ameaça sísmica (ou perigo sísmico). Conforme Fonsêca (2024), o conceito de ameaça sísmica difere do conceito de risco sísmico, indicando ser errôneo o uso de forma generalizada (Reiter, 1991; Kijko, 2011). Comenta, ainda, que "ameaça sísmica está associada a um fenômeno físico resultante de um terremoto, por exemplo, vibrações do solo, liquefação do solo ou falha na superfície", asseverando também que risco sísmico "descreve as chances de efeitos indesejados, quando expostos a uma ameaça sísmica, sobre vidas humanas, por exemplo, danos a edifícios, perdas econômicas e sociais e impactos ambientais".

Ambas as abordagens, portanto, devem ser associadas à causa e ao efeito, respectivamente, relação esta ponderada por outros fatores. Assim, a caracterização da ameaça sísmica, quando combinada à vulnerabilidade e à exposição de estruturas civis, constitui um insumo essencial para a estimativa do risco sísmico (Wang, 2009; *apud* Fonseca, 2024).

Sobre o tema do estudo do efeito sísmico e da consideração dos esforços em projetos de aerogeradores *offshore*, conforme Bhattacharya *et al.* (2021), os parques eólicos *offshore* de grande escala são infraestruturas relativamente novas e frequentemente são implantados em regiões propensas a terremotos. Essas estruturas, além das cargas ambientais variáveis de vento e ondas, também podem estar sujeitas a riscos de terremotos em zonas sísmicas. As ameaças que podem ocorrer em parques eólicos *offshore* podem decorrer de deslocamento de falhas, vibrações do solo decorrentes de tremores sísmicos, liquefação subterrânea, deslizamentos de terra submarinos, tsunami e uma combinação dos mesmos. Os procedimentos para o projeto sísmico de estruturas de aerogeradores OWTs não são explicitamente mencionados nos códigos de prática vigentes.

Estudos sedimentológicos mostram que a plataforma continental NE apresenta-se constituída por areias siliciclásticas rasas (próximo à costa) com transição para areias carbonáticas offshore e lamas localizadas em desembocaduras e canais. Além disso, plataformas continentais têm areia em águas rasas agitadas e sedimentos mais finos em maiores profundidades.

Em condições normais, um sismo de magnitude 2,5 Mw na plataforma continental do Nordeste brasileiro tem probabilidade muito baixa de provocar liquefação generalizada em fundações *offshore* de aerogeradores. Contudo, em situações geotécnicas extremamente desfavoráveis, liquefação localizada ou degradação cíclica parcial do solo pode ocorrer. A avaliação depende principalmente dos seguintes fatores: aceleração sísmica efetiva no leito marinho (PGA), distância hipocentral, frequência do evento, duração do carregamento, estado de compacidade do solo e tipo de sedimento *offshore*. Entretanto, mesmo um sismo com magnitude baixa pode produzir efeitos relevantes se coexistirem características como a presença de areias carbonáticas extremamente fofas, geração rápida de poropressão, estrutura metaestável dos solos, presença de solos já degradados e em paleocanais sedimentares.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O RISCO SÍSMICO PARA PROJETOS DE FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES *OFFSHORE*

A fundação ou estrutura de suporte para uma torre eólica marítima é definida como uma estrutura que é possível projetar de variadas formas e executar de diferentes maneiras, em que, em seu projeto, são levadas em consideração as condições específicas da área na qual será montada a turbina eólica, assim como as vantagens e desvantagens de cada tipo de fundação a ser implementada.

Mesmo que o risco seja mínimo, especialistas ressaltam a importância de monitorar e planejar. A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), por exemplo, conta com o Laboratório Sismológico (LabSis) que monitora a atividade sísmica na região. Objetivando-se coletar dados sobre a sismicidade na área de estudo, foram levantadas no LabSis UFRN as ocorrências de sismos no período de 11/03/2011 a 10/05/2025, tendo sido utilizados dados do boletim sísmico, espacializados no ambiente QGIS.

A sismicidade do Nordeste do Brasil concentra-se, em sua maioria, relativamente próxima à costa, com profundidades rasas e magnitudes moderadas frequentemente registradas. Registre-se que o evento de maior magnitude ocorreu em 20/11/1980, com magnitude de 5,2 mb, próximo ao município de Pacajus, no Ceará. Sismos de magnitude moderada têm sido registrados com efeitos significativos à sociedade, por exemplo, variando desde pequenas rachaduras até colapsos de estruturas fracas. Não obstante, uma notável atividade na porção oceânica tem sido observada, concentrando-se na região nordeste da plataforma continental da margem equatorial brasileira (alguns com magnitude de ~ 4 Mb).

Convém destacar que os registros considerados na amostra compreendem tanto eventos naturais quanto artificiais, constando, na Figura 1, o mapa com eventos com magnitudes entre 1,0 e 5,2 mb, apresentando-se círculos em azul e vermelho para indicar sismicidade histórica e instrumental, respectivamente. Interessante ressaltar que estão em curso no Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN trabalhos de pesquisa compreendendo a atividade sísmica nessa área da Falha Samambaia[1], contemplando, inclusive, a utilização de linhas sísmicas *offshore* e outros experimentos sísmicos.

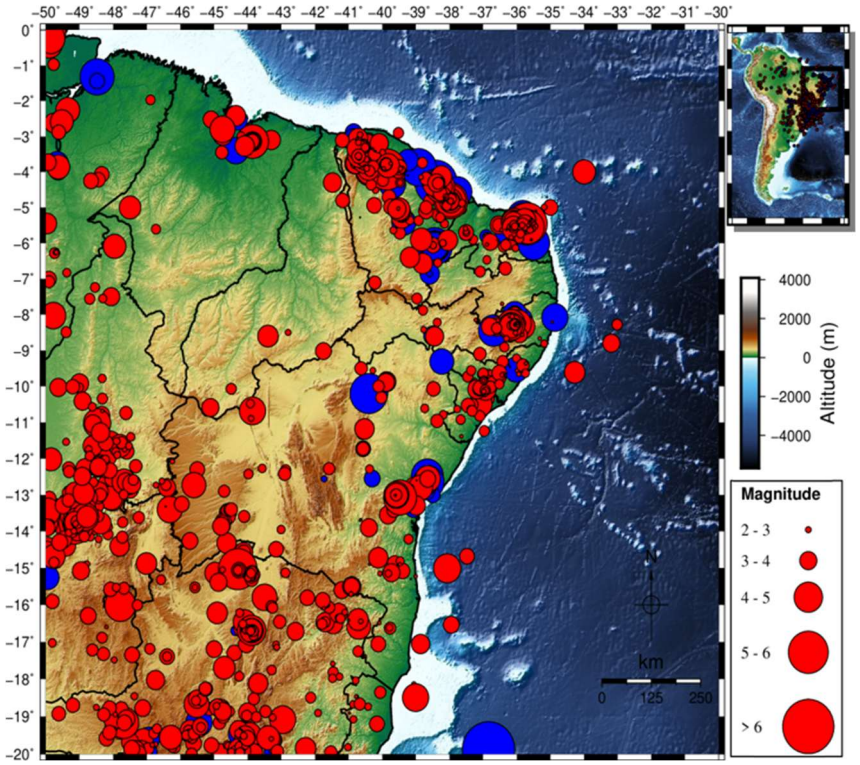


Figura 1. Registros de sismos coletados do catálogo SISBRA no período de 1720 a 2020 (Fonte: https://seiscode.iag.usp.br/CSUSP/sisbra).

Importante destacar, ainda, que para uma melhor acurácia e confiabilidade na obtenção de registros de sismos na região compreendida pela Plataforma Continental, sobretudo na Região Nordeste do Brasil, é necessário que se amplie a rede de sismógrafos na área de estudo, inclusive com a implantação de sensores no leito marinho como, por exemplo, mediante monitoramento por equipamentos com fibra óptica utilizando a tecnologia da DAS (*Distributed Acoustic Senaing*[2]), observando-se que pode ser utilizada fibra óptica instalada para esse fim específico, ou mesmo a existente utilizada para comunicação. Uma segunda opção para a melhoria dos sensores sísmicos na região da Plataforma Continental do NE do Brasil seria a utilização de sensores do tipo *Ocean Bottom Sensors* (OBS), que consistem em sensores fundados no oceano, atuando, basicamente, como estações sismográficas submersas. Uma terceira opção poderia ser a implantação de sensores hidroacústicos, do tipo hidrofones, também fundeados no assoalho oceânico, ou de sensores autônomos, do tipo MERMAIDs (sereias que vagueiam pelo oceano e também registram dados hidroacústicos), que ficarão em operação por até cinco anos, enviando dados via satélite periodicamente.

[1] Samambaia é a maior falha geológica do Brasil. Tem 38 km de comprimento por cerca de 4 km de largura e atravessa os municípios de Parazinho, João Câmara, Poço Branco e Bento Fernandes. Sua profundidade varia entre 1 e 9 km (Fonte: https://www.labsis.ufrn.br/noticias/22632923/falha-de-samambaia-e-detectada-como-epicentro-do-tremor-em-joao-camara#:~:text=Samambaia%20%C3%A9%20a%20maior%20falha,entre%201%20e%209%20km.; acesso em 20 de agosto de 2025a.

[2] Sensoriamento Acústico Distribuído.

Interessante destacar, neste contexto de necessidade de investimentos na rede de sensores sísmicos no ambiente marinho, inclusive na plataforma continental, o Programa RSBR-Mar[3], desenvolvido pelo Observatório Nacional, que consiste em uma missão científica para monitorar terremotos no Atlântico Sul.

Pesquisadores do Observatório Nacional (ON/MCTI) utilizaram o Navio Hidrooceanográfico Faroleiro Almirante Graça Aranha, da Marinha do Brasil, na Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), em Niterói (RJ), para percorrer a margem sudeste do país, entre os estados de São Paulo e Espírito Santo. Durante a expedição, foram instalados oito sismógrafos flutuantes (MERMAIDs) e cinco sismógrafos de fundo oceânico (OBSs) a mais de 2 km de profundidade (Figura 2).

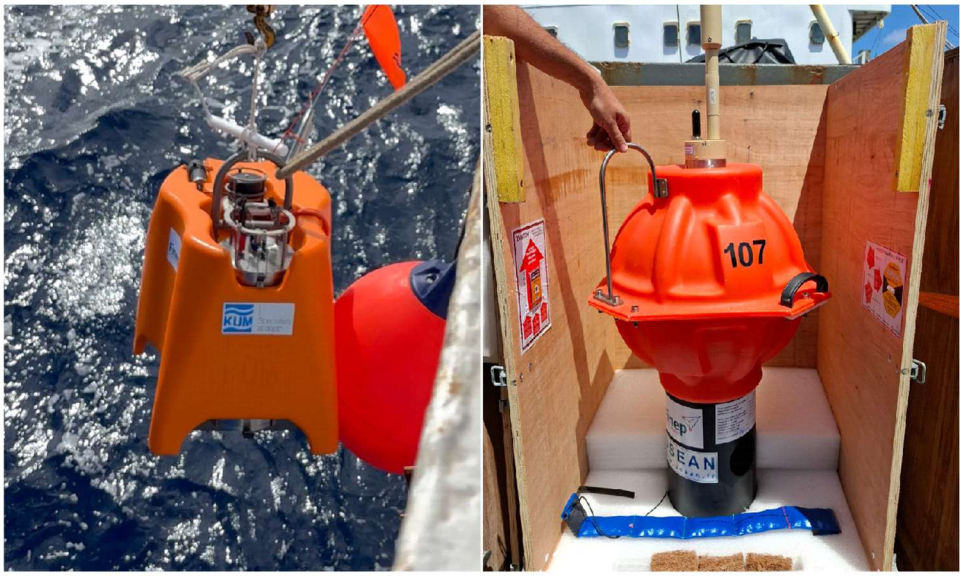


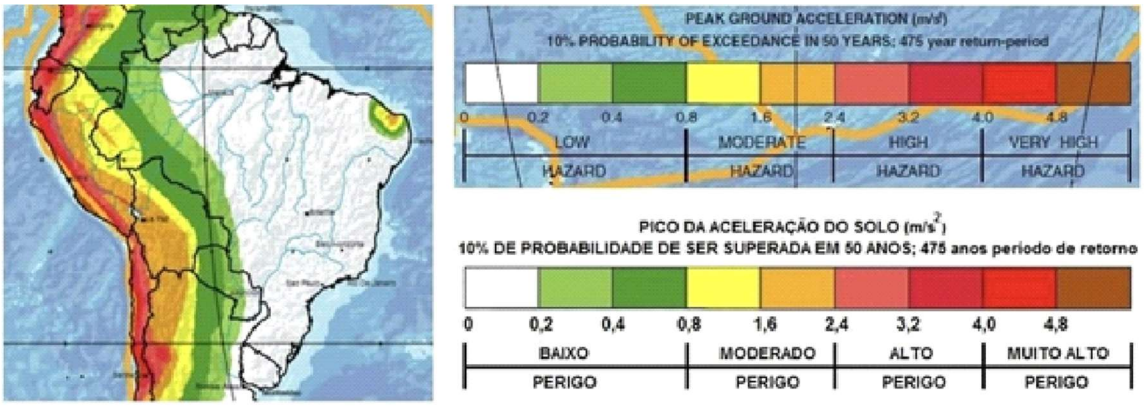
Figura 2. Imagens de sismógrafos utilizados na expansão da Rede Sismográfica Brasileira para o mar (RSBR-Mar): MERMAID à direita e OBS à esquerda (ON, 2025).

Além de ampliar o conhecimento científico, destacam que o RSBR-Mar também tem foco na prevenção de desastres ambientais, registrando a importância da prevenção frente a vazamentos de óleo provocados pelo efeito de terremotos, que representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à economia. Com dados mais precisos sobre a origem dos eventos sísmicos, a iniciativa busca mitigar riscos e subsidiar projetos offshore mais seguros e sustentáveis dentre os quais poder-se-iam destacar projetos para a implantação de parques de aerogeradores offshore e projetos para armazenamento subterrâneo de gás ou para sequestro de carbono (CCS) e armazenamento em formações geológicas no substrato marinho.

Quanto ao programa RSBR-Mar[4], registre-se que consiste em iniciativa inédita do Observatório Nacional (ON), financiada pela FINEP para expandir a Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) para o oceano. O objetivo do programa é monitorar abalos sísmicos na região da Amazônia Azul, aumentando a segurança de plataformas de petróleo, dutos submarino e infraestruturas congêneres situadas no Mar Territorial Brasileiro (Zona Econômica Exclusiva).

Consiste igualmente em fator que deve ser devidamente considerado na análise e priorização de investimentos na ampliação da rede de sensores sísmicos na Plataforma Continental o fato de a área de estudo estar compreendida na região caracterizada como apresentando ameaça sísmica moderada (Figura 3).

[3]Observatório Nacional. Fonte: https://www.gov.br/observatorio/pt-br/assuntos/noticias/rsbr-mar-observatorio-nacional-lidera-missao-cientifica-para-monitorar-terremotos-no-atlantico-sul; acesso em 09/10/2025.
[4] RSBR-Mar. Fonte: RSBR-Mar: Observatório Nacional lidera missão científica para monitorar terremotos no Atlântico Sul — Observatório Nacional, acesso em 09/10/2025.



Zonas Sísmica	Aceleração	Categoria	Métodos aplicáveis para a análise estrutural
0	$a_g = 2{,}5\%\ g$	A	Nenhum requisito de resistência sísmica é exigido
1	$2{,}5\%\ g \leq a_g \leq 5\%\ g$	A	Procedim. simplificado da força sísmica horizontal
2	$5\%\ g \leq a_g \leq 10\%\ g$	B	MFHE ou ME ou MHAT
3	$10\%\ g \leq a_g \leq 15\%\ g$	C	MFHE ou ME ou MHAT
4	$a_g = 15\%\ g$	C	MFHE ou ME ou MHAT

Figura 3. Mapa de perigo sísmico global (GSHAP, 1999; *apud* Nóbrega e Nóbrega, 2016).

Espera-se, portanto, que se dê continuidade às ações do RSBR-Mar, preferencialmente sob a responsabilidade do Laboratório Sismológico da UFRN, tendo em vista a competência territorial e a infraestrutura já disponíveis na Universidade, que monitora a rede de estações sismológicas no Nordeste brasileiro.

A atual norma brasileira de projetos de estruturas resistentes ao sismo (NBR 15421:2023) sugere acelerações entre 0,025 g e 0,05 g a serem consideradas em estruturas na Região. Conforme Fonseca *et al*. (2024), essa norma baseia-se em estudos sobre ameaça sísmica de escala global elaborados na década de 1990 (*Global Seismic Hazard Assessment Program*: GSHAP), entretanto, mostra-se limitada enquanto norma para ser aplicada a projetos de fundações para estruturas offshore.

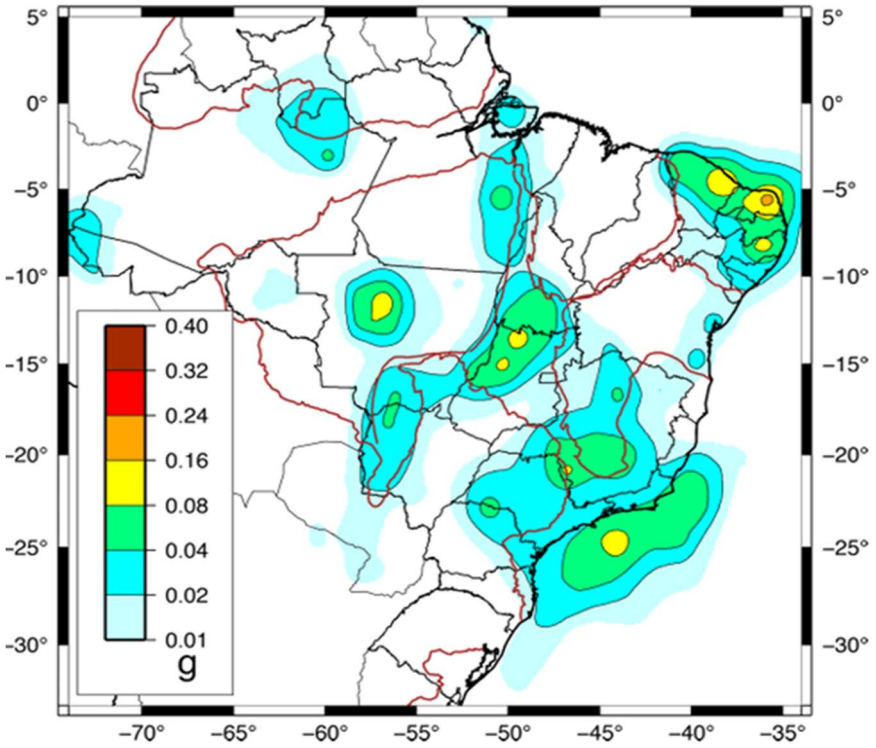


Figura 4. Mapa de ameaça sísmica do Brasil para 10% de probabilidade de excedência em 50 anos (Assumpção, 2016; *apud* Fonsêca, 2024).

Destaque-se também que o trabalho de Fonsêca (2024) evidenciou que no Nordeste do Brasil, estudos de PSHA[5] em escalas globais e continentais indicaram valores de pico de aceleração do solo (PGA) que variam entre 0,02-0,06 g e 0,20-0,35 g para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (Figura 4). Destaca Fonsêca (2024) que, nas análises realizadas, com foco no PSHA no Nordeste do Brasil, considerando o cenário de 10% de probabilidade de excedência em 50 anos, em geral, a maior parte do NE brasileiro apresentou valores de PGA (*peak groung acceleration*: aceleração máxima do solo) inferiores aos níveis projetados para as Zonas I e II da norma NBR 15421:2023.

Os maiores valores de PGA observados (0,10 a 0,2 g para 10% de probabilidade de excedência em 50 anos) podem indicar intensidades sísmicas típicas entre VI e VIII, conforme Haldar *et al*. (2013). Isso pode resultar em efeitos como os já observados nas últimas décadas, porém, podendo ser mais severos, variando de pequenos danos em edificações civis a colapso de estruturas antigas. Na Figura 5, apresentada a seguir, consta o mapa de perigo sísmico (PGA) do NE do Brasil para 10% de probabilidade de excedência em 50 anos, de acordo com Fonseca *et al*. (2025).

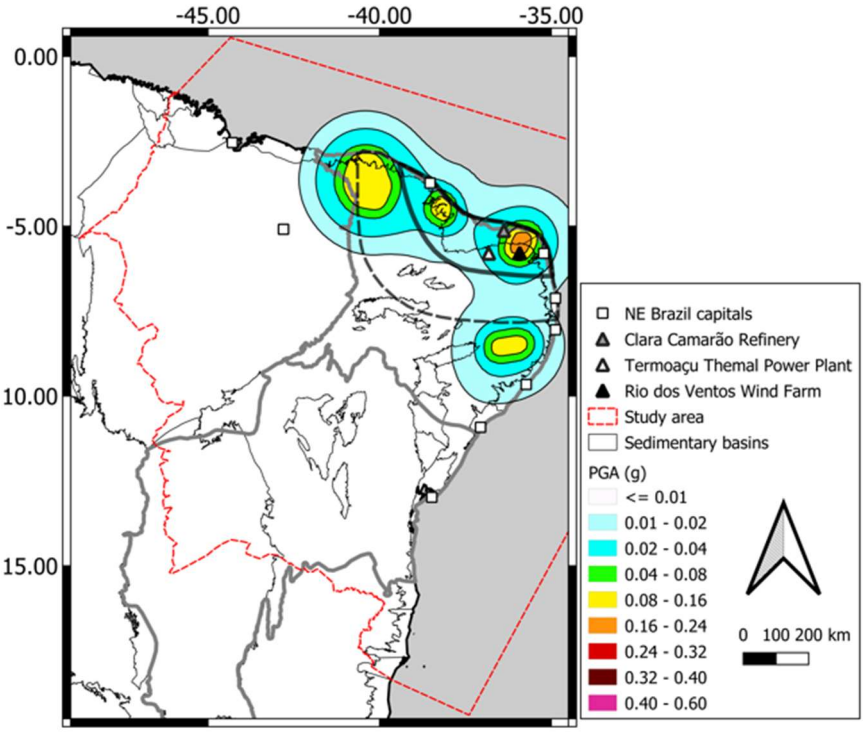


Figura 5. Mapa de ameaça sísmica para o NE do Brasil (Fonsêca *et al*., 2025).

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES

Evidencia o trabalho a importância de produtos como mapas de suscetibilidade geotécnica ao risco sísmico de fundação para estruturas de aerogeradores em ambiente *offshore*, considerados informações de interesse para a implementação de procedimentos de análise de risco sísmico em projetos de implantação de parques de aerogeradores em ambiente offshore.

Como forma de exemplificar a aplicabilidade dos resultados de medidas de PGA para a obtenção do CSR e CRR, apresentam-se a Figura 6 a seguir, correspondendo a gráfico ilustrativo para a avaliação do risco de liquefação em fundações diretas, empregando-se relação entre a magnitude do sismo e o potencial de liquefação, bem como a Figura 7 mostrando de forma esquemática o risco de liquefação para sismo com magnitude de 2,5 Mw com diferentes valores para densidade relativa (Dr) para o solo.

[5] *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*.

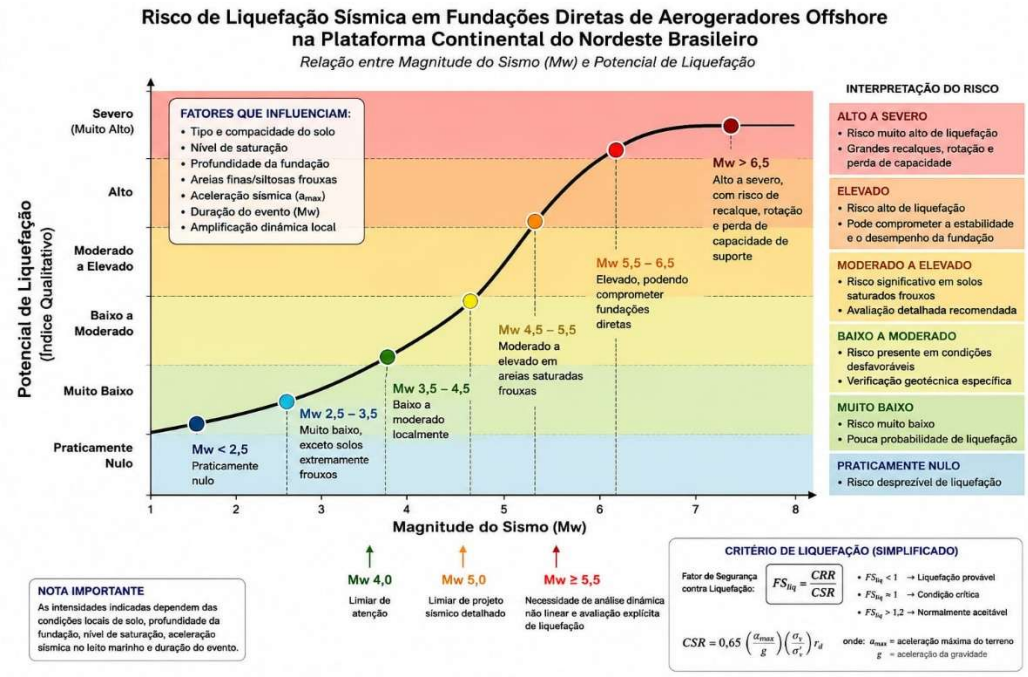


Figura 6. Esquema ilustrativo com relação entre magnitude do sismo e potencial de liquefação.

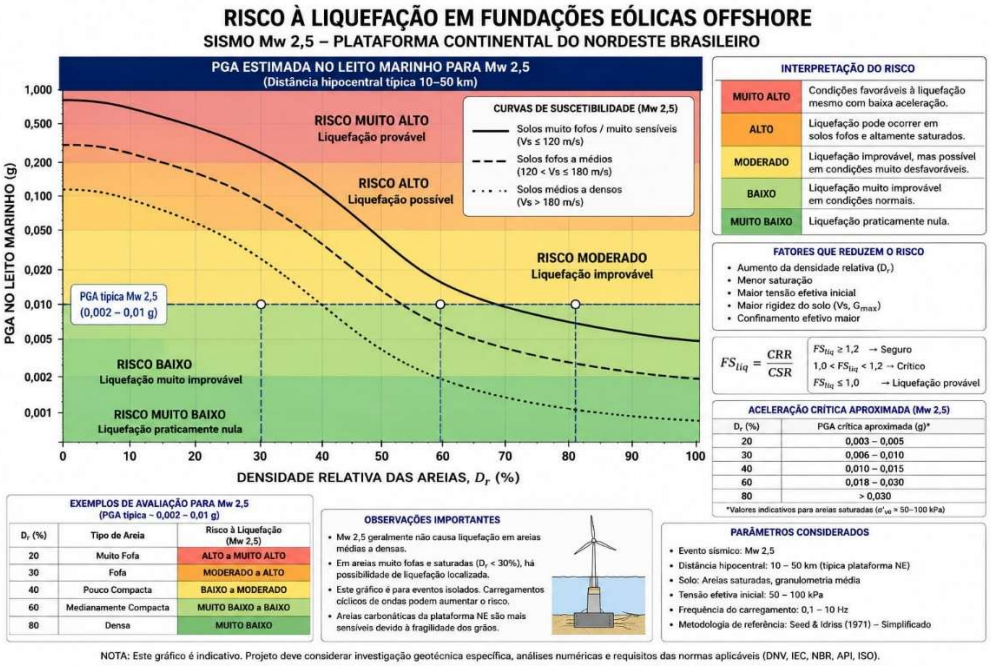


Figura 7. Desenho ilustrativo relacionando risco de liquefação para sismo com magnitude de 2,5 Mw com diferentes valores para densidade relativa (D_r) para o solo.

Destaque-se que areias carbonáticas do Nordeste *offshore* apresentam maior sensibilidade relativa à liquefação por possuírem grãos frágeis e comportamento metastável, entretanto verifica-se como pouco provável haver liquefação com sismos com magnitude de Mw 2,5 em areias densas, solos cimentados e fundações profundas, podendo haver degradação localizada em areias carbonáticas muito frouxas, sedimentos recentesl, paleocanais e áreas de baixa tensão confinante. Portanto, para a plataforma continental do Nordeste brasileiro do ponto de vista de engenharia *offshore* moderna, Mw 2,5 é mais um evento de monitoramento geotécnico do que um cenário crítico de projeto.

Considera-se que aplicabilidade dos conhecimentos sobre o risco sísmico de projetos de fundações de aerogeradores offshore poderá ser implementada desde na definição de critérios para a seleção de áreas, segundo abordagem territorial na forma de zoneamento do risco geológico e geotécnico, tendo em vista a suscetibilidade à liquefação dos solos, bem como na definição de tipologias para as fundações e superestrutura para os aerogeradores, visto que impactaria de forma importante no custo de implantação (CAPEX) e no custo de operação (OPEX) dos investimentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que os resultados do trabalho possam agregar critérios geológicos e geotécnicos para subsidiar no estabelecimento de critérios técnicos, ambientais, sociais e econômicos para identificação de áreas mais aptas para instalação de projetos de geração eólica *offshore*, consistindo os conhecimentos sobre o risco sísmico de projetos de fundações de aerogeradores *offshore* elemento com potencial relevante para contribuir com a regulamentação desde a definição de critérios para a seleção de áreas, segundo abordagem territorial na forma de zoneamento do risco geológico e geotécnico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela oportunidade de realizar a pesquisa que viabilizou o presente trabalho. Ao Ministério de Gestão e Inovação em Serviços Públicos, pelo apoio ao trabalho, por meio do Programa de Capacitação de Longa Duração - PCLD, para integrantes da categoria de Infraestrutura no Serviço Público Federal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 15.421:2023 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimentos. Rio de Janeiro.

Bhattacharya S, Biswal S, Aleem M, Amani S, Prabhakaran A, Prakhya GKV *et al*. Seismic Design of Offshore Wind Turbines: Good, Bad and Unknowns. Energies. 2021 Jun 12;14 (12). doi: 10.3390/en14123496.

Eurocode 8 (2004). Design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 2004-1-1, CEN, Brussels.

Fonsêca, J. A. S. (2024). Análise probabilística da ameaça sísmica para o Nordeste do Brasil. Orientador: Dr. Aderson Farias do Nascimento. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 219f.

Fonsêca, J. A. S., Aderson Farias do Nascimento, and Stanisław Lasocki. "Probabilistic Seismic Hazard Analysis for NE Brazil." *Bulletin of Earthquake Engineering* (2025): 1-21

Haldar, P.; Singh, Y.; Lang, D.H. e Paul, D.K. (2013). Comparison of seismic risk assessment based on macroseismic intensity and spectrum approaches using “SeisVARA.” Soil Dyn Earthq Eng. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.01.016

Kijko, A. (2011). Seismic Hazard. In: Encyclopedia of Earth Sciences Series. pp 1107–1121

Kramer, S. L (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River.

Nóbrega, P. G. B.; Souza, B. R. S., Nóbrega, S. H. S. (2021). Towards improving the seismic hazard map and the response spectrum for the state of RN/Brazil. Rev IBRACON Estruturas e Materiais. https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000300002

Reiter, L. (1991) Earthquake hazard analysis issues and insights. Columbia University Press, New York.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, Nº. 9, pp. 1249-1273.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/7

Correlações Entre as Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas de um Sienogranito Intemperizado

Carolina Crissafe dos Santos Lemos
Estudante de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, carolina.crissafe@ufv.br

Cibele Cláuver
Professora adjunta, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, cibele.clauver@ufv.br

Eduardo Antonio Gomes Marques
Professor titular, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

Matheus Sant'anna Andrade
Estudante de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, matheus.andrade@ufv.br

Diogo Silva de Oliveira
Professor adjunto, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, diogooliveira@ufv.br

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo estabelecer correlações entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de um sienogranito classificado entre os graus de alteração W1 (rocha sã), W2 (rocha levemente alterada) e W3 (rocha moderadamente alterada), de acordo com a classificação proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM). As constantes dinâmicas - módulo de elasticidade (E_d) e coeficiente de Poisson (υ_d) - foram obtidas por ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas compressivas e cisalhantes, realizados segundo recomendações da ISRM, enquanto os valores de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson estáticos (υ) foram determinados por ensaios de compressão uniaxial. Os resultados indicaram que as razões E/E_d e υ/υ_d são diretamente proporcionais à massa específica aparente natural (ρ). Para W1 e W2, as constantes estáticas superaram as dinâmicas, enquanto em W3 observou-se comportamento inverso, evidenciando a influência do intemperismo na resposta elástica do material. As correlações apresentaram comportamento linear com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,94, demonstrando que as constantes estáticas podem ser estimadas a partir de parâmetros dinâmicos, especialmente na ausência de ensaios laboratoriais de compressão uniaxial.

PALAVRAS-CHAVE: Rocha Ígnea, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, Velocidade de Propagação de Ondas, Intemperismo.

ABSTRACT: This study aimed to establish correlations between the static and dynamic elastic constants of a syenogranite classified according to the International Society for Rock Mechanics (ISRM) weathering classification system into weathering degrees W1 (sound rock), W2 (slightly altered), and W3 (moderately altered). Dynamic elastic modulus (E_d) and dynamic Poisson's ratio (υ_d) were obtained via non-destructive testing of compressional and shear wave propagation velocities, conducted in accordance with ISRM recommendations. Static elastic modulus (E) and static Poisson's ratio (υ) were determined through uniaxial compression tests. The results showed that the E/E_d and υ/υ_d ratios are directly proportional to the apparent natural density (ρ). For W1 and W2, the static constants were greater than the dynamic constants; however for W3, the opposite behavior was observed, highlighting the influence of weathering on the elastic response of the material. The correlations exhibited linear behavior with coefficients of determination (R^2) greater than 0.94, demonstrating that static constants can be estimated from dynamic parameters, particularly when uniaxial compression laboratory tests are unavailable.

KEYWORDS: Igneous Rock; Elastic Modulus; Poisson's Ratio; Wave Propagation Velocity; Weathering.

1 INTRODUÇÃO

O módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (υ) são propriedades elásticas diretamente associadas ao comportamento de deformabilidade das rochas. De acordo com Goodman (1989), a deformabilidade refere-se à capacidade de uma rocha se deformar sob condições de carregamento ou descarregamento. Essa propriedade assume grande relevância em projetos geotécnicos, uma vez que, em determinadas situações, os maciços rochosos podem apresentar elevada resistência mecânica e, ainda assim, ter sua estabilidade comprometida em função de altos níveis de deformabilidade.

O comportamento de deformabilidade das rochas pode ser influenciado por fatores internos e externos. Segundo Bell (2005), os fatores externos englobam o estado de tensões atuante, as condições de temperatura e pressão, a presença de água, dentre outros fatores. Por sua vez, os fatores internos estão associados às características intrínsecas da rocha, tais como a composição mineralógica, a textura dos grãos minerais, a presença de fissuras e o grau de alteração intempérica.

Nesse contexto, a determinação das propriedades elásticas das rochas é fundamental para a compreensão adequada de seu comportamento mecânico, especialmente em estudos geotécnicos que envolvem a avaliação de maciços rochosos constituídos por diferentes graus de alteração intempérica.

As propriedades elásticas das rochas podem ser determinadas por métodos estáticos e dinâmicos. A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 2007) e a ASTM International (ASTM, 2014) recomendam a determinação das constantes elásticas estáticas (E e υ) a partir da realização do ensaio de compressão uniaxial. Por sua vez, as constantes elásticas dinâmicas de módulo de elasticidade (E_d) e o coeficiente de Poisson (υ_d) podem ser determinadas por meio do ensaio de determinação das velocidades de propagação de ondas compressivas (V_p) e cisalhantes (V_s).

Shen, Gao e Gia (2024) destacam que, de modo geral, os parâmetros estáticos refletem, com maior precisão, as propriedades mecânicas da rocha sob o estado de tensões atuante em campo. Entretanto, sua determinação envolve procedimentos mais complexos, onerosos e demorados quando comparados aos métodos dinâmicos. Desta forma, a utilização de correlações entre parâmetros dinâmicos e estáticos mostra-se muito útil, sobretudo em situações nas quais a realização de ensaios laboratoriais destrutivos é limitada por restrições de tempo, custo ou disponibilidade de amostras.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo propor correlações entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de um sienogranito em diferentes graus de intemperização, a fim de viabilizar a estimativa das propriedades elásticas estáticas a partir de parâmetros dinâmicos obtidos por ensaios não destrutivos, considerando a influência da alteração intempérica, representada pela variação da massa específica aparente natural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

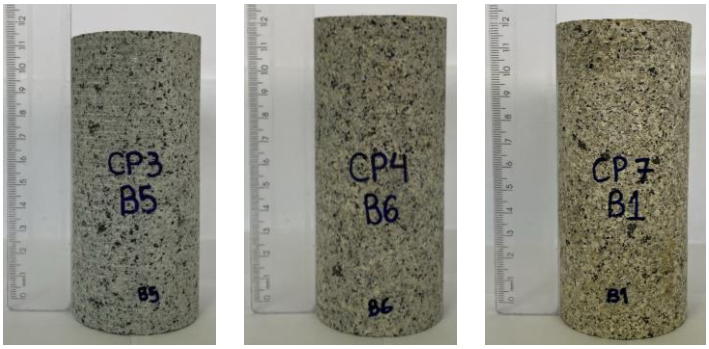
2.1 Amostras de Sienogranito

Para a realização do programa experimental deste estudo, foram utilizadas 51 amostras de um sienogranito, provenientes de uma pedreira de extração de rochas ornamentais, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do estado do Espírito Santo. As amostras foram classificadas quanto ao grau de alteração intempérica nas classes W1 (rocha sã), W2 (levemente alterada) e W3 (moderadamente alterada), de acordo com a classificação proposta pela ISRM (1981), as quais estão ilustradas na Figura 1.

Do total de amostras, 37 corpos de prova cilíndricos foram preparados com diâmetro de 54 mm e razão altura/diâmetro (h/d) variando entre 2,0 e 2,5, sendo 16 classificados como W1, 8 como W2 e 13 como W3. Adicionalmente, foram preparados 14 corpos de prova cilíndricos longos, com diâmetro de 67,5 mm e altura aproximada de 160 mm, sendo 3 amostras classificadas como W1, 7 como W2 e 4 como W3, totalizando 51 amostras utilizadas no programa experimental.

Todas as amostras preparadas foram submetidas aos ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas e de determinação da massa específica. Entretanto, apenas parte dos corpos de prova foi destinada aos ensaios de compressão uniaxial, em razão da disponibilidade limitada de amostras que

atendessem aos requisitos geométricos e às condições de integridade exigidas pela ASTM, bem como da destinação de parte dos corpos de prova a outros ensaios destrutivos que não integram o escopo deste artigo.



(a) (b) (c)

Figura 1. Amostras cilíndricas: (a) W1, (b) W2 e (c) W3.

2.2 Determinação das Constantes Elásticas Estáticas

As constantes elásticas estáticas de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (υ) foram determinadas a partir da realização do ensaio de compressão uniaxial, de acordo com o procedimento sugerido pela ASTM (2014). Para a execução desse ensaio, foi utilizada uma prensa servocontrolada MTS, modelo 815, com capacidade de carga compressional de até 4600 kN, além de três extensômetros acoplados aos corpos de prova, referentes aos modelos MTS 632.90F-12 e MTS 632.92H-03, para medir a deformação na direção axial e diametral, respectivamente. O procedimento consistiu em um carregamento inicial até atingir 60% da carga máxima previamente estimada, seguido de descarregamento até 10% da carga máxima e posterior recarregamento contínuo até a ruptura.

Desta forma, o módulo de elasticidade (E) do sienogranito foi obtido pela inclinação do trecho de recarregamento no ensaio de compressão uniaxial, determinado pela Equação 1, em que "Δσ" representa a variação da tensão aplicada e "$\Delta\varepsilon_a$" corresponde à variação da deformação axial no trecho em análise. Por sua vez, o coeficiente de Poisson (υ) foi determinado por meio da Equação 2, a partir da medição das deformações na direção axial (ε_a) e diametral (ε_d) durante a execução do ensaio.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \tag{1}$$

$$\upsilon = -\frac{\text{inclinação da curva } (\sigma \text{ x } \varepsilon_a)}{\text{inclinação da curva } (\sigma \text{ x } \varepsilon_d)} \tag{2}$$

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em 5 corpos de prova cilíndricos, sendo 2 amostras classificadas como W1, 2 como W2 e 1 como W3. O número reduzido de amostras para esse ensaio decorreu da disponibilidade limitada de corpos de prova que atendessem simultaneamente aos requisitos geométricos e às condições de integridade mecânica estabelecidas pela ASTM, uma vez que parte das amostras disponíveis foi destinada à realização de outros ensaios destrutivos que não integram o escopo do presente artigo. Ainda assim, os resultados obtidos mostraram-se suficientes para a identificação de tendências consistentes e para o estabelecimento das correlações propostas entre os parâmetros elásticos.

2.3 Determinação das Constantes Elásticas Dinâmicas

As constantes elásticas dinâmicas de módulo de elasticidade (E_d) e coeficiente de Poisson (υ_d) foram determinadas a partir da realização do ensaio de determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, seguindo as recomendações da ASTM (2000).

Para a realização desse ensaio, utilizou-se o equipamento *Pundit PL-200*, da fabricante Proceq, ilustrado na Figura 2 (a). A velocidade de propagação de ondas compressivas (V_p) foi determinada por meio de um par

de transdutores de 250 kHz, apresentado na Figura 2 (b). Com o intuito de garantir uma boa aderência entre as amostras e esses transdutores, além de otimizar a qualidade do sinal registrado, utilizou-se um gel à base de água para a leitura dessas ondas, indicado na Figura 2 (c). Para a determinação da velocidade de propagação das ondas cisalhantes (V_s) foi utilizado um par de transdutores DPC (*Dry Point Shear Wave Transducers*) de 40 kHz, demonstrado na Figura 2 (d), que dispensa a necessidade de gel de acoplamento, uma vez que a transmissão e recepção do sinal são realizadas diretamente pelas ponteiras desse transdutor.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2. Equipamentos utilizados no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico: (a) Pundit PL-200, (b) transdutores de 250 kHz, (c) gel de acoplamento e (d) transdutores DPC de 40 kHz.

O instante de chegada da onda compressiva foi definido como o último ponto de amplitude 0,0% anterior ao início do primeiro sinal registrado. Em relação à onda cisalhante, o seu tempo de chegada foi determinado como o ponto de amplitude 0,0% anterior ao primeiro pico negativo significativo da curva, conforme indicado pelo "Manual de referência rápida dos transdutores DPC de onda de cisalhamento" da Proceq (2023). Ressalta-se que essa metodologia também foi previamente empregada nos estudos conduzidos por Rios *et al.* (2017), Candelaria *et al.* (2020) e Ferreira *et al.* (2021).

A determinação dos tempos de chegada e da velocidade de propagação das ondas compressivas e cisalhantes foi realizada com o auxílio do software *PL-Link* da Proceq. A partir dos valores de V_p e V_s, as constantes elásticas dinâmicas de coeficiente de Poisson (υ_d) e módulo de elasticidade (E_d) foram determinadas por meio das Equações 3 e 4, respectivamente, em que a variável "ρ" corresponde à massa específica aparente natural das amostras, obtida conforme a Equação 5, referente à razão entre a massa (m) e o volume (V) dos corpos de prova. Ressalta-se que os ensaios não destrutivos para a determinação de V_p, V_s e ρ foram realizados em todos os 51 corpos de prova preparados e listados no item 2.1.

$$\upsilon_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

$$E_d = 2\rho V_s^2(1 + \upsilon_d) \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas

Os resultados obtidos para as constantes elásticas estáticas e dinâmicas de módulo de elasticidade (E e E_d) e coeficiente de Poisson (υ e υ_d), as respectivas razões entre esses parâmetros e os valores de massa específica aparente natural de cada classe de amostras, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das constantes elásticas estáticas e dinâmicas do sienogranito.

Grau de alteração intempérica	ρ (g/cm³)	E (GPa)	E_d (GPa)	E/E_d	υ	υ_d	υ/υ_d
W1	2,64	49,29	36,77	1,34	0,47	0,36	1,31
W2	2,63	49,03	41,57	1,18	0,46	0,38	1,21
W3	2,46	15,43	18,27	0,84	0,24	0,32	0,75

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, observou-se uma redução sutil no valor da massa específica aparente natural (ρ) das amostras do sienogranito entre as classes de W1 e W2, enquanto uma diminuição mais acentuada foi registrada entre as classes W2 e W3, indicando que os efeitos do intemperismo sobre as propriedades físicas da rocha se intensificam a partir da condição moderadamente alterada.

No que diz respeito às constantes elásticas estáticas, os resultados indicaram um comportamento semelhante para o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (υ), observando-se uma redução desses parâmetros com o aumento do grau de alteração intempérica. Em relação à condição de rocha sã (W1), o módulo de elasticidade estático apresentou reduções de aproximadamente 1% para a classe W2 e de 70% para a classe W3, enquanto o coeficiente de Poisson estático diminuiu cerca de 2% e 49% para essas mesmas classes, respectivamente. Esses resultados evidenciaram que os estágios iniciais da alteração intempérica não promoveram mudanças expressivas na rigidez e no comportamento deformacional do sienogranito, enquanto o avanço da alteração para a condição moderadamente intemperizada resultou em redução expressiva dessas propriedades elásticas. Esse comportamento é semelhante ao observado por Jaques *et al.* (2020) para o mesmo material, e aos estudos realizados com rochas graníticas em diferentes países, tais como os desenvolvidos por Basu, Celestino e Bortolucci (2008), Gupta e Rao (2000), Heidari, Momeni e Naseri (2013) e Lamas (2023).

Por sua vez, os parâmetros elásticos dinâmicos apresentaram um comportamento distinto. Em relação à condição de rocha sã (W1), o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) apresentou aumento de aproximadamente 13% para a classe W2 e redução de cerca de 50% para a classe W3, enquanto o coeficiente de Poisson dinâmico (υ_d) apresentou aumento de cerca de 6% em W2 e redução de aproximadamente 11% em W3. Esses resultados podem ser atribuídos a possíveis diferenças mineralógicas, texturais, microfissuras, ou demais fatores que podem ter exercido maior influência sobre essa propriedade do que o intemperismo, uma vez que de W1 para W2 a degradação das propriedades físicas da rocha foi pouco notória, conforme evidenciado pelo valor de ρ.

Adicionalmente, para as amostras de rocha sã (W1) e levemente intemperizadas (W2), as razões E/E_d e υ/υ_d apresentaram valores superiores a 1,0, indicando que as constantes elásticas estáticas foram maiores que as dinâmicas nessas condições. Em contrapartida, para as amostras moderadamente intemperizadas (W3), ambas as razões apresentaram valores inferiores a 1,0, demonstrando a inversão da relação entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas com o aumento do grau de alteração intempérica, evidenciando a influência do intemperismo na resposta elástica do material.

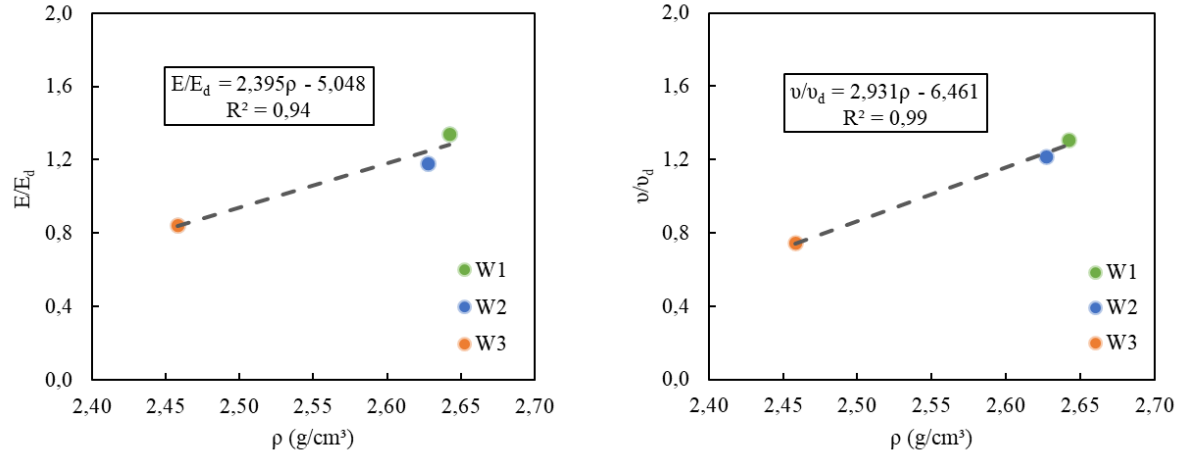
Conforme enfatizado por Martínez-Martínez, Benavente e García-del-Cura (2012), a presença de fraturas, vazios e os processos de intemperismo nas rochas causam uma discrepância entre os valores registrados para os parâmetros elásticos dinâmicos e estáticos. Essa divergência decorre do fato de que as descontinuidades provocam efeitos distintos na propagação de ondas ultrassônicas e nos ensaios de compressão uniaxial. Consequentemente, as constantes elásticas dinâmicas podem assumir valores superiores ou inferiores às correspondentes constantes estáticas, em função do grau de alteração intempérica e do estado estrutural da rocha, conforme evidenciado pela redução das razões E/E_d e υ/υ_d da classe W1 para W2 e pela inversão dessas razões na condição mais intemperizada (W3).

3.2 Correlações Empíricas entre as Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas

A Figura 3 apresenta as linhas de tendência que representam a variação das razões E/E_d e υ/υ_d para as classes W1, W2 e W3 em função da massa específica aparente natural (ρ), com base nos valores médios das propriedades de cada grupo de amostras. Esses resultados evidenciam uma tendência linear entre as variáveis, indicando que as razões E/E_d e υ/υ_d são diretamente proporcionais à massa específica aparente natural do sienogranito e, consequentemente, são inversamente proporcionais ao grau de alteração intempérica.

Ressalta-se que, sempre que possível, as constantes elásticas estáticas (E e υ) devem ser determinadas por meio do ensaio de compressão uniaxial. Entretanto, na impossibilidade de sua execução, os parâmetros

dinâmicos (E_d e υ_d) podem ser obtidos por meio de ensaios não destrutivos de velocidade de propagação de ondas, permitindo a estimativa das constantes estáticas do sienogranito por meio das correlações propostas neste estudo, em conjunto com a massa específica aparente natural. Destaca-se, ainda, que o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico apresenta elevada aplicabilidade em campo, dispensando a extração de amostras e simplificando o processo de caracterização das propriedades elásticas das rochas.



(a) (b)

Figura 3. Correlações empíricas entre as razões: (a) E/E_d e (b) υ/υ_d em função da massa específica aparente natural do sienogranito.

A Tabela 2 apresenta algumas correlações propostas na literatura entre os módulos de elasticidade estático (E) e dinâmico (E_d), bem como uma correlação entre os coeficientes de Poisson estático (υ) e dinâmico (υ_d). Observa-se que as equações propostas por diferentes autores apresentam comportamento predominantemente linear e têm sido aplicadas a diversos tipos de rochas, incluindo litotipos graníticos. Esses resultados corroboram o comportamento linear obtido no presente estudo, representado pelas equações indicadas na Figura 3.

Além disso, destaca-se que as correlações propostas neste estudo apresentaram elevados valores de R^2, demonstrando bom ajuste aos dados experimentais e comportamento compatível com o reportado na literatura, evidenciando sua aplicabilidade para a estimativa das propriedades elásticas do sienogranito.

Tabela 2. Comparação de correlações entre constantes elásticas estáticas e dinâmicas.

Autores	**Equação**	**R^2**	**Tipos de rocha**
Presente estudo (2026)	$E = E_d(2{,}395\rho - 5{,}048)$	0,94	Sienogranito
King (1983)	$E = 1{,}263E_d - 29{,}5$	0,82	Ígneas e metamórficas
Eissa e Kazi (1988)	$E = 0{,}74E_d - 0{,}82$	0,70	Vários tipos
Nur e Wang (1989)	$E = 1{,}153E_d - 15{,}2$	-	E > 15 GPa
Christaras, Auger e Mosse (1994)	$E = 1{,}05E_d - 3{,}16$	0,99	Vários tipos
Brotons *et al.* (2016)	$E = 0{,}932E_d - 3{,}421$	0,97	Vários tipos
Asef e Farrokhrouz (2017)	$E = 0{,}88E_d(1 - \eta) - 3{,}7$	0,92	Vários tipos
Presente estudo (2026)	$\upsilon = \upsilon_d(2{,}931\rho - 6{,}461)$	0,99	Sienogranito
Christaras, Auger e Mosse (1994)	$\upsilon = 0{,}71\upsilon_d + 0{,}063$	0,74	Vários tipos

Nota: E = módulo de elasticidade estático; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; υ = coeficiente de Poisson estático; υ_d = coeficiente de Poisson dinâmico; η = porosidade; ρ = massa específica aparente natural.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a massa específica aparente natural (ρ), o módulo de elasticidade estático (E) e o coeficiente de Poisson estático (υ) apresentaram variações pouco expressivas entre as classes de W1 e W2, enquanto uma redução mais acentuada foi registrada entre as classes W2 e W3, indicando que os efeitos do intemperismo sobre as propriedades físicas e mecânicas do sienogranito se intensificam a partir da condição moderadamente alterada. Em relação aos parâmetros elásticos dinâmicos, observou-se um pequeno aumento dos valores da classe W2 em relação à condição W1 e uma redução na classe W3, sugerindo que nos estágios iniciais de alteração, a influência do intemperismo sobre as propriedades dinâmicas é limitada, pelo que outros fatores, como características mineralógicas, texturais e a presença de microfissuras, podem exercer maior influência sobre o comportamento elástico do material.

Além disso, evidenciou-se uma relação linear entre as razões E/E_d e υ/υ_d e a massa específica aparente natural do sienogranito, apresentando valores superiores a 1,0 para as amostras de W1 e W2, enquanto para as amostras de W3 ambas as razões foram inferiores a 1,0, caracterizando a inversão da relação entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas com o aumento do grau de alteração intempérica.

Adicionalmente, as correlações propostas entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas, em função do grau de alteração intempérica, representado pela massa específica aparente natural, apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2), demonstrando bom ajuste aos dados experimentais, bem como um comportamento consistente com o reportado na literatura. Desta forma, as equações empíricas mostram-se aplicáveis para a estimativa indireta das propriedades elásticas do sienogranito, a partir de parâmetros dinâmicos determinados por ensaios não destrutivos de simples execução, particularmente quando a realização de ensaios de compressão uniaxial é limitada ou inviável. Entretanto, o baixo número de amostras ensaiadas à compressão, é um fator que sugere cautela na consideração dos resultados obtidos para esses ensaios no presente estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asef, M. R., Farrokhrouz, M. (2017) A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, p. 359-363.

ASTM International (2000). D2845–00: *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*. 7 p.

ASTM International (2014). D7012-14: *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. 9 p.

Basu, A., Celestino, T. B., Bortolucci, A. A. (2009) Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, p. 73-93.

Bell, F.G. (2005) Engineering Geology: Rock Properties and Their Assessment. *Encyclopedia of Geology*, p. 566-580.

Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gómez-Heras, M. (2016) Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and Structures*, 49 (8), p. 3021-3037.

Candelaria, M. D. E.; Kee, S-H.; Yee, J-J.; Lee, J-W. (2020) Effects of Saturation Levels on the Ultrasonic Pulse Velocities and Mechanical Properties of Concrete. *Materials*, 14 (1), p. 152.

Christaras, B., Auger, F., Mosse, E. (1994) Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*, 27 (4), p. 222-228.

Eissa, E. A., Kazi, A. (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25 (6), p. 479-482.

Ferreira, C., Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A. V. da. (2021) Evolution of the optimum ultrasonic testing frequency of alkali-activated soil–ash. *Géotechnique Letters*, 11 (3), p. 158-163.

Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed., New York. 562 p.

Gupta, A. S., Rao, K. S. (2000) Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering geology*, 56 (3-4), p. 257-274.

Heidari, M., Momeni, A. A., Naseri, F. (2013) New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. *Engineering Geology*, 166, p. 65-73.

International Society for Rock Mechanics (1981). Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18 (1), p. 85-110.

International Society for Rock Mechanics (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. 644 p.

Jaques, D. S., Marques, E. A. G., Marcelino, L. C., Leão, M. F., Ferreira, E. P. S., Lemos, C. C. S. (2020) Changes in the Physical, Mineralogical and Geomechanical Properties of a Granitic Rock from Weathering Zones in a Tropical Climate. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53 (12), p. 5345-5370.

King, M. S. (1983) Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20 (5), p. 237-241.

Lamas, R. I. da R. (2023) *Estudo da variabilidade geológico-geotécnica dos perfis de alteração do granito do Porto*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 397 p.

Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-Del-Cura, M. A. (2012) Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, p. 263-268.

Nur, A.; Wang, Z. (1989) Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks. *Society of Exploration Geophysicists*.

Proceq (2023). *DPC Shear Wave Transducers Quick Reference*. Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/pt/products/pundit-200>. Acesso em 09 fev. 2026.

Rios, S., Cristelo, N., Fonseca, A. V. da, Ferreira, C. (2017) Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*, 17 (3).

Shen, S., Gao, Y., Jia, L. (2024) A Comparison of the relationship between dynamic and static rock mechanical parameters. *Applied Sciences*, 14(11), p. 4487.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/8

ELABORAÇÃO DE MAPA GEOLÓGICO DA CIDADE DE CASCAVEL/PR A PARTIR DE LAUDOS SPT COM USO DE FERRAMENTA SIG

Guilherme Irineu Venson
Professor/Pesquisador, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, guilhermeivenson@hotmail.com

Maria Helena Rodrigues Batata
Engenheira Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, maria.batata@unioeste.br

Giordan Pedro Menegarde Correa
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, giordanpedro@gmail.com

João Augusto Brand Brandalize.
Engenheiro Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, j4brandalize@gmail.com

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo a elaboração de mapas geotécnicos preditivos para o perímetro urbano de Cascavel, Paraná, por meio da integração de dados de sondagem à percussão (SPT) em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A metodologia consistiu na estruturação de um banco de dados geoespaciais, tabulação e filtragem de 361 furos de sondagem, com a adoção do critério restrito de um furo por lote. As descrições litológicas foram quantificadas e os dados interpolados pelo método geoestatístico de krigagem. Os resultados geraram modelos contínuos para a profundidade do lençol freático, a topografia do material impenetrável e a estratigrafia horizontal até 15 metros de profundidade. Constatou-se a predominância de argilas residuais com homogeneização em profundidade e a forte influência da geomorfologia local na espessura do solo intemperizado e na superfície piezométrica. Concluiu-se que o mapeamento digital fornece uma representação consistente da variabilidade do subsolo, sendo uma ferramenta técnica aplicável para a otimização de análises preliminares e elaboração de projetos de fundações.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento Geotécnico, SIG, Krigagem, Sondagem SPT, Modelagem Espacial.

ABSTRACT: This study aimed to develop predictive geotechnical maps for the urban perimeter of Cascavel, Paraná, by integrating Standard Penetration Test (SPT) data into a Geographic Information System (GIS). The methodology consisted of structuring a geospatial database, tabulating, and filtering 361 boreholes, with the adoption of the strict criterion of one borehole per lot. The lithological descriptions were quantified, and the data were interpolated using the kriging geostatistical method. The results generated continuous models for the groundwater level depth, the topography of the impenetrable material, and horizontal stratigraphy up to 15 meters deep. The predominance of residual clays with homogenization at depth and the strong influence of local geomorphology on the thickness of the weathered soil and the piezometric surface were observed. It was concluded that digital mapping provides a consistent representation of subsoil variability, being an applicable technical tool for optimizing preliminary analyses and foundation designs.

KEYWORDS: Geotechnical Mapping, GIS, Kriging, SPT Boring, Spatial Modeling.

1 Introdução

A digitalização da informação geográfica tem sido cada vez mais aplicada na engenharia civil, pois a utilização de dados georreferenciados possibilita a correlação de variáveis distintas por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O uso dessa tecnologia permite abordagens inovadoras na geração de mapas geotécnicos, facilitando a manipulação e a atualização de informações cruciais para o conhecimento do solo. Diferentemente dos mapas impressos, o mapeamento digital baseia-se em modelos numéricos que inferem as variações espaciais do solo, minimizando as incertezas decorrentes de investigações pontuais, como a heterogeneidade geotécnica e a variação do lençol freático.

A caracterização do subsolo por meio de ensaios de sondagem à percussão constitui uma boa fonte de dados para a modelagem espacial, fornecendo parâmetros quantitativos e qualitativos da estratigrafia local. A extração de índices de resistência à penetração, associada à identificação tátil-visual das camadas e à determinação do nível d'água, permite mapear a variabilidade geotécnica da região. A sistematização dessas informações mitiga as incertezas inerentes aos projetos de fundações, reduzindo a probabilidade de recalques incompatíveis e otimizando o dimensionamento das estruturas.

Considerando a escassez de mapas digitais específicos da cidade de Cascavel e a relevância do levantamento de dados para a prevenção de problemas construtivos, este trabalho teve como objetivo a elaboração de mapas temáticos geológicos da região. A pesquisa buscou elaborar um banco de dados geotécnicos na plataforma SIG a partir da compatibilização de resultados de ensaios SPT preexistentes. Aplicando o processo de interpolação matemática por krigagem, o estudo desenvolveu modelos estratigráficos, litológicos e de níveis de lençol freático, viabilizando a consulta espacializada dessas informações para o perímetro urbano. Cabe ressaltar que a ferramenta desenvolvida atua como apoio para análises e pré-projetos, não eliminando a obrigatoriedade da execução de ensaios in loco para novas edificações.

2 Metodologia

A pesquisa baseou-se na estruturação de um banco de dados geoespaciais em SIG, a partir da tabulação de dados de ensaios SPT do município de Cascavel, Paraná. A área de análise restringiu-se ao perímetro urbano da cidade, abrangendo aproximadamente 171,66 km², delimitada por um polígono em formato shapefile no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), vinculado ao datum SIRGAS 2000.

2.1 Origem dos dados e estruturação do banco geoespacial

O banco de dados foi construído a partir de relatórios de sondagem disponibilizados por uma empresa parceira de geotecnia, contemplando investigações executadas entre 1989 e 2023. O levantamento inicial catalogou 369 laudos distintos, totalizando 1.460 perfis de sondagem.

Para a composição do modelo digital, as informações foram tabuladas em planilhas eletrônicas. Foram extraídas as seguintes variáveis: coordenadas de locação, profundidade final alcançada, cota do nível d'água (NA), profundidade do material impenetrável ao ensaio e a descrição contínua das camadas de solo, englobando textura, coloração pelo sistema Munsell e consistência.

2.2 Critérios de filtragem e seleção espacial

Para evitar a superposição de dados em pontos geograficamente próximos, o que poderia gerar distorções na interpolação matemática, adotou-se o critério de utilizar apenas um furo de sondagem por lote para compor o mapeamento final.

A escolha do furo representativo de cada localidade obedeceu a uma ordem de quatro critérios: (I) seleção do furo com a maior profundidade investigada; (II) em caso de empate, preferência pelo furo que registrou a cota de alcance do material impenetrável; (III) persistindo a semelhança, escolha do furo com a identificação do lençol freático mais raso; e (IV) seleção aleatória, caso todos os parâmetros anteriores fossem idênticos. Após a aplicação desses filtros, o banco de dados final resultou em 361 furos de sondagem, distribuídos ao longo dos bairros da cidade (Figura 1).

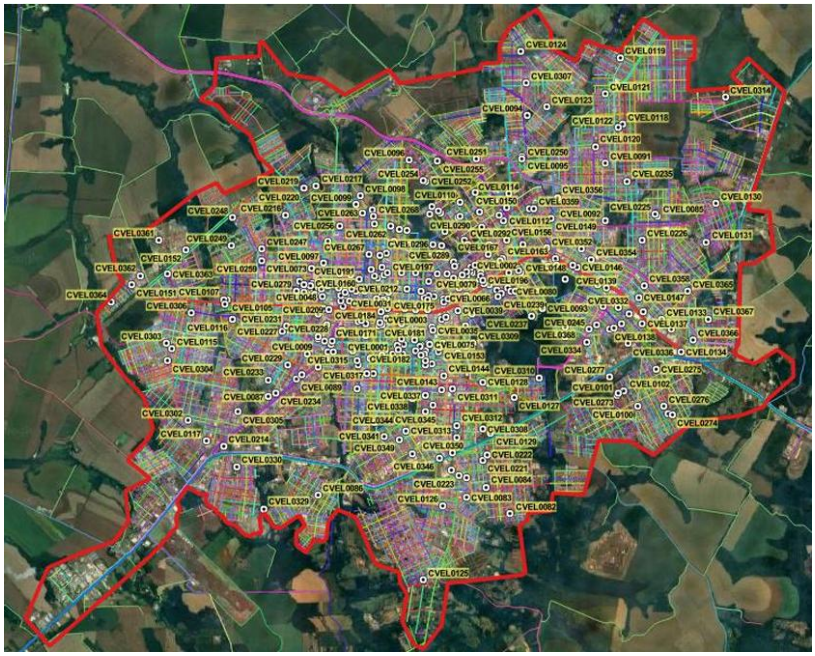


Figura 1. Distribuição espacial dos pontos de sondagem selecionados na área de estudo.

2.3 Parametrização quantitativa da estratigrafia

Os algoritmos de interpolação geoestatística operam com variáveis numéricas. Portanto, foi necessária a conversão das descrições tátil-visuais da estratigrafia em valores quantitativos, permitindo o processamento das variações litológicas a cada metro de profundidade.

Adotou-se a classificação proposta por Aoki e Velloso (1975). Foram atribuídos valores de 1 a 10 para as composições texturais e de coloração predominantes na região, e o valor 11 para a cota de impenetrável ao ensaio (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de identificação atribuídos aos tipos de solo para interpolação.

Nomenclatura	Valor atribuído
Argila Siltosa Marrom Avermelhada	1
Argila Marrom Avermelhada	2
Argila Roxa	3
Argila Amarelada	4
Argila Marrom	5
Argila Cinza	6
Argila Siltosa Roxa	7
Argila Siltosa Marrom	8
Argila Siltosa Amarelada	9
Silte Argiloso Roxo	10
Impenetrável	11

A profundidade limite para a geração dos mapas estratigráficos horizontais foi fixada em 15 metros. Essa delimitação baseou-se na constatação de que, a partir dessa cota, a disponibilidade de furos com informações contínuas caía para 57% da amostra original, o que comprometeria a densidade da malha de dados.

2.4 Processamento geoestatístico por krigagem

Com a base de dados parametrizada no software QGIS, os pontos exportados em formato CSV foram processados no *software* AgDataBox-Map para a execução da interpolação espacial. O programa realizou a filtragem automática de valores nulos, removendo pontos sem registro de nível d'água ou de impenetrável, de modo que apenas dados válidos fossem considerados na modelagem.

O método de inferência espacial utilizado foi a krigagem. O software determinou de forma automatizada os parâmetros de alcance, efeito pepita e patamar, gerando os semivariogramas teóricos para cada variável analisada (Figura 2).

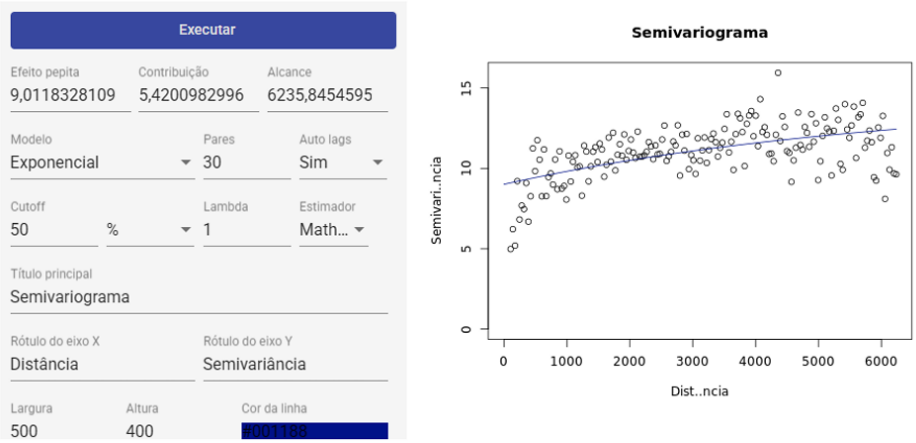


Figura 2. Exemplo de semivariograma gerado para a parametrização espacial dos dados.

A partir das funções do semivariograma, o algoritmo estimou os valores para os locais não amostrados dentro do perímetro urbano, gerando modelos de predição espacial contínuos em formato raster. Essas matrizes foram exportadas para o *software* QGIS, onde foram realizadas a edição cartográfica e a composição final dos mapas temáticos de nível d'água, topografia do impenetrável e estratigrafia horizontal.

3 Resultados e discussão

3.1 Profundidade do lençol freático e influência morfológica

O modelo preditivo do nível d'água subterrânea revelou variações significativas condicionadas à topografia e à hidrografia local. As regiões com lençol freático mais superficial (tons mais claros no modelo) concentram-se ao longo das calhas dos cursos d'água, refletindo a influência direta da drenagem e da recarga hídrica, especialmente nas sub-bacias dos rios Cascavel e Quati.

Em contrapartida, as áreas de maior profundidade do lençol (tons mais escuros) localizam-se nas regiões centrais e sudeste do município, que coincidem com os divisores topográficos das bacias hidrográficas. Nessas zonas de maior cota altimétrica, que atuam como áreas de recarga, a infiltração ocorre de forma gradual, rebaixando o nível de saturação do maciço (Figura 3).

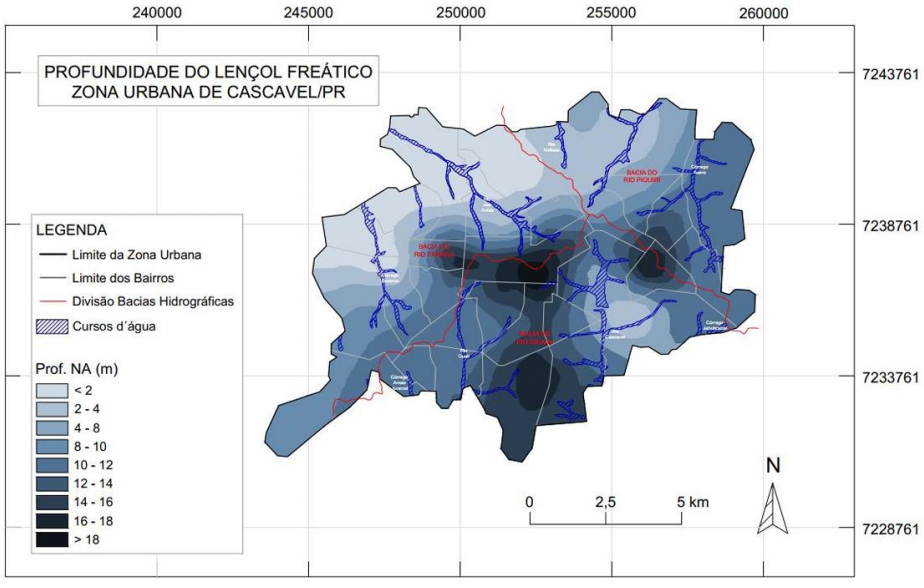


Figura 3. Mapa de profundidade do lençol freático sobreposto à divisão das bacias hidrográficas.

A análise conjunta da altimetria com o modelo interpolado sugere que, se referenciada a um sistema de cotas absolutas em vez de profundidades relativas à superfície do terreno, a superfície piezométrica apresentaria um gradiente muito mais suave, acompanhando o mergulho natural das bacias.

3.2 Topografia do horizonte impenetrável

A profundidade de ocorrência do material impenetrável ao SPT é um indicativo direto da espessura do manto de alteração do solo residual. O mapa gerado demonstrou que o impenetrável se encontra a profundidades menores (solo residual menos espesso) predominantemente nas zonas oeste e norte da cidade, abrangendo parte do Centro e bairros como Neva e Universitário (Figura 4).

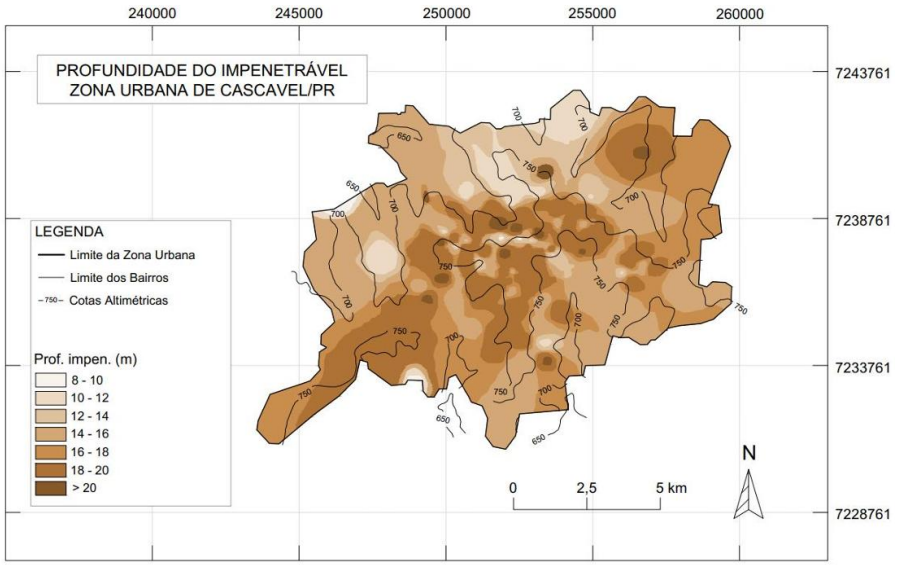


Figura 4. Mapa de profundidade do impenetrável sobreposto à topografia local.

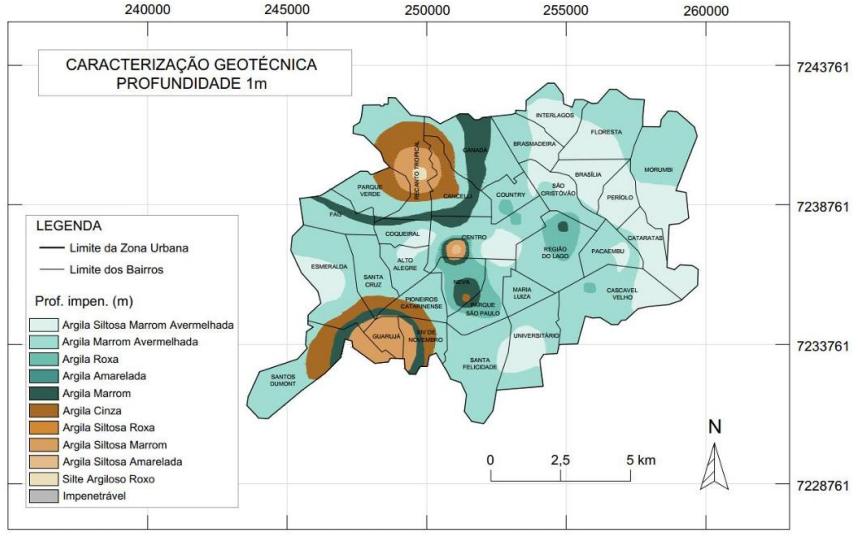
Ao cruzar o modelo preditivo com as curvas de nível, constatou-se uma correlação geomorfológica: as áreas onde o topo da rocha alterada ou sã se encontra a maiores profundidades (indicando espessos pacotes de solo intemperizado) coincidem fortemente com as regiões de maiores cotas altimétricas (divisores de água). Em contraponto, a dinâmica fluvial ao longo do tempo geológico removeu parte do pacote de solo nas regiões de vale, aproximando o impenetrável da superfície.

3.3 Modelagem estratigráfica 3D (Fatias horizontais)

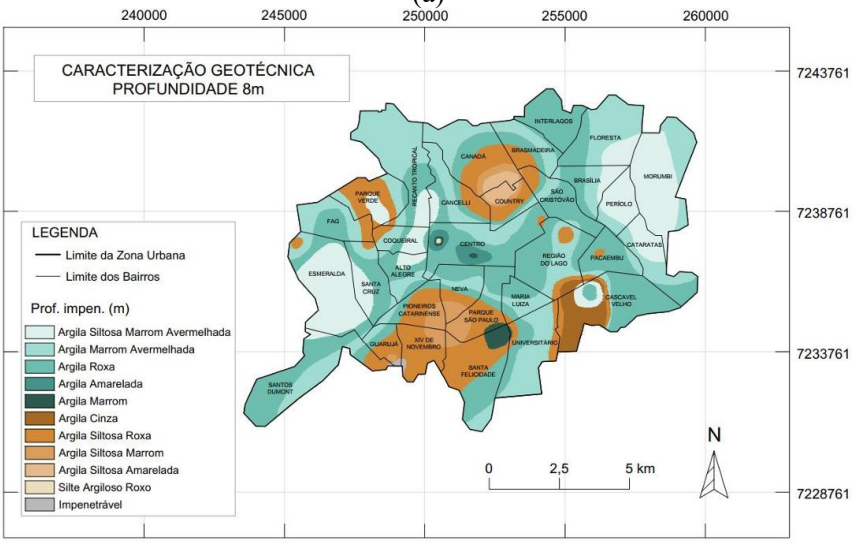
A interpolação metro a metro permitiu visualizar a evolução do intemperismo químico dos derrames basálticos do Grupo Serra Geral que originaram o solo de Cascavel. Observou-se um padrão de transição litológica e adensamento ao longo do perfil em profundidade.

Nos horizontes superficiais (1 a 4 metros), predominam solos argilosos e argilo-siltosos de coloração marrom-avermelhada. A heterogeneidade nessas cotas é maior devido à lixiviação ativa, atividade biológica e intemperismo recente (Figura 5a). À medida que a profundidade avança (5 a 10 metros), ocorre uma homogeneização espacial. A argila marrom-avermelhada perde espaço para a argila roxa e argila siltosa roxa, que se consolidam como a matriz predominante do perfil geotécnico intermediário, formando pacotes de solo mais coesos e menos suscetíveis a variações climáticas superficiais (Figura 5b).

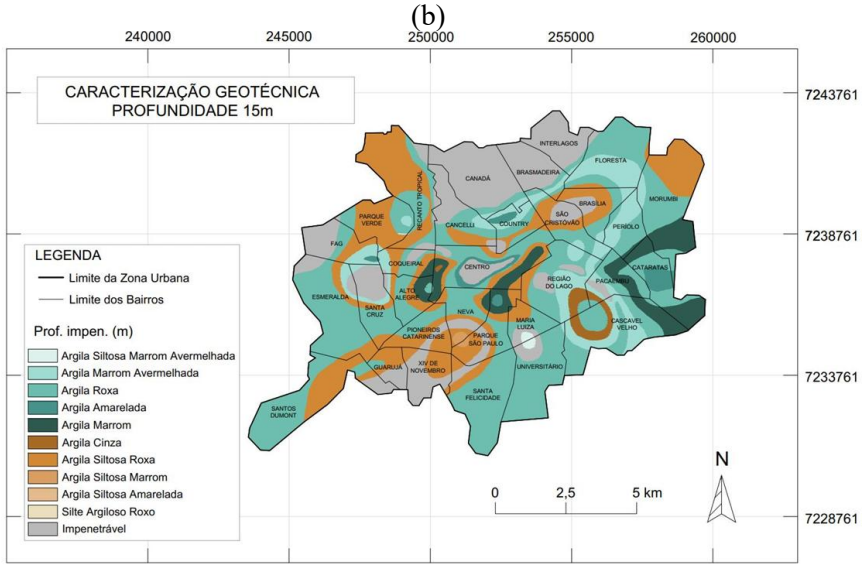
A partir do oitavo metro, iniciam-se os primeiros afloramentos do horizonte impenetrável no modelo (bairros Guarujá e XIV de Novembro). Aos 15 metros de profundidade, a matriz de argila roxa ainda é presente, mas o material impenetrável expande-se, dominando a região norte e central. Esse comportamento atesta a transição gradual do horizonte de solo residual maduro para o horizonte de rocha alterada (saprólito) e, posteriormente, para o maciço basáltico (Figura 5c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5. Painel evolutivo da estratigrafia do subsolo urbano: (a) 1 metro de profundidade; (b) 8 metros de profundidade; e (c) 15 metros de profundidade.

4 Considerações finais

A estruturação do banco de dados geoespaciais e a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem viabilizaram a elaboração de modelos preditivos consistentes para o subsolo da zona urbana de Cascavel, Paraná e elaboração de malhas de distribuição de materiais inconsolidados em subsuperfície. Da análise dos resultados e da correlação entre as variáveis geotécnicas, destacam-se as seguintes conclusões:

- O mapeamento estratigráfico confirmou a predominância de solos argilosos residuais originários do intenso intemperismo químico dos derrames basálticos do Grupo Serra Geral. Nos horizontes superficiais, predominam as argilas de coloração marrom-avermelhada e amarelada, enquanto em profundidade ocorre a consolidação de argilas roxas, evidenciando uma transição gradual e a homogeneização contínua das camadas. O topo do material impenetrável começou a ser detectado a partir dos 8 metros, expandindo-se significativamente nas cotas inferiores até os 15 metros analisados.
- A profundidade do lençol freático apresentou forte correlação espacial com a topografia e a malha hidrográfica do município. O nível d'água encontra-se a maiores profundidades nas regiões centrais e nos divisores de águas, onde as cotas altimétricas são mais elevadas, apresentando-se progressivamente mais raso nas áreas periféricas e fundos de vale. Esse comportamento indica que a superfície piezométrica absoluta da região tende a ser relativamente homogênea, acompanhando de forma suave o mergulho do relevo.
- A topografia do horizonte impenetrável acompanhou a morfologia do terreno de forma direta. Constatou-se que a espessura do pacote de solo intemperizado é expressivamente maior nas áreas de cotas elevadas. Em contrapartida, nas regiões onde a dinâmica fluvial atuou de forma mais intensa ao longo do tempo geológico, houve remoção de parte do manto de intemperismo, aproximando o material impenetrável da superfície.
- A consolidação espacial dos 361 furos de sondagem em um ambiente SIG unificado provou ser um método eficaz para a representação tridimensional da heterogeneidade do subsolo urbano. Mesmo considerando os desvios estatísticos inerentes ao processo de interpolação em zonas com menor densidade amostral de laudos, o cruzamento contínuo das variáveis espaciais fornece uma base cartográfica robusta, mitigando as incertezas preliminares de projeto e otimizando a tomada de decisão técnica para o dimensionamento de fundações e obras de contenção.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484: Solo: Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

Cavalcante, R. (2015). Apostila de Introdução ao SIG. Pró-Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento - UFMG, Mato Grosso.

Fungeo (2020). Sondagem S.P.T. Disponível em: https://www.fungeo.com.br/. Acesso em: 18 março 2025.

Lagacherie, P., McBratney, A. (2006). Digital Soil Mapping: an introductory perspective. Developments In Soil Science Series: Elsevier Science.

Leão, M. F., Paiva, G. V. C. (2018). Mecânica dos Solos Avançada e Introdução a Obras de Terra. Distribuidora Educacional S.A., Londrina.

Lopes, L. L. (2020). Análise de solo por meio de sondagem SPT: estudo de caso de uma residência de dois pavimentos em ambiente urbano. UNIS.

Martinho, F. M. C. (2017). Dimensionamento De Fundações Superficiais E Profundas De Acordo Com Os Eurocódigos - Aplicação a um Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado, Instituição Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Oliveira, J. (2018). Construção de um banco de dados geotécnicos com base em sondagens SPT e uso de ferramenta SIG: estudo de caso solos do Tocantins, com ênfase na capital Palmas - TO. Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas.

QGIS Documentation (2024). Uma breve introdução ao SIG. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.34/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. Acesso em: mai. 2024.

Soares, W. C. (2011). Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percurssão e uso de SIG: análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa-PB. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

Souza, E. G., Bazzi, C. L., Sobjak, R., Hachisuca, A. M. M., Gavioli, A., Betzek, N. M., Schenatto, K., Moreira, W., Mercante, E., Rodrigues, M. (2022). AgDataBox: web platform of data integration, software, and methodologies for Digital Agriculture. In: 15º Internacional Conference on Precision Agriculture, Minneapolis.

Teodoro, L. J. S. (2023). Manifestações Patológicas em Fundações Rasas de Concreto Armado: Uma Revisão de Literatura. Trabalho de Conclusão de Curso, UFMT, Barra do Garças.

Thiesen, S. (2016). Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: um estudo de caso em Blumenau/SC. Tese de Doutorado, UFSC, Blumenau.

Velloso, D. A. (2010). Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo e fundações. 2. ed. Oficina de Textos, 568 p. São Paulo.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/9

ESTUDO DOS FATORES CONDICIONANTES DE QUEDAS E ROLAMENTOS DE BLOCOS DE ROCHA EM MATRIZ DE MATERIAL INCONSOLIDADO

Dr.ª Larissa Regina Costa Silveira
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, larissaeng07@gmail.com

Giovana Pires Cardoso Gonçalves
Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovana.pcg1809@gmail.com

Maria Luiza Ferreira Soares
Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, marialuizafs05@gmail.com

Dr.ª Maria Giovana Parisi
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, mgparizzi18@gmail.com

RESUMO: Esse projeto tem como objetivo estudar os fatores condicionantes de quedas de blocos encrustados em matriz de solo, através de análises estatísticas e observações de campo. Um banco de dados já disponível contendo 56 taludes foi analisado, onde foram selecionadas as variáveis mais importantes para descrever a suscetibilidade a queda. Cada variável recebeu uma nota de 1 a 4, onde a nota 1 significa uma característica favorável a estabilidade, enquanto a nota 4 significa uma situação adversa. Dentre as técnicas estatísticas, a análise de agrupamento (kmeans) foi selecionada. Após análise dos resultados gerados, notou-se que o critério de agrupamento foi o somatório das notas obtidas em cada variável, possibilitando uma divisão inicial de classes de suscetibilidade. Os parâmetros mais influentes no agrupamento foram a altura do talude, o tamanho dos blocos e seu formato. As avaliações em campo foram feitas em uma encosta na cidade de Contagem (MG), onde a forte inclinação contribui para a predisposição a quedas de blocos. Além do mais, a presença de blocos grandes, densos e subangulosos potencializam o poder destrutivo, corroborando com os resultados das análises estatísticas.

PALAVRAS-CHAVE: Quedas de Blocos, Movimentos de Massa, Suscetibilidade, Taludes de Solo, Blocos em Solos.

ABSTRACT: This study investigates the conditioning factors controlling the rockfall embedded within a soil matrix through statistical analyses and field observations. An existing database comprising 57 slopes was analyzed, from which the most relevant variables describing rockfall susceptibility were selected. Each variable received a score from 1 to 4, where 1 indicates conditions favorable to stability and 4 represents adverse conditions. K-means cluster analysis was applied, and the results show that clustering was primarily governed by the cumulative sum of variable scores, enabling an initial classification of susceptibility levels. The most influential parameters were slope height, as well as block size and shape. Field investigations conducted on a slope in Contagem, Minas Gerais, Brazil, indicate that steep slope geometry increases the predisposition to rockfall. Additionally, the presence of large, dense, and subangular blocks enhances the destructive potential, corroborating the statistical findings.

KEYWORDS: Rockfall, Mass Moviment, Susceptibility, Soil Slopes, Blocks in Soils.

1 INTRODUÇÃO

Quedas de blocos são movimentos de massa rápidos e com grande poder destrutivo. Podem acontecer tanto em maciços rochosos quanto em materiais inconsolidados, como solos com blocos encrustados. Sendo assim, alguns pesquisadores, engenheiros e geólogos, vêm propondo, ao longo dos anos, metodologias de análise de perigo e de risco para esse tipo de movimento de massa, como é o caso de Silveira et al. (2024), Santi et al. (2009) e Pierson et al. (1990). Em comum, essas metodologias citadas são direcionadas para taludes rodoviários.

Entende-se por risco, um produto da probabilidade de um evento acontecer pelas suas consequências, onde a probabilidade está relacionada com a suscetibilidade, enquanto a consequência é função da vulnerabilidade. A suscetibilidade pode ser resumida como uma predisposição de um maciço em se movimentar, majoritariamente devido as suas caratcerísticas geológicas e geotécnicas. Mais detalhes sobre esses conceitos podem ser encontrados em Fell et al. (2008) e Brasil (2007).

Justamente devido a complexidade das quedas de blocos, para estudar esse tipo de movimento e propor metodologias de análise de suscetibilidade, perigo e risco, é necessário compreender as particularidades do maciço e do ambiente envolvido. Diante disso, o objetivo desse trabalho é estudar os fatores condicionantes de quedas de blocos para os casos em que esses blocos estão em matriz de solo, a fim de dar subsídios para a elaboração futura de uma metodologia de análise de suscetibilidade e risco para esse tipo de maciço. Para isso, aliou-se o estudo estatístico em um banco de dados referente a queda de blocos em rodovias do Colorado (Estados Unidos) com avaliações de campo em um talude na cidade de Contagem (Minas Gerais, Brasil), sendo que o estudo estatístico apontou as variáveis mais relevantes, dentre as contidas no banco de dados do Colorado, enquanto as avaliações de campo mostraram quais eram as características mais críticas do talude estudado no Brasil.

2 METODOLOGIA

Na Figura 1 está o fluxograma do metodologia desenvolvida, explicada adiante.



Figura 1. Fluxograma do trabalho.

2.1 Avaliação do banco de dados

O banco de dados avaliado nesse trabalho foi utilizado previamente por Santi et al. (2009) e disponibilizado pelo mesmo autor. É composto por mais de 300 taludes de rodovias do Colorado (EUA), sendo 224 taludes em rochas cristalinas, 74 taludes em rochas sedimentares e 56 taludes cujos blocos de rocha estão encrustados em material inconsolidado (solo), sendo esse último caso o foco dessa pesquisa.

Para os 56 taludes de blocos em solos contidos no banco de dados, diversas variáveis foram avaliadas e já estavam pontuadas com notas entre 3 a 81 (3, 9, 27 e 81), conforme os critérios estabelecidos pelo Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) (Santi et al., 2009), onde as condições mais favoráveis a segurança pontuavam 3 e as mais desfavoráveis, 81. Dentre as variáveis pontuadas, se destacam aquelas relacionadas à geometria do talude, condições climáticas, tamanho e forma dos blocos, condições de vegetação, condições de tráfego e características das rodovias e área de captação de blocos nas rodovias.

Como o intuito dessa pesquisa é determinar os principais fatores condicionantes de quedas de blocos em taludes cujos blocos estão encrustados em solo, o primeiro passo desse trabalho foi verificar no banco de dados original quais as variáveis estão relacionadas com a suscetibilidade a esse movimento e que podem ser observadas em qualquer talude nesse tipo de maciço, independente da localização geográfica. Logo, variáveis

relacionadas a rodovias e tráfego foram descartadas, bem como variáveis relacionadas a ciclos de congelamento e descongelamento. Na Tabela 1 consta as variáveis selecionadas, a sigla adotada, além da pontuação atribuída de acordo com as características. Não foi feita qualquer modificação referente aos critérios de pontuação das variáveis e suas características, preservando aquilo que já havia sido adotado por Santi et al. (2009). Nas variáveis selecionadas, os valores das pontuações 3, 9, 27 e 81 foram substituídas respectivamente por 1, 2, 3 e 4, a fim de facilitar as análises estatísticas. A variável Escore de inclinação do talude (Inc) pode ser obtida através do ábaco proposto por Maerz et al. (2005) (Figura 2).

Tabela 1. Variáveis selecionadas para compor o banco de dados (adaptado de Santi et al., 2009).

Nota CRHRS (Nota modificada)	3 (1)	9 (2)	27 (3)	81 (4)
Altura do Talude (m) - H	7,5 a 15	15 a 23	23 a 30	> 30
Frequência de queda – Freq	> 2 anos	1 a 2 anos	sazonal	o ano todo/eventos severos
Escore de inclinação do talude - Inc	0 a 2	2 a 4	4 a 8	> 8
Irregularidade na superfície do talude - Irreg	Nenhuma	Menores	Maiores	Extremas
Precipitação anual (mm) - Precip	< 250	250 a 500	500 a 900	> 900
Condição de água – H2O	Talude seco	Úmido	Gotejando	Com fluxo
Tamanho do Bloco (m) - Size	Até 0,3	0,3 a 0,6	0,6 a 1,2	> 1,2
Forma do bloco - Forma	Tabular	Maciço/compacto	Compacto angular	Arredondado
Vegetação - Veg	Vegetado	Desigual	Plantas isoladas	Nenhuma

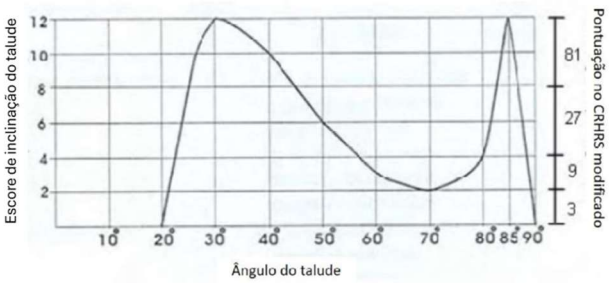


Figura 2. Ábaco de Maerz et al. (2005) para determinar o escore referente à inclinação do talude pelo CRHRS modificado (adaptado de Santi et al., 2009).

Com as variáveis selecionadas, o segundo passo foi verificar a adequabilidade da banco de dados para aplicação das tecnicas de estatística multivariada. Nessa etapa foi avaliado se o número de amostras é pelo menos 5 vezes maior que o número de variáveis (Hair et al., 2009), se o banco de dados possui variabilidade e se as variáveis são correlacionadas. A inspeção quanto ao tamanho da amostra e de sua variabilidade foi visual e gráfica. Para verificar se as variáveis são correlacionadas, foi aplicado o Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951). Se o p-valor do teste for menor que 0,05, pode-se considerar, com 95% de confiança, que a matriz de correlação das variáveis é diferente da matriz identidade e, portanto, os dados são correlacionados.

2.2 Análise de agrupamento

A análise de agrupamento foi feita com o objetivo de verificar se há algum padrão de agrupamento das amostras e qual é esse padrão, além das variáveis mais influentes. A análise foi feita através do método de

otimização *kmeans*, que é método das médias ou centroides móveis, onde cada grupo é representado pelo centroide, que nesse caso é a média dos dados pertencentes a cada grupo.

Considerando um número *k* de grupos determinado previamente, o algoritmo agrupa os indivíduos ao seu centroide mais próximo através de cálculos de distâncias. Um maior detalhamento matemático sobre análise de agrupamento pode ser encontrado em Everitt et al. (2011) e Kassambara (2017). Todas as análises estatísticas nesse trabalho, incluindo os testes, foram feitas utilizando o *freeware* R (R Core Team, 2023).

Similar ao que foi feito por Silveira (2022) e Silveira et al. (2024), para o caso da análise de agrupamento, o número *k* de grupos foi determinado pela "regra da maioria", através da função fviz_nbclust(), do pacote NbClust (Charrad, et al., 2015) do software R, em que o melhor valor de *k* é aquele apontado como o ótimo pela maioria, dentre os 30 testes inseridos nessa função. A análise de agrupamento foi feita através da função *eclust() do* pacote *factoextra* (Kassambara & Mundt, 2020). Os resultados foram exportados para o Excel, onde foi possível identificar o padrão de agrupamento, bem como as variáveis que foram mais importantes.

2.3 Avaliação de campo

As avaliações de campo foram feitas no âmbito do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) para a cidade de Contagem, Região Metropolitana de Belo Horizonte (Minas Gerais), nos anos de 2024 e 2025. A região escolhida é conhecida como Vila Morro dos Cabritos, que possui encostas com risco geológico alto e muito alto, onde um dos problemas é queda e rolamento de blocos de rocha encrustados em matriz de solo. O objetivo de utilizar as informações coletadas em campo foi de verificar se as variáveis apontadas na análise estatística como mais influentes nesse tipo de processo estudado são condizentes com o que foi observado como mais crítico nessas encostas, além de verificar outros parâmetros que são importantes, mas que não constavam no banco de dados utilizado nesse trabalho.

De acordo com o Relatório 2 do PMRR de 2024 (PMRR, 2024), a Vila Morro dos Cabritos está inserida em um morro residual da região morfológica conhecida como Depressão Belo Horizonte, com topos entre 960 e 970 m de altitude. As encostas avaliadas têm cerca de 50 metros de altura e inclinação média entre 20 e 45 graus; porém há locais com inclinação maior que 45 graus. A Figura 3 mostra um esquema geológico-geomorfológico do Morro dos Cabritos. Observa-se na região que o manto de alteração é formado por um material avermelhado a amarelo claro gerado pelo intemperismo de gnaisses, sobreposto por um material vermelho escuro, típico de alteração de rochas básicas. É possível observar ocorrência de blocos métricos a seixos subangulosos.

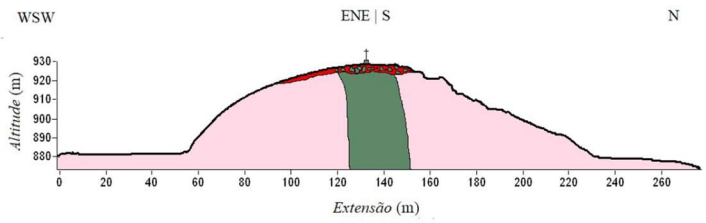


Figura 3. Esquema Geológico-Geomorfológico do Morro dos Cabritos ao longo da seção WSW-ENE / S-N, com identificação do manto de alteração de gnaisse (rosa), intrusão de rocha ultramáfica (verde) e colúvio da alteração da rocha ultramáfica (vermelho escuro) (PMRR, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação do banco de dados

Conforme mencionado no item 2.1, o banco de dados conta com 56 taludes e 9 variáveis. Sendo assim, o número de amostras é mais que 5 vezes maior que o número de variáveis, atendendo ao mínimo recomendado de acordo com Hair et al. (2009). Além do mais, o Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951) apontou

um p-valor igual a $1{,}44 \times 10^{-4}$, logo, pode-se considerar que as variáveis são correlacionadas e, portanto o banco é adequado para análises de estatística multivariada. A variabilidade do banco de dados foi avaliada através de gráfico de frequência em barras (Figura 4).

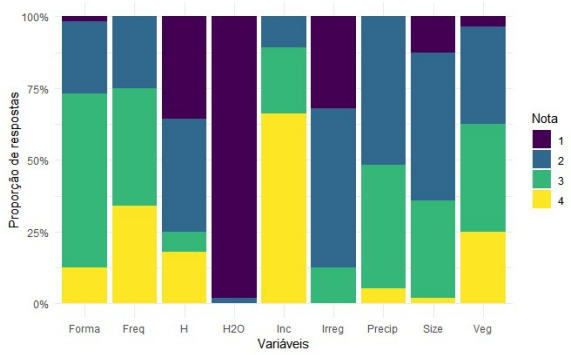


Figura 4. Gráfico de frequência de notas para as variáveis do banco de dados.

Algumas variáveis contam com taludes que pontuam em todas as notas de 1 a 4, como é o caso das variáveis forma (Forma) e tamanho dos blocos (Size), altura do talude (H) e vegetação (Veg). No entanto, as notas não são distribuídas de forma balanceada, sendo algumas notas consideravelmente mais frequentes que outras. Além do mais, alguns parâmetros não possuem variabilidade adequada, como a variável água (H2O), onde quase todos os indivíduos possuem nota 1. De todo modo, dada a importância de todas as variáveis contidas no banco e considerando que essa pesquisa ainda está em estágio exploratório, opotou-se por manter todas as variáveis.

3.2 Análise de agrupamento

A análise de agrupamento foi feita conforme explicado no tem 2.2. O número ótimo de grupos (k) apontado pela "regra da maioria" foi 3, sendo assim, esse foi o valor de k adotado para a análise. O resultado gerado pelo algoritmo no R (R Core Team, 2023) foi exportado para o Excel, onde foi possível identificar que o padrão de agrupamento foi o somatório das notas das variáveis.

O grupo 1 (G1) gerado pelo algoritmo é composto por 20 taludes, cujo somatório de notas ficou majoritariamente entre 20 e 22 pontos. O grupo 2 (G2) é composto por 18 taludes em que o somatório da maioria das notas é a partir de 23 pontos. No grupo 3 (G3) restaram 18 taludes cujas notas estavam, em maioria, entre 17 e 20. Como as notas maiores para as variáveis (Tabela 1) são as mais críticas, pode-se considerar que somatórios maiores representam taludes mais suscetíveis a apresentar queda de blocos, enquanto os menores somatórios indicam que as condições dos taludes não são tão adversas, ou seja, a suscetibilidade é baixa. Diante disso, pode-se considerar que o critério de agrupamento indica, preliminarmente, uma classificação quanto a suscetibilidade a quedas e rolamentos de blocos nos taludes presentes no banco de dados, sendo o G3 o grupo de baixa suscetibilidade, o G1 de média suscetibilidade e o G2 de alta suscetibilidade.

No G2 (alta suscetibilidade), a maioria dos taludes obtiveram notas 3 e 4 nas variáveis altura do talude, forma dos blocos, tamanho dos blocos e vegetação. No G3 (baixa suscetibilidade), ocorreu o oposto para as variáveis altura e tamanho dos blocos, onde praticamente todos os taludes tiveram notas 1 ou 2. Isso indica que as variáveis altura do talude e tamanho dos blocos foram as mais relevantes para definir os critérios de agrupamento, seguidas por forma dos blocos e vegetação.

Geotecnicamente, o resultado da análise de agrupamento faz sentido, visto que encostas mais altas e com grandes blocos podem ser mais propensas a movimentações. O fato de essas encostas não estarem vegetadas adequadamente pode contribuir para processos erosivos e descalçar os blocos, que, quanto mais arredondados, maior a facilidade para se movimentarem. No entanto, deve-se levar em consideração algumas observações importantes quanto ao banco de dados, sobretudo em relação aos problemas de variabilidade.

Ao observar a Figura 4, nota-se que as únicas variáveis que possuem indivíduos pontuando em todas as notas são exatamente as mesmas que foram mais relevantes para definir o agrupamento, ou seja, altura do talude, tamanho e forma dos blocos e vegetação. As demais variáveis, embora importantes, não foram tão relevantes em termos estatísticos justamente devido a variabilidade, por terem muitos indivíduos com a mesma

nota. Um exemplo interessante para ilustrar essa situação é a variável inclinação do talude (Inc). No grupo de alta suscetibilidade, a maioria dos taludes tiveram nota 3 e 4 em Inc, mas ao observar a Figura 4, a maioria dos taludes do banco de dados possuem nota 3 ou 4, logo, a contrubuição estatística não é representativa.

Um outro problema do banco de dados que pode ter impactado o resultado e até mesmo a própria variabilidade é o tamanho do banco. Como o banco de dados é composto por 9 variáveis pontuando de 1 a 4, o somatório mínimo possível seria 9 e o máximo, 36. No entanto, no banco de dados só existem taludes pontuando entre 17 e 28. Talvez, com um banco de dados mais extenso, mais tipos de taludes poderiam ter sido considerados, aumentando a variabilidade e alterando o resultado. De todo modo, a análise de agrupamento se mostrou uma ferramenta relevante para análise exploratória das variáveis mais importantes do processo e também promissora para análises posteriores, já com foco em classificação de taludes quanto a suscetibilidade a movimentações. Ressalta-se que a análise estatística foi feita considerando apenas os taludes do Colorado. Taludes de Contagem não estão no banco de dados.

3.3 Avaliação de campo

De forma geral, os processos geológicos mais comuns no Morro dos Cabritos são quedas de blocos, deslizamentos e erosões, por vezes associados. Observa-se na região, devido ao processo de urbanização, diversos cortes verticalizados que expõem os blocos de rocha encrustados no solo residual, bem como a presença de depósito de tálus mais instável, formado por blocos removidos de um determinado local e lançados sem planejamento em outro local. Ressalta-se que esses blocos são densos e subangulosos. Na Figura 5a está a vista parcial de um corte vertical que mostra os blocos expostos em uma das áreas mapeadas como risco muito alto; na Figura 5b é possível ver um bloco arredondado rolado em um beco de uma região mapeada como risco alto. Todas essas informações integram os estudos realizados pela equipe da Universidade Federal de Minas Gerais para o PMRR 2024/2025 de Contagem (MG).



Figura 5. a) Blocos encrustados em solo expostos devido a corte vertical; b) Bloco arredondado rolado em área residência (PMRR, 2024).

O solo vermelho de intemperismo dos diques e blocos de rochas básicas possui uma estrutura agregada, o deixando mais poroso e permeável. Os solos residuais de gnaisse são silto-arenosos, pouco permeáveis e pouco coesos, o que os torna suscetíveis à erosão superficial. O ponto de contato entre esses dois tipos de solo, além de ser uma descontinuidade natural do maciço, facilita a percolação de água, intensificando a erosão, o que ajuda no processo de descalçamento e exposição dos blocos. A água nesse local também aumenta a poropressão, estimulando escorregamentos. Com isso, tem acontecido ao longo do tempo o recuo do Morro dos Cabritos, resultando em escarpas elevadas propensas a deslizamentos volumosos de solo e quedas de blocos.

As avaliações de campo no Morro dos Cabritos mostram o quanto o processo de quedas e rolamento de blocos é complexo e multifatorial, dependente não só da geologia do local, mas também do histórico de urbanização. Dentre todos os fatores atuando juntos, nota-se que a geometria das encostas, bem como o tamanho e o formato dos blocos são variáveis importantes, visto que regiões mais escarpadas e com mais blocos maiores e, portanto, mais pesados se mostraram mais propensas a problemas. Blocos mais arredondados se deslocam com mais facilidade por longas distâncias. Isso corrobora com os resultados encontrados nas análises estatísticas.

A percolação de água é fundamental para que ocorram processos erosivos, que expõem os blocos, além de contribuir com deslizamentos ao aumentar a poropressão do maciço. Nas análises estatísticas a água não foi relevante devido à baixa variabilidade dessa variável no banco de dados. Também deve-se considerar a presença das estruturas geológicas, contatos litológicos e propriedades mecânicas dos materiais. Essas variáveis não estavam presentes no banco de dados, mas devem ser levadas em consideração em análises mais detalhadas sempre que possível.

A indicação da suscetibilidade desse talude de acordo com a classificação sugerida pela análise de agrupamento não foi feita, visto que a classificação apresentada ainda é preliminar e precisa de refinamento. Além do mais, para classificar os taludes da região de Contagem estudada nesse trabalho, é necessário um levantamento e medição mais exata das variáveis inseridas na Tabela 1, o que será feito futuramente.

4 CONCLUSÕES

Quedas e rolamentos de blocos são movimentos de massa complexos e dependentes de diversos fatores que vão além da geologia. Os estudos estatísticos e de campo realizados nesse trabalho apontam, em comum, que a geometria do talude, o tamanho e a forma dos blocos são variáveis fundamentais para classificar um talude com blocos encrustados em solos quanto à suscetibilidade à queda. No entanto, é importante também que seja levado em consideração a presença e percolação de água e as características mecânicas do maciço, visto que esses fatores são relevantes para o estudo da erodibilidade de solos e exposição de blocos e também escorregamentos.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma revisão dos parâmetros selecionados do banco de dados do Colorado. Variáveis com pouca variabilidade não possuem contribuição relevante em análises estatísticas, logo, poderiam ser retiradas, mesmo que geotecnicamente sejam importantes, como é o caso da variável Água nesse banco de dados. Além do mais, é importante rever a caracterização dos parâmetros adotados no CRHRS e fazer as adaptações necessárias. Por exemplo, a variável Inclinação do Talude no CRHRS tem um viés de distância de alcance dos blocos (Maerz et al., 2005) que já se desprenderam e isso se relaciona mais com as consequências da queda do que com a suscetibilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Secretaria Nacional de Periferias do Ministério das Cidades pela oportunidade e apoio, à equipe do PMRR de Contagem (MG) – UFMG 2024/2025, à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sobretudo à Pro-Reitoria de Pesquisa e ao Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) do Instituto de Geociências da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bartlett, M. S. (1951). The Effect Of Standardization On A Chi Square Approximation In Factor Analysis. *Biometrika*; 38:337 44.

BRASIL. Ministério das Cidades; IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (2007) *Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.* Brasília: MCidades; IPT, 2007. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/ publicacoes/publicacoes-periferias. Acesso em 10 fev. 2026.

Charrad M.; Ghazzali N.; Boiteau V.; Niknafs A. (2015). *Nbclust: Determining The Best Number Of Clusters In A Data Set*. R Package, Version 3.0. In: Https://CRAN.Rproject. Org/Package=Nbclust.

Everitt, B. S.; Landau, S.; Leese, M.; Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*. 5ª Ed. Chichester: Wiley. 330 P. ISBN: 978-0-470-74991-3.

Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. (2008). Guidelines For Landslide Susceptibility, Hazard And Risk Zoning For Land Use Planning. *Engineering Geology* 102 (2008) 85 98. www.elsevier.com/locate/enggeo.

Hair, J.F.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. (2009). *Análise Multivariada De Dados*. Porto Alegre: Bookman, 688 P.

Kassambara, A. (2017) *Practical Guide to Cluster Analysis In R Unsupervised Machine Learning*. London: STHDA.

Kassambara, A. and Mundt, F. (2020) *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses*. https://CRAN.R-project.org/package=factoextra

Maerz, N.H.; Youssef A., Fennessey, T.W. (2005) New Risk-Consequence Rockfall Hazard Rating System For Missouri Highways Using Digital Image Analysis. *Environmental And Engineering Geoscience* 11, 229 249 2005.

Pierson, L. A.; Davis, S. A. Van Vickle, R. (1990). *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual Federal Highway Administration (FHWA)*, Report FHWA OR- EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. Of Transp.

PMRR - Plano Municipal de Redução de Riscos. (2024) *Relatório 2: Mapeamento de Riscos de Contagem (MG).* Universidade Federal de Minas Gerais. Periferia Sem Risco. Ministério das Cidades.

R Core Team (2023). R: *A Language And Environment For Statistical Computing*. R Foundation For Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.r project.org/.

Santi, P. M.; Russel, C. P.; Higgins, J. D.; Spriet, J. I. 2009. Modification and Statistical Analysis of The Colorado Rockfall Hazard Rating System. *Engineering Geology* 104 (2009) 55 65.

Silveira, L. R. C. (2022) *Proposta de sistema de análise de risco para queda de blocos em taludes rodoviários*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas/ UFOP, 170 p.

Silveira, L.R.C., Lana, M.S. & dos Santos, T.B. (2024) A Quantitative Rockfall Risk Analysis System for Highway Rock Slopes. *Geotech Geol Eng* **42**, 1131–1152. https://doi.org/10.1007/s10706-023-02609-z

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/10

Influência do Intemperismo nas Propriedades Geotécnicas e Geomecânicas de Filitos Relevantes à Estabilidade de Taludes

Rainara Teixeira Viana
Estudante de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, rainara.viana@ufv.br

Márcio Fernandes Leão
Professor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, marcio.leao@puc-rio.br

Dênis Araújo Massardi
Estudante de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, denis.massardi@ufv.br

Thaynara Claudyane Castro Sales
Estudante de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, thaynara.sales@ufv.br

Eduardo Antonio Gomes Marques
Professor Titular, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em maciços rochosos é influenciada pelo intemperismo, que promove a degradação progressiva das propriedades geomecânicas e afeta a segurança das estruturas. Diante da carência de dados geotécnicos na literatura sobre filitos, rochas frequentes em Minas Gerais, este estudo avaliou a influência do grau de alteração nas propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas de amostras de filito da Formação Batatal coletadas na região de Belo Horizonte. A metodologia envolveu a caracterização de diferentes graus de intemperismo (W1 a W2/W3) e variações texturais, por meio de ensaios de índices físicos, e de propagação de ondas ultrassônicas e de carga pontual. Os resultados indicaram aumento da porosidade e redução significativa da resistência mecânica, com decréscimo de até 96,8% no índice de carga pontual entre W1 e W2 para amostras de textura fina, além da estabilização das propriedades dinâmicas na transição para W2/W3. A compreensão dessas alterações é fundamental para a avaliação do comportamento mecânico de maciços rochosos em taludes escavados em filitos. Por fim, analisou-se a relação entre a velocidade de propagação da onda P e o índice de carga pontual, visando investigar o potencial de ensaios não destrutivos na estimativa preliminar da resistência mecânica do material.

PALAVRAS-CHAVE: Filitos, Intemperismo, Propriedades Geomecânicas.

ABSTRACT: Slope stability in rock masses is influenced by weathering processes, which promote the progressive degradation of geomechanical properties and affect structural safety. Given the scarcity of geotechnical data in the literature on phyllites, rocks frequently occurring in Minas Gerais, this study evaluated the influence of weathering degree on the physical, mechanical, and dynamic properties of phyllites from the Batatal formation collected in the Belo Horizonte region. The methodology involved the characterization of different weathering degrees (W1 to W2/W3) and textural variations through physical index tests, ultrasonic wave velocity measurements, and point load tests. The results indicated an increase in porosity and a significant reduction in mechanical strength, with a decrease of up to 96.8% in the point load index between W1 and W2 for fine-textured samples, as well as a stabilization of dynamic properties during the transition to W2/W3. Understanding these changes is essential for evaluating the mechanical behavior of rock masses in phyllite slopes. Finally, the relationship between P-wave velocity and the point load index was analyzed to investigate the potential of non-destructive testing for the preliminary estimation of the mechanical strength of the material.

KEYWORDS: Phyllites, Weathering, Geomechanical Properties.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes em maciços rochosos está diretamente relacionada ao equilíbrio entre as tensões atuantes e a resistência ao cisalhamento, tanto da matriz rochosa quanto das descontinuidades presentes no maciço. Conforme discutido por Wyllie e Mah (2004), a segurança de obras geotécnicas, civis e de mineração depende da adequada determinação desses parâmetros geomecânicos, uma vez que os autores alertam que avaliações imprecisas da resistência do material podem levar tanto à ocorrência de rupturas quanto à adoção de soluções excessivamente conservadoras, com consequências técnicas e econômicas significativas. Nesse contexto, a caracterização das propriedades físicas e mecânicas do maciço rochoso assume papel central nos estudos de estabilidade de taludes.

Entretanto, esses parâmetros não permanecem constantes ao longo do tempo, pois são afetados pela ação do intemperismo (Wyllie e Mah, 2004). Esse processo promove, de forma gradual, a transformação da rocha sã em solo residual, ocasionando alterações significativas em seus índices físicos e mecânicos, conforme a classificação proposta por Ulusay e Hudson (2007). Estudos realizados em filitos da região de Santa Bárbara – MG, como o de Lopes et al. (2007), indicam que o avanço do grau de alteração está associado ao aumento da porosidade e à redução do peso específico aparente seco. Segundo esses autores, o acréscimo no volume de vazios favorece a percolação de água no maciço, intensificando os mecanismos de desintegração física e resultando em uma redução expressiva da coesão, o que compromete a resistência ao cisalhamento do maciço ao longo do tempo.

No contexto geológico brasileiro, observa-se a ocorrência de uma ampla variedade de rochas brandas, dentre as quais o filito se destaca pelo seu comportamento geotécnico complexo, conforme discutido por Lopes et al. (2007) em estudos desenvolvidos em contexto regional. Por se tratar de uma rocha metamórfica com foliação bem definida, esse material apresenta anisotropia mecânica significativa, tendo seu comportamento fortemente condicionado pela orientação da xistosidade, como apontado por Andrade e Saraiva (2010). Apesar de sua frequente aplicação em obras de infraestrutura, Lopes et al. (2007) destacam a existência de uma carência recorrente de dados geotécnicos associados a essas rochas brandas, em grande parte em função das dificuldades de amostragem em materiais alterados e estruturalmente heterogêneos.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de ensaios experimentais, a influência do intemperismo nas propriedades físicas e mecânicas de filitos da Formação Batatal coletados na região de Belo Horizonte-MG, estabelecendo correlações entre índices físicos, como porosidade e absorção, e parâmetros associados à resistência mecânica e à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Busca-se, assim, contribuir para a compreensão da variação das propriedades do filito ao longo do tempo, de modo a fornecer subsídios para análises de estabilidade de taludes mais consistentes e alinhadas às incertezas de projeto apontadas por Wyllie e Mah (2004) e Lopes et al. (2007).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletados blocos de filito em um maciço rochoso localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 1). A amostragem teve como objetivo selecionar conjuntos de filitos representativos de diferentes graus de intemperismo, classificados como W1, W2 e W2/W3, de acordo com a classificação visual e tátil proposta por Ulusay e Hudson (2007). No total, foram obtidos cinco grupos de blocos, diferenciados não apenas pelo grau de alteração, mas também pela granulometria e aspecto dos grãos minerais.

A preparação dos corpos de prova seguiu as recomendações da International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1985), adotando-se o método de fragmentos irregulares com objetivo de superar limitações práticas na preparação de corpos de prova a partir de blocos de rocha. Os ensaios foram realizados em amostras com dimensões características médias de 71,57 ± 4,98 mm de comprimento, 50,83 ± 4,62 mm de altura e 53,5 ± 5,37 mm de largura. A sequência experimental foi definida de modo a priorizar os ensaios não destrutivos, seguidos pelos ensaios destrutivos e pela determinação dos índices físicos.



Figura 1. Vista do talude estudado evidenciando o perfil de intemperismo do maciço.

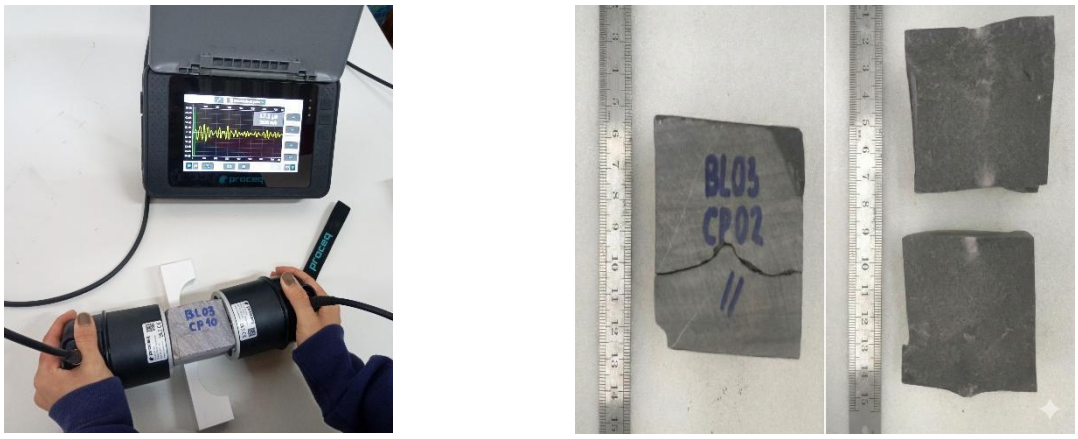
A caracterização dinâmica das amostras foi realizada por meio do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, utilizando o equipamento Pundit 200 (Figura 2.a), equipado com transdutores de 250 kHz para a determinação da velocidade das ondas primárias (Vp) e de 40 kHz para as ondas secundárias (Vs). Na determinação dos valores de Vp, utilizou-se gel para assegurar o acoplamento entre os transdutores e a superfície das amostras. Por se tratar de um método não destrutivo, este ensaio foi realizado antes dos demais, de modo a preservar a integridade dos corpos de prova. Ressalta-se que os ensaios ultrassônicos não consideraram controle direcional em relação à foliação, refletindo uma resposta dinâmica média do material.

A resistência mecânica das amostras foi determinada por meio do ensaio de carga pontual (Point Load Test – PLT), realizado conforme as recomendações da ISRM (1985), utilizando um equipamento hidráulico Wille Geotechnik, modelo LP 4295 (capacidade nominal de 100 kN). Os ensaios foram com aplicação de carga de forma contínua até a ruptura do material (Figura 2.b). A partir da carga máxima aplicada no momento da ruptura e da distância entre as pontas cônicas, foi calculado o índice de carga pontual (Is), posteriormente corrigido para um diâmetro de referência de 50 mm, resultando no índice $Is_{(50)}$.

Para as amostras W1-F, W2-F, W2-M e W2-G, o carregamento foi aplicado paralelamente aos planos de descontinuidade. Entretanto, para os corpos de prova W2/W3-F, os resultados dos ensaios nas direções paralela e perpendicular foram desconsiderados, uma vez que não atenderam aos critérios de validade estabelecidos pela ISRM, como tempo de ruptura inferior a 10 s ou superfícies de fratura que não interceptavam os pontos de aplicação da carga.

Os índices físicos foram determinados a partir dos fragmentos resultantes do ensaio de carga pontual, conforme recomendações de Ulusay e Hudson (2007). Para cada amostra, utilizaram-se dez fragmentos com massa mínima de 50 g. Devido à maior suscetibilidade dos filitos à desagregação durante a saturação, os fragmentos foram envolvidos em malha permeável (Figura 3), cuja massa foi previamente determinada e descontada das medições finais. A saturação foi realizada em dessecador sob vácuo da ordem de 8 Torr, por no mínimo 1 h. Em seguida, procederam-se às pesagens nas condições submersa e saturada com superfície seca. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por pelo menos 24 h para determinação da massa seca. Com base nas massas seca, saturada e submersa, calcularam-se a porosidade aparente, a absorção de água e a massa específica aparente seca.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado por meio do Intervalo Interquartil (IQR), método utilizado para a identificação e exclusão de valores discrepantes (outliers) do conjunto amostral.



(a) (b)

Figura 2. Ensaios de laboratório: (a) ondas ultrassônicas; (b) fragmentos após o PLT.



(a) (b)

Figura 3. Preparação dos fragmentos para determinação dos índices físicos: (a) fragmentos envolvidos em malha permeável; (b) disposição das amostras no dessecador.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o quantitativo (n) de corpos de prova utilizados em cada ensaio e a síntese estatística dos resultados das propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas dos filitos analisados. Os dados estão organizados de acordo com os graus de alteração (W1, W2 e W2/W3) e textura – fina (F), média (M) e grosseira (G) –, possibilitando a comparação do comportamento do material. Para cada parâmetro – porosidade aparente (η), absorção de água (α), massa específica aparente seca (ρ_d), índice de carga pontual ($Is_{(50)}$) e velocidades de propagação de ondas (Vp e Vs) – são apresentados os valores médios e os respectivos desvios padrão, os quais refletem a variabilidade amostral condicionada pelo grau de alteração.

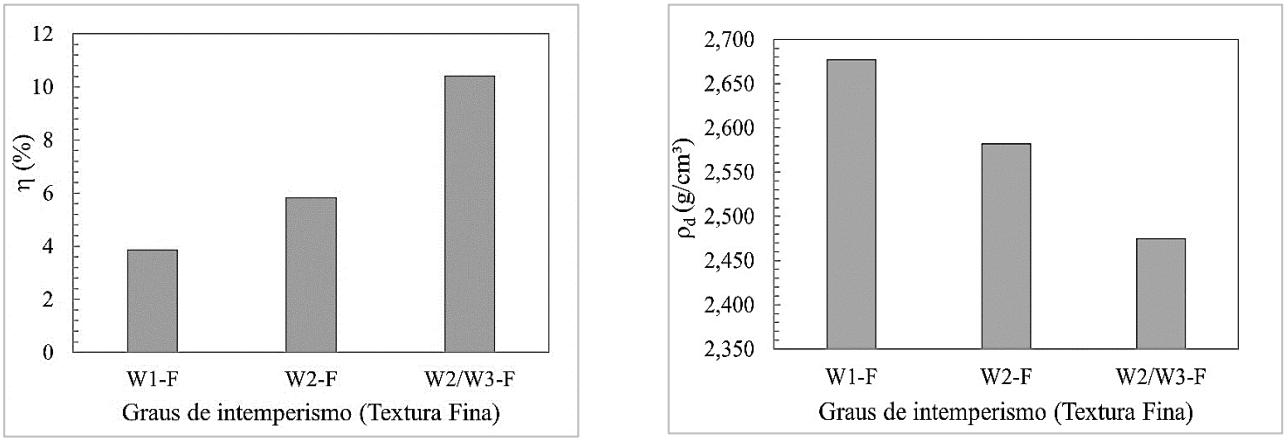
Tabela 1. Síntese estatística das propriedades físicas, mecânicas e dinâmicas dos filitos.

Identificação	n (V_p,V_s / Is)	η (%)	α (%)	ρ_d (g/cm³)	$Is_{(50)}$ (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
W1-F	11 / 11	3,86	1,44	2,677	13,54 ± 2,01	5518 ± 555	3694 ± 285
W2-F	5 / 5	5,83	2,26	2,582	0,43 ± 0,27	2702 ± 149	1962 ± 208
W2-M	8 / 8	10,05	4,19	2,398	2,58 ± 0,72	1361 ± 208	1261 ± 154
W2-G	10 / 9	5,12	1,93	2,650	1,65 ± 0,82	1674 ± 413	1490 ± 309
W2/W3-F*	8 / 0	10,41	4,21	2,475	-	2572 ± 237	2019 ± 204

* Os ensaios de carga pontual foram desconsiderados por não atenderem aos critérios da ISRM (1985).

3.1 Variação com o Grau de Intemperismo

A Figura 4 apresenta a variação da porosidade (η) e da massa específica aparente seca (ρ_d) para amostras de textura fina, comparando os graus de intemperismo W1, W2 e W2/W3.



(a) (b)

Figura 4. Índices físicos em função do intemperismo: (a) porosidade; (b) massa específica aparente seca.

O avanço do intemperismo promoveu aumento progressivo da porosidade, que quase triplicou da classe W1 para W2/W3, acompanhado por redução da massa específica aparente seca. Esse comportamento é compatível com resultados reportados por Lopes et al. (2007) para filitos da Mina Córrego do Sítio e reflete a degradação da estrutura rochosa ao longo do processo intempérico. Esse aumento expressivo da porosidade é consistente com a intensificação da rede de microfraturas e a abertura de descontinuidades ao longo da foliação, fenômenos que Carvalho (2019) aponta como crescentes com o avanço da alteração.

Adicionalmente, o valor de ρ_d obtido para a classe W1 foi superior aos valores de referência reportados por Andrade e Saraiva (2010) para filitos W1/W2 (2,365 a 2,650 g/cm³). Esse resultado indica que, no estágio inicial, o material preserva sua integridade mineralógica. Seguindo essa tendência, o conjunto W2/W3 apresenta resultados que se inserem no intervalo proposto pelos autores para filitos de grau W3 (1,876 a 2,528 g/cm³). A concordância entre os valores obtidos e os intervalos de referência reforça a consistência da classificação adotada e reflete a evolução dos parâmetros físicos associados à degradação.

Em contrapartida, as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas apresentaram um comportamento não linear com o avanço do intemperismo (Figura 5). As amostras com menor grau de intemperismo (W1-F) registraram um valor médio de Vp expressivamente superior aos observados para as amostras W2-F e W2/W3-F. A magnitude dos valores de velocidade de onda Vp obtidos se mostra compatível com a amplitude dos intervalos reportados por Andrade e Saraiva (2010) para filitos em estados de conservação equivalentes (1.810 a 5.323 m/s para o grau W1/W2 e 1.530 a 3.208 m/s para o W3).

A análise conjunta das propriedades mecânicas e dinâmicas evidencia um decaimento acentuado dos valores na transição do grau de alteração W1 para W2. Observou-se reduções de 51,0% em Vp e 46,9% em Vs, acompanhadas por uma queda de 96,8% em $Is_{(50)}$ para a textura fina (W1-F para W2-F). Em contraste, a passagem de W2 para W2/W3 é marcada por uma estabilização das propriedades dinâmicas, caracterizada por uma redução pouco expressiva, de 4,8%, em Vp; e por um incremento, de 2,9%, em Vs. Tal comportamento é compatível com o fato de a classe W2/W3 representar um estágio de transição de intemperismo entre os estados W2 e W3, não configurando ainda um grau plenamente alterado, o que se reflete na manutenção de propriedades dinâmicas próximas às observadas no estado W2.

Na transição de W2-F para o grau W2/W3-F, observou-se uma tendência de estabilização de ambas as velocidades, mesmo com o incremento da porosidade e redução da massa específica. Esse comportamento corrobora as observações de Carvalho (2019) em perfis de intemperismo de filitos na região do Quadrilátero Ferrífero, para os quais a estabilização, ou até um possível aumento, da velocidade sônica em estágios intermediários de alteração foi verificada tanto em ensaios realizados paralelamente quanto perpendicularmente à foliação.

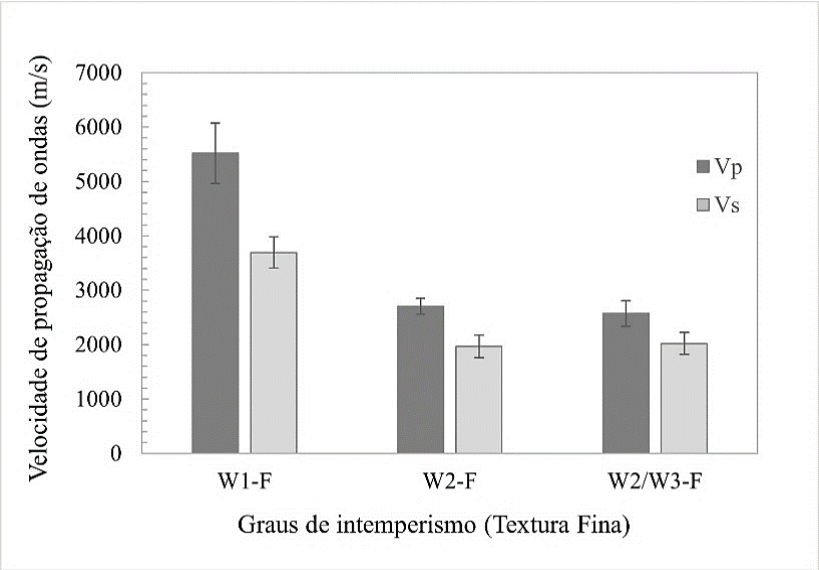


Figura 5. Comportamento das velocidades de onda (Vp e Vs) para os diferentes graus de alteração do filito.

3.2 Influência da Textura da Rocha

A análise da Tabela 1 evidencia que a textura das amostras (W2-F, W2-M e W2-G) exerce influência sobre os índices físicos, a resistência mecânica e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, porém de maneira não linear. Conforme destacado por Tuğrul (2004), a textura não atua isoladamente, mas, associada à composição mineralógica e à geometria dos poros, configura-se como um dos principais fatores condicionantes da desintegração física da rocha. Nesse contexto, as amostras de textura fina (W2-F) apresentaram a maior velocidade média de propagação da onda P, superando os valores observados para as texturas média e grosseira. Em contrapartida, o grupo W2-F exibiu o menor valor de índice de carga pontual, enquanto as texturas média e grosseira apresentaram desempenho mecânico superior.

Essa correlação inversa pode ser explicada pela anisotropia intrínseca dos filitos e pelas características das superfícies de foliação. Segundo Vishnu et al. (2010), a aplicação de carga paralela à foliação - condição adotada neste estudo - favorece a ruptura pelos planos de fraqueza. No caso do W2-F, a granulometria fina sugere o desenvolvimento de planos de foliação mais lisos e contínuos, que oferecem menor resistência ao cisalhamento nessa direção. O comportamento da amostra W2-F com baixa resistência é consistente com os resultados de Carvalho (2019), que obteve para filitos W2 valores de 1,03 MPa com aplicação da carga na direção perpendicular à foliação e 0,18 MPa na direção paralela.

Além disso, o grupo W2-M obteve o maior desempenho mecânico, superando o grupo de textura grosseira, ainda que apresente porosidade significativamente maior e menor valor de Vp. Essa resposta mecânica superior pode ser atribuída às variações microestruturais. Conforme discutido por Waqas et al. (2024), a presença de minerais granulares em rochas metamórficas influencia os mecanismos de falha ao dificultar a propagação de fissuras. Os dados indicam, portanto, que a textura média pode estar associada a um arranjo estrutural mais eficiente para o bloqueio de fraturas do que a textura grosseira neste grau de intemperismo, reforçando a observação de Tuğrul (2004) sobre a complexidade e heterogeneidade dos fatores que controlam o comportamento mecânico de rochas intemperizadas.

3.3 Correlação entre Velocidade de Propagação de Ondas e Índice de Carga Pontual

A Figura 6 apresenta as correlações estabelecidas entre as velocidades de propagação das ondas Vp e Vs e o índice de carga pontual, $Is_{(50)}$. Para essa análise estatística, foram considerados exclusivamente os dados dos corpos de prova correspondentes aos graus de intemperismo W1 e W2, com a exclusão dos outliers, totalizando 31 pontos na correlação com Vp e 29 pontos na correlação com Vs. A Tabela 2 mostra as correlações obtidas entre $Is_{(50)}$ e Vp na literatura técnica e compara com a obtida neste estudo.

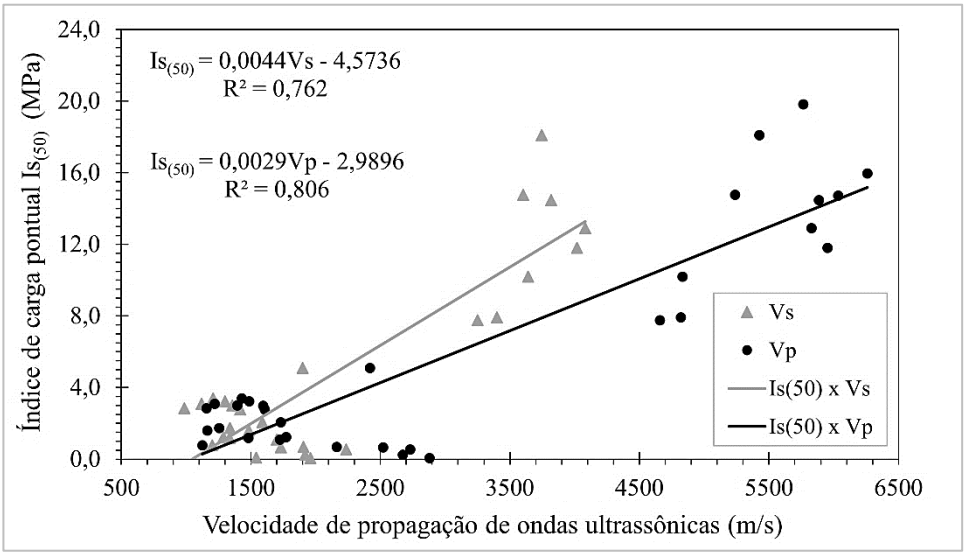


Figura 6. Correlação entre $Is_{(50)}$ e as velocidades de propagação Vp e Vs.

Tabela 2. Comparação entre correlações lineares $Is_{(50)}$-Vp reportadas na literatura e neste estudo.

Referência	Litologia	Equação	R^2
Kurtuluş et al. (2010)	Andesitos	$Is_{(50)} = 0{,}0018V_p - 1{,}9906$	0,950
Kurtuluş et al. (2012)	Rochas ultrabásicas Serpentinizadas	$Is_{(50)} = 0{,}0042V_p - 14{,}602$	0,895
Jamshidi et al. (2016)	Travertino	$Is_{(50)} = 6{,}67\ln V_p - 51{,}9$	0,925
Carvalho (2019)	Filitos	$V_p = 3155{,}9\ Is_{(50)} + 3574{,}1$	0,614
Este estudo	Filitos	$Is_{(50)} = 0{,}0029V_p - 2{,}9896$	0,806

As regressões lineares indicaram uma correlação positiva entre as velocidades de propagação de ondas e o índice de carga pontual, com coeficientes de determinação iguais a 0,806 para a relação com Vp e 0,762 para a relação com Vs. Este resultado demonstra um ajuste superior ao reportado por Carvalho (2019) para a mesma litologia. Embora estudos em rochas mais homogênea, isotrópicas ou de diferentes gêneses, como andesitos (Kurtuluş et al., 2010) e travertinos (Jamshidi et al., 2016), apresentem coeficientes de determinação ligeiramente superiores, o valor obtido para os filitos desta pesquisa é considerado representativo, dada a anisotropia e heterogeneidade das rochas metamórficas foliadas. A correlação positiva observada sugere que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Vp) apresenta potencial como estimador do índice de carga pontual no material estudado, no contexto das condições de ensaio adotadas, contribuindo para a avaliação preliminar de parâmetros mecânicos por meio de métodos não destrutivos.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou a influência do intemperismo e das variações texturais nas propriedades geomecânicas dos filitos da região de Belo Horizonte. O avanço do intemperismo da classe W1 para W2/W3 resultou em aumento progressivo da porosidade (de aproximadamente 3,8% para valores superiores a 10%) e redução da massa específica aparente seca, indicando perda de integridade da matriz rochosa. As velocidades de propagação de ondas ultrassônicas apresentaram decaimento na transição do grau W1 para W2, com reduções superiores a 50%, seguido por uma estabilização dos valores entre os graus W2 e W2/W3, característica de estágios intermediários de alteração. A análise da resistência mecânica demonstrou que a textura não atua como fator isolado, uma vez que amostras de textura fina (W2-F), apesar de apresentarem maiores valores de velocidade de ondas ultrassônicas P (Vp), exibiram os menores índices de resistência à carga pontual ($Is_{(50)}$), evidenciando a predominância da anisotropia estrutural e da orientação da foliação no mecanismo de ruptura. As correlações entre Vp e $Is_{(50)}$ nos graus W1 e W2 indicam o potencial dos ensaios ultrassônicos como ferramenta auxiliar na estimativa preliminar da resistência mecânica de filitos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio institucional. Declara-se o uso de inteligência artificial exclusivamente para auxílio na revisão gramatical e na clareza textual, preservando-se a originalidade da análise científica e das conclusões pelos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, P.S., Saraiva, A.A. (2010) Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2), p. 207-214.

Carvalho, T.R.R. (2019) *Caracterização mineralógica, química, física e mecânica de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 128 p.

International Society for Rock Mechanics (1985) Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(2), p. 51-60.

Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamehchiyan, M., Sahamieh, R.Z., Abdi, Y. (2016) A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, p. 568.

Kurtuluş, C., Irmak, T.S., Sertçelik, I. (2010) Physical and mechanical properties of Gokceada: Imbros (NE Aegean Sea) Island andesites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69, p. 321–324.

Kurtuluş, C., Bozkurt, A., Endes, H. (2012) Physical and mechanical properties of serpentinized ultrabasic rocks in NW Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 169, p. 1205–1215.

Lopes, M.C., Lana, M.S., Ribeiro, L.F.M., Silva, C.H.C. (2007) Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG). *REM: Revista Escola de Minas*, 60(3), p. 471-476.

Tuğrul, A. (2004) The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, 75(3-4), p. 215-227.

Ulusay, R., Hudson, J.A. (2007) *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. ISRM Turkish National Group, Ankara, 628 p.

Vishnu, C.S., Mamtani, M.A., Basu, A. (2010) AMS, ultrasonic P-wave velocity and rock strength analysis in quartzites devoid of mesoscopic foliations – implications for rock mechanics studies. *Tectonophysics*, 494(3-4), p. 191-200.

Waqas, U., Qureshi, M.U., Saqib, S., Rashid, H.M.A., Rasool, A.M. (2024) Evaluation of Strength Anisotropy in Foliated Metamorphic Rocks: A Review Focused on Microscopic Mechanisms. *Geosciences*, 14(10), p. 253.

Wyllie, D.C., Mah, C.W. (2004) *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th ed., Spon Press, London, 431 p.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/11

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO APLICADO NA DEFINIÇÃO DE TRATAMENTOS DE UM CANAL DE DESVIO DE GRANDES DIMENSÕES

Isabelle Pipper
Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, ipr@g5engenharia.com.br

Milena Arruda Silva
Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, mas@g5engenharia.com.br

Isabela Grossi da Silva
Engenheiro civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, igs@g5engenharia.com.br

Joaquim Duarte
Engenheiro civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, jd@g5engenharia.com.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em maciços rochosos está condicionada principalmente pela combinação das atitudes das descontinuidades existentes e a direção e inclinação da face do talude. Dessa forma, para escavações em maciços, a definição de tratamentos está diretamente associada a execução de mapeamento geológico-geotécnico na face exposta do talude escavado. Assim, obras de implantação de infraestruturas, em que escavações são necessárias para atingir as cotas de projeto, devem contemplar em sua rotina atividades de mapeamento. Esse trabalho tem como objetivo apresentar os dados coletados por meio de mapeamento geológico-geotécnico e aplicados em análises cinemáticas de um canal de desvio escavado em arenito da Formação Furnas com aproximadamente 40 m de altura. No total foram identificadas 3 famílias de descontinuidades, sendo a F1 sub-horizontal, e as famílias F2 e F3 subverticais. O canal de desvio foi analisado em três trechos, com direção N30, N17 e N317, respectivamente. Como resultado das análises cinemáticas, observa-se que podem ocorrer mais rupturas nos taludes da direita hidráulica nos trechos analisados. Entretanto, ocorrem probabilidades parecidas de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica também nos três trechos. Ambos condicionados pela variação das atitudes das descontinuidades da F2. Em relação aos tratamentos, no geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, concreto projetado com fibra, e em toda a extensão da crista, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries. Foram aplicados tirantes em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas. A metodologia aplicada se mostrou adequada para a condição geológica encontrada na área de implantação da estrutura de desvio, uma vez que todos os tratamentos definidos pelo mapeamento geológico-geotécnico foram aplicados e que o canal não apresentou nenhuma ocorrência associada a processos de instabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento Geológico-Geotécnico, Análise Cinemática, Estabilidade de Taludes, Descontinuidades, Canal de Desvio.

ABSTRACT: The slope stability in rock masses is primarily conditioned by the combination of the attitudes of existing discontinuities and the orientation (strike and dip) of the slope face. Therefore, for excavations in such masses, the definition of stabilization treatments is directly linked to the execution of geological-geotechnical mapping on the exposed face of the excavated slope. Consequently, infrastructure projects involving excavations to reach design grades must include mapping activities in their routine. This work aims to present data collected through geological-geotechnical mapping applied to kinematic analyses of a diversion channel excavated in sandstone from the Furnas Formation, approximately 40 m high. Data collection consisted of obtaining the attitudes of outcropping discontinuities, which were subsequently used in the

kinematic analyses. A total of three discontinuity sets were identified: F1 (sub-horizontal) and sets F2 and F3 (sub-vertical). The diversion channel was analyzed in three segments, with orientations N30, N17, and N317, respectively. As a result of the kinematic analyses, it is observed that additional failures may occur on the right hydraulic slopes in the sections analyzed. However, similar probabilities of direct toppling also occur on the left hydraulic slope in all three segments. Both conditions are influenced by the variation in the attitudes of the F2 discontinuities. Regarding the stabilization measures, in general, shotcrete with wire mesh and fiber-reinforced shotcrete were planned, and along the entire crest, shotcrete and wire mesh was applied, with 2 m in length along the upper part of the crest and 3 m vertically, to provide protection against weathering. Tiebacks were installed in sections with greater fracturing and especially where open discontinuities were observed. Rock bolts were indicated more sporadically, in areas where intersections between discontinuity sets with failure probabilities identified by the kinematic analyses were mapped. The methodology applied proved to be adequate for the geological conditions found in the area where the diversion structure was implemented, since all treatments defined by the geological–geotechnical mapping were carried out, and the channel did not present any occurrences related to instability processes.

KEYWORDS: Geological-Geotechnical Mapping, Kinematic Analysis, Slope Stability, Discontinuities, Diversion Channel.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade em taludes escavados em maciços rochosos está condicionada principalmente pela combinação das atitudes das descontinuidades existentes e na direção e inclinação da face do talude. Por esse motivo, para a definição de tratamentos é necessário a execução de mapeamento geológico-geotécnico na face exposta do talude escavado.

Além das atitudes das descontinuidades, é importante a descrição da resistência, consistência, grau de alteração, grau de fraturamento do maciço rochoso e as condições da superfície das descontinuidades, como rugosidade e preenchimento.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os dados coletados por meio de mapeamento geológico-geotécnico e aplicados em análises cinemáticas de um canal de desvio escavado em arenito da Formação Furnas com aproximadamente 40,0 m de altura, localizado na obra de implantação de uma PCH no estado do Paraná.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

De acordo com o Mapa Geológico do Estado do Paraná (CPRM, 2021), escala 1:600.000, o empreendimento está localizado em áreas em que se encontram as rochas da Formação Furnas, Grupo Paraná, período Devoniano, aproximadamente 419,2 Ma.

O maciço é constituído predominantemente por arenitos polimíticos, médios a grossos de coloração clara, com grãos angulosos a subangulosos cimentados por caulinita e ilita. Apresentam intercalações centimétricas a métricas de conglomerados e, por vezes, camadas centimétricas a métricas de arenitos finos, siltitos e argilitos. Estratificações cruzadas planares e cruzadas também são observadas.

3 GEOMETRIA DO CANAL DE DESVIO

O canal escavado tem como objetivo o desvio do curso do rio, de forma a liberar seu leito original para a execução do barramento. Na obra em questão, o canal foi escavado com uma profundidade de aproximadamente 40,0 m, com uma largura média de 7,0 m, geometria singular devido a sua dificuldade executiva. Ainda, o canal conta com um vão rebaixado, na margem esquerda, com largura de aproximadamente 10,0 m.

A Figura 1 apresenta a geometria em planta do canal de desvio. A seção típica do canal é apresentada na Figura 2.



Figura 1. Canal de desvio - Planta.

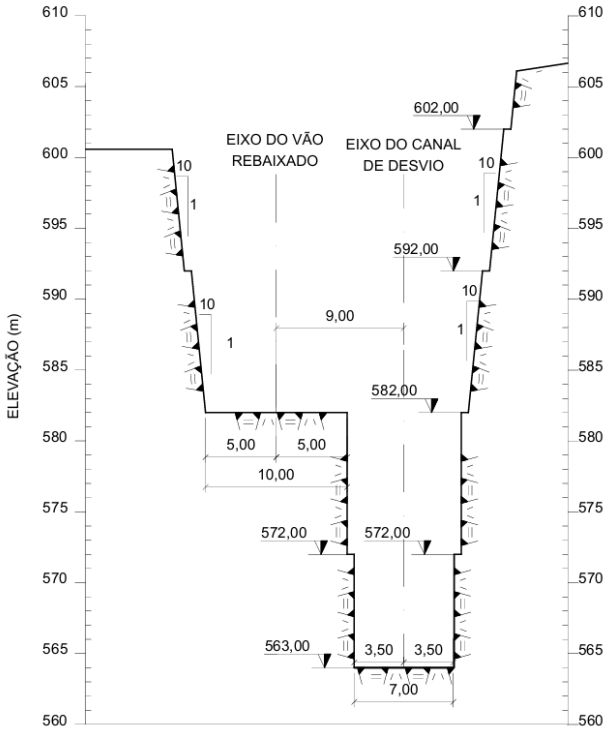


Figura 2. Seção típica do canal de desvio.

Como pode ser observado a partir do perfil geológico inferido e apresentado nos desenhos de projeto, o canal foi inteiramente escavado por detonações a fogo. Para garantir a sua adequada geometria, em sua maior parte, o canal foi escavado com a metodologia do pré-fissuramento.

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o mapeamento geológico-geotécnico dos taludes escavados no canal de desvio e para a definição de tratamentos é descrita na sequência.

4.1 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Inicialmente, para a execução de mapeamento geológico-geotécnico, foram executadas atividades de bate-choco e limpeza fina, de forma a garantir a segurança dos profissionais responsáveis e permitir a visualização das estruturas geológicas existentes na frente escavada. Também foram realizados o estaqueamento e a marcação topográfica na face do talude. A partir disso, é realizado o mapeamento pelo geólogo responsável. O mapeamento realizado em campo para a caracterização do maciço foi baseado na descrição geológica básica recomendada pela ISRM (1981).

A coleta de dados consistiu na obtenção das atitudes das descontinuidades naturais aflorantes com auxílio de uma bússola geológica do tipo Brunton, martelo geológico e caderneta de campo. As atitudes tiveram notação em *strike/dip*, e posteriormente foram aplicadas nas análises cinemáticas por meio do uso de estereograma.

4.2 ESTEREOGRAMA

O estereograma é uma representação gráfica utilizada para projetar dados tridimensionais, como atitude de descontinuidades, em uma superfície bidimensional, geralmente usando uma projeção estereográfica. É utilizado para analisar a orientação espacial de planos e linhas, como fraturas, falhas, juntas e planos de acamamento de rochas, sendo possível a identificação de famílias de descontinuidades (Lisle, 2004).

Todas a atitudes das descontinuidades medidas foram inseridas no *software* Dips®, da Rocscience, com a orientação em *strike/dip*, para auxiliar na representação e identificação das principais famílias de descontinuidades existentes.

4.3 ANÁLISES CINEMÁTICAS

Ainda no *software* Dips®, a partir do estereograma é possível realizar a análise cinemática, que consiste na intersecção da orientação das descontinuidades existentes com a direção e inclinação do talude escavado. A partir disso, e aplicando-se os parâmetros de resistência das descontinuidades, é possível verificar a probabilidade de ruptura na face do talude rochoso, considerando os modos de ruptura planar, em cunha ou tombamento (Lisle, 2004).

O limite lateral utilizado nas análises foi de 20º, pois na prática foi observado que as rupturas planares e de tombamento tendem a ocorrer quando a direção do mergulho dos planos está entre um certo intervalo angular da direção do mergulho do talude. Tipicamente é considerado um limite de 20° ou 30º, e os pólos que ficarem fora desse intervalo apresentam baixo risco de ruptura (Wyllie, 2004).

Em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades, foi considerado um ângulo de atrito de 42°, com base nas correlações realizadas pelo *software* RocLab®, também da Rocscience. Em relação a coesão, adotou-se 0 kPa, considerando um cenário mais conservador, ou seja, a face da descontinuidade totalmente lisa e sem preenchimento argiloso.

Para as análises cinemáticas o canal foi segmentado em 3 trechos, de acordo com a direção dos taludes. O primeiro trecho entre a estaca 0+000 a 0+300 possui direção N30. O segundo trecho entre a estaca 0+300 a 0+380 apresenta direção N17. Por fim, o terceiro trecho entre a estaca 0+380 a 0+620, com direção de N317. Para cada trecho foram realizadas análises para a direita e esquerda hidráulica do canal. Para simplificar as análises, a inclinação dos taludes foi considerada igual a 90º.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos para a determinação dos tratamentos necessários nas escavações do canal de desvio são descritos na sequência.

5.1 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E ESTEREOGRAMA

Em relação a descrição do maciço rochoso, no geral, foi classificado como medianamente resistente a resistente (R3/C3 e R4/C2), medianamente a muito fraturado (F3 a F4), pouco alterado a são (A2/A1). Em relação às descontinuidades, as superfícies foram classificadas como rugosas (S1) e paredes justapostas com paredes sãs e por vezes, com alteração incipiente.

A partir da análise no estereograma de todas as atitudes medidas das descontinuidades (Figura 3), foi possível caracterizar três famílias de descontinuidades. Sendo a família 1 (F1) relacionada ao acamamento do arenito, sub-horizontal, com direção média de 038/06. A família 2 (F2) está relacionada às fraturas subverticais com direção média de 063/82. Por fim, a família 3 (F3) possui direção média de 341/79, também é subvertical, porém foi identificado pelo mapeamento que se trata de descontinuidades pouco persistentes.

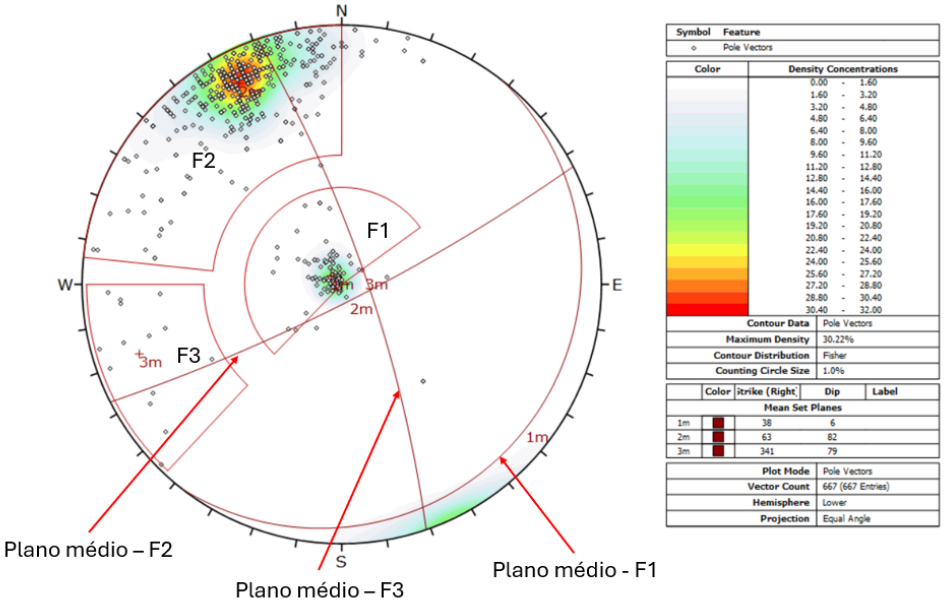


Figura 3. Estereograma geral.

5.2 ANÁLISES CINEMÁTICAS

Com base nas análises cinemáticas realizadas para os três trechos do canal de desvio, para ambos os taludes (esquerda e direita hidráulica), foi possível obter as probabilidades de ruptura para cada tipo de ruptura. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das Probabilidades de Ruptura.

Trecho	Tipo de Ruptura		Esquerda Hidráulica (EH) Probabilidade de ruptura (%)	Direita Hidráulica (DH) Probabilidade de ruptura (%)
1	Planar		0,00	7,33
	Cunha		8,70	31,35
	Tombamento Flexural		3,05	0,00
	Tombamento	Direto	10,25	0,01
		Oblíquo	22,94	10,22
		Base planar	1,83	34,00
2	Planar		0,00	20,51
	Cunha		20,34	46,41
	Tombamento Flexural		0,00	0,00
	Tombamento	Direto	10,89	0,00
		Oblíquo	15,46	11,91
		Base planar	2,63	33,33
3	Planar		0,00	0,00
	Cunha		15,05	15,76
	Tombamento Flexural		0,97	0,00
	Tombamento	Direto	10,09	34,71

Trecho	Tipo de Ruptura	Esquerda Hidráulica (EH) Probabilidade de ruptura (%)	Direita Hidráulica (DH) Probabilidade de ruptura (%)
	Oblíquo	14,15	7,70
	Base planar	26,21	14,81

No geral, observa-se que podem ocorrer mais rupturas planares para o talude da direita hidráulica, isso está relacionado ao fato das descontinuidades da família 2 possuírem, praticamente a mesma direção de mergulho da face do talude analisado. Isso pode ser verificado pelo fato de ocorrer ruptura planar somente no talude da direita hidráulica do trecho 1 e 2, relacionada a fraturas com mergulhos intermediários.

Em relação as rupturas em cunhas, ocorrem as maiores probabilidades na direita hidráulica nos três trechos do canal de desvio. Sendo a maior probabilidade no trecho 2, com 46,41%. As cunhas são formadas devido a intersecção das fraturas da mesma família (F2), por apresentar uma dispersão em relação as atitudes das descontinuidades que a compõem e não devido à intersecção entre famílias distintas, assim os blocos de rocha formados tendem a apresentar pequenos volumes.

Além disso, ocorre praticamente a mesma probabilidade de ocorrência de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica, condicionada pela intersecção das descontinuidades da família 1 e 2 com a face do talude, formando blocos de rochas.

Para o trecho 1, as rupturas estão condicionadas principalmente pelas descontinuidades das famílias F1 e F2. Sendo que a F1, composta por descontinuidades sub-horizontais, está relacionada com as rupturas planares (7,33%) e do tipo tombamento pela base planar, com 34,00% de probabilidade de ocorrência na direita hidráulica. A família 2 está relacionada a ocorrência de cunhas e tombamento oblíquo, tanto na DH e na EH.

Em relação ao trecho 2, as rupturas ocorrem em sua maior parte, devido a intersecção entre a F1 e F2, sendo maior que 20% de ocorrência de ruptura planar na face da DH, não observada na EH. Assim como no trecho 1, a ocorrência de cunha e tombamento oblíquo estão relacionadas às descontinuidades da família 2 e o tombamento por base planar pela família 1.

Por fim, o trecho 3, apresenta maior probabilidade de ruptura por tombamento direto na DH (34,71%) e tombamento por base planar na EH (26,21%), relacionados a intersecção da F1 e a F2 com a face do talude. As probabilidades de formação de cunhas são praticamente iguais em ambos os taludes (DH e EH), formadas pela intersecção da F2.

De acordo com as análises foi possível observar que poucas rupturas são condicionadas a família de descontinuidade 3. Essas descontinuidades podem estar relacionadas a fraturas mapeadas ao longo do avanço das escavações, que possuem pouca persistência e maiores espaçamentos.

5.3 TRATAMENTO PREVISTO

Os tratamentos típicos para os taludes em maciço rochoso definidos em projeto foram: tirantes com resina CA-50 ⌀ 25 mm, barras de ancoragem CA-50 ⌀ 32 mm, concreto projetado com fibra (7 cm de espessura) e concreto projetado com tela metálica Q-138 (10 cm de espessura). Para ambos os tipos de concreto projetado, a tenacidade adotada foi de 2,5 MPa.

O concreto projetado com fibra foi indicado para trechos onde as probabilidades de rupturas eram menores e a principal preocupação estava relacionada a proteção da face contra a ação da água durante o desvio do rio. O concreto projetado com tela metálica foi empregado em trechos onde foi observado maior fraturamento da rocha. Os tirantes e as barras de ancoragem foram indicados juntamente com a aplicação de concreto projetado, de acordo com a condição descrita anteriormente, ainda, em alguns trechos, foram indicadas malhas de ancoragens, de acordo com o espaçamento das descontinuidades medidas.

No geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, em todos os trechos da direita hidráulica, exceto em pontos localizados onde o maciço rochoso não se apresentava fraturado. E para a esquerda hidráulica, em sua maior parte, concreto projetado com fibra. Foi indicada em toda a extensão da crista do canal de desvio, na direita e esquerda hidráulica, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries.

Em relação a aplicação de tirantes, foram aplicados em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas.

Já a definição do comprimento das ancoragens e a direção de sua execução foi definida de forma que o trecho final da barra ultrapassasse a descontinuidade. No geral, as ancoragens executadas tinham entre 4 a 6 m de comprimento.

Além das análises cinemáticas, foram também realizadas análises de estabilidade, em *softwares* específicos, dos blocos obtidos pela intersecção das descontinuidades, o que complementou a determinação dos tratamentos dos taludes do canal de desvio. Para essas análises buscou-se obter um fator de segurança mínimo de 1,5 com a aplicação de ancoragens ou tirantes.

6 CONCLUSÕES

A partir da execução de mapeamento geológico-geotécnico em campo, de forma concomitante ao avanço das escavações, foi identificada a necessidade de aplicação de tratamentos pontuais no maciço do canal de desvio. Destaca-se que os trechos 1 e 2 dos taludes escavados apresentam condição provisória de estabilidade, enquanto o trecho 3 apresenta a necessidade de estabilização para a condição definitiva. Tal avaliação também condicionou a definição dos tratamentos a serem executados.

No total foram identificadas 3 famílias de descontinuidades pelo mapeamento, sendo a F1 sub-horizontal, e as famílias F2 e F3 subverticais. Como resultado das análises cinemáticas, observa-se que podem ocorrer mais rupturas em cunha para os taludes da direita hidráulica em todos os trechos analisados, isso está relacionado ao fato das descontinuidades da família 2 possuírem uma dispersão nas atitudes medidas e em sua maior parte, possuir praticamente a mesma direção de mergulho da face do talude analisado. As rupturas planares ocorrem somente no trecho 1 e 2, e estão relacionadas a fraturas com mergulhos intermediários. Ocorre praticamente a mesma probabilidade de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica nos três trechos, condicionada pela intersecção das descontinuidades da família 1 e 2 com a face do talude. Já no trecho 1 e 2, na direita hidráulica, ocorrem as maiores probabilidades de ocorrência de tombamento pela base planar, ao contrário do que é observado no trecho 3, onde a maior probabilidade é para a esquerda hidráulica, sendo condicionada pelas famílias F2 e F3, seccionadas pela F1 na base.

Em relação aos tratamentos, no geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, em todos os trechos da direita hidráulica, exceto em pontos localizados onde o maciço rochoso não se apresentava fraturado. Para a esquerda hidráulica, em sua maior parte, concreto projetado com fibra, com exceção de trechos mais fraturados onde foi previsto concreto com tela metálica. Foi indicada em toda a extensão da crista do canal de desvio, na direita e esquerda hidráulica, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries.

Foram aplicados tirantes, em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas. No geral, as ancoragens executadas tinham entre 4 a 6 m de comprimento e a direção de sua execução foi definida de forma que o trecho final da barra ultrapassasse a descontinuidade.

Além das análises apresentadas, foram também realizadas análises de estabilidade, em *softwares* específicos, dos blocos obtidos pela intersecção das descontinuidades, o que complementou a determinação dos tratamentos dos taludes do canal de desvio.

Por fim, a metodologia aplicada se mostrou adequada para a condição geológica encontrada na área de implantação da estrutura de desvio, uma vez que todos os tratamentos definidos pelo mapeamento geológico-geotécnico foram aplicados e que o canal não apresentou nenhuma ocorrência associada a processos de instabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os dados disponibilizados pela G5 Engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, 1973(12), 335-343.

CPRM. (2021). Mapa Geológico do Estado do Paraná. Escala 1:600000.

International Society for Rock Mechanics. (1980). *Basic geotechnical description of rock masses*. Commission on Classification of Rocks and Rock Masses.

Lisle, R. J.; Leyshon, P. R. (2004) *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers.* Cambridge University Press.

Wyllie, D. C.; Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th ed. CRC Press.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/12

Mapeamento Geotécnico Litoestrutural do Maciço do Portão do Inferno – Chapada dos Guimarães/MT

Henrique de Oliveira Ramos
Geólogo Geotécnico, MZ Geológica LTDA, Cuiabá - MT, Brasil, mzgeologica@gmail.com

Cristiano Zandoná dos Santos
Engenheiro Civil, Zandoná Consultoria Ltda, Cuiaba - MT, Brasil, cristianozandona@uol.com.br

Wilson Conciani
Consultor, Cuiabá - MT, Brasil, concianiw@gmail.com

RESUMO: Este estudo tem como objetivo apresentar o mapeamento geológico geotécnico litoestrutural do maciço do Portão do Inferno, composto pelos arenitos friáveis e silicificados das Formações Furnas e Botucatu, localizado as margens da Rodovia MT-251, porção esta locada sob zona de falha geológica com forte incidência de agentes intempéricos. Adjacente ao maciço rochoso foi instalado um pontilhão sobre patamar de modo a viabilizar a ligação entre as cidades de Cuiabá e Chapada dos Guimarães, trecho este que tem sido observada a queda de blocos provenientes dos níveis acima e abaixo do leito estradal. O mapeamento geológico geotécnico correlaciona descrições sistemáticas das exposições rochosas, com subdivisões das litofácies presentes, correlacionando suas composições, RQD, graus de alteração, coesão, granulometria, cimentação e disposição estrutural das descontinuidades (falhas, fraturas e veios), com materialização das continuidades destes planos, como forma de avaliação dos possíveis pontos de ruptura e zonas preferenciais para percolação de água. Este trabalho conta com dados de perfis de sondagem, linhas geofísicas e ensaios laboratoriais de caracterização. O produto proposto para este trabalho se resume a materialização cartográfica da geologia local junto a perfis longitudinais do maciço.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento geológico geotécnico, Arenitos friáveis, Zona de falha.

ABSTRACT: This study aims to present the geological, geotechnical, and lithostructural mapping of the Portão do Inferno massif, composed of friable and silicified sandstones of the Furnas and Botucatu Formations, located along the MT-251 highway. This portion is situated under a geological fault zone with a strong incidence of weathering agents. Adjacent to the rock massif, a bridge was installed on a platform to enable the connection between the cities of Cuiabá and Chapada dos Guimarães. In this section, rockfalls from levels above and below the roadbed have been observed. Geotechnical geological mapping correlates systematic descriptions of rock exposures with subdivisions of the lithofacies present, correlating their compositions, RQD (Relative Quality of Disruption), degrees of alteration, cohesion, granulometry, cementation, and structural arrangement of discontinuities (faults, fractures, and veins), with the materialization of the continuities of these planes, as a way of evaluating possible rupture points and preferential zones for water percolation. This work includes data from borehole logs, geophysical lines, and laboratory characterization tests. The proposed product for this work is summarized as the cartographic materialization of the local geology along with longitudinal profiles of the rock mass.

KEYWORDS: Geotechnical and geologic mapping, Friable sandstone, Fault zone.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta o produto cartográfico gerado a partir do mapeamento geotécnico litoestrutural de detalhe do maciço do Portão do Inferno, com topo rochoso que perfaz área aproximada de 1,1 hectare, localizado as margens da rodovia MT – 251, divisa municipal de Cuiabá e Chapada dos Guimarães, estado de Mato Grosso. A área em questão vem sofrendo interdições recorrentes no tráfego de veículos em

decorrência de riscos geológicos de movimento de massa, com risco de queda de blocos rochosos sobre o pontilhão existente na encosta, além do alerta quanto à instabilidade do bloco rochoso da base da estrutura.

No ano de 2024 foram adotadas medidas emergenciais para a região do Portão do Inferno, com a aplicação de planos de monitoramento para identificação em tempo real de possíveis movimentos de massa, processos erosivos, subsidências, entre outros eventos naturais que possam comprometer a estabilidade da encosta e do viaduto, onde dados da Secretaria de Infraestrutura de Mato Grosso (SINFRA-MT) apontam que de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024 foram contabilizados 16 eventos de movimento de massa na região, com a ocorrência de queda de blocos e corrida de detritos associados a precipitações de chuva sobre o pontilhão.

Como parte dos planos de monitoramento ambientais indicados para o local, de agosto de 2024 a julho de 2025, foi realizado mapeamento geológico de detalhe do maciço junto a baterias de ensaios geotécnicos (sondagem mista e análises laboratoriais), além da execução de linhas geofísicas para projeção das descontinuidades, com objetivo de descrever as exposições rochosas e materializar a geologia local, como subsídio técnico para implantação de obras de infraestruturas locais. O produto cartográfico resultado deste estudo tem escala de investigação de 1:10.000, acompanhado de perfil longitudinal do maciço, desenvolvidos com a interpolação dos resultados obtidos.

2 GEOLOGIA LOCAL

Segundo Ross (2014), as escarpas da Chapada dos Guimarães, por vezes, sofrem fortes influências de falhamentos com atuação de processos erosivos plúvio-fluviais nestes planos, esculpindo relevos com forte dissecação, o que corrobora com a formação de vales muito profundos, estreitos e com encostas escarpadas, como pode ser observado na área do estudo, aflorando rochas das Formações Furnas e Botucatu, com formação de patamar resultado da erosão diferencial entre as litologias (arenito eólico e fluvial transicional).

De forma geral, na área do estudo, o patamar da chapada é composto pelas rochas da Formação Furnas enquanto a porção topograficamente superior é composta pela Formação Botucatu, diz Silva (2018). Autores identificaram por fotointerpretação dois padrões de lineamentos estruturais regionais, com *trends* preferenciais para NE e NW, associadas a formação da bacia do Paraná (*grabens e hosts*), projetando-se padrões principais de ruptura em cunha.

As rochas da Formação Furnas, de idade devoniana, afloram localmente abaixo do leito estradal como arenitos puros de granulação de média a grossa, com presença de seixos, friáveis e imaturos, e estratificações cruzadas, de coloração branca e amarela, localmente arroxeado (Lacerda e Filho *et al.*, 2004). Em decorrência dos falhamentos locais são observadas descontinuidades penetrativas, abertas, semiverticais que interceptam acamamentos horizontalizados bem definidos, geotécnicamente propício para a formação natural de blocos instáveis (Conciani, 2024).

Acima do nível do viaduto afloram rochas da Formação Botucatu, de idade juro-cretácica, interpretado como um clássico depósito residual de dunas eólicas como um sistema eólico seco (Lacerda e Filho *et al.*, 2004), constituída em arenitos avermelhados, finos a médios, friáveis, contendo grãos esféricos, arredondados e foscos. Esses arenitos apresentam estratificações cruzadas acanaladas de grande porte, estratificações cruzadas tabulares, tangenciais e plano-paralelas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Mapeamento Geológico Litoestrutural

Como referência de apoio, as metodologias e boas práticas aplicadas no mapeamento geológico deste estudo teve como referência o “Guia de Procedimentos Técnicos, Volume 1, do Serviço Geológico do Brasil (Medeiros e Rosa Costa, 2020), como forma de padronizar os resultados perante a academia e assegurar a validação dos produtos. O mapeamento geológico sistemático fora realizado com pontos de descrição preestabelecidos, a depender da viabilidade de acesso as porções marginais do maciço, espaçados em malha regular aproximada de 100 m, com detalhamento nas faixas fraturadas e zonas de falha. Nos pontos descritos

foram catalogadas as litologias com base nas sua granulometria, composição dos grãos, cimentação, graus de alteração, graus de fraturamento, presença de descontinuidades e estruturas sedimentares relevantes. Os equipamentos utilizados ao longo dos levantamentos de campo foram: caderneta de campo, máquina fotográfica (*smartphone*), bússola, GPS (*Global Positioning System*), martelo, bisnaga de ácido clorídrico, canivete e lupa, imã.

O levantamento topográfico do local foi realizado por método indireto, com o uso de tecnologia *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*), pré supressão vegetal, para modelamento tridimensional primitiva do maciço, nos permitindo gerar curvas de nível de precisão e análises geomorfológicas para o planejamento de caminhamentos de campo.

3.2 Análises Geotécnicas Laboratoriais

Para ensaios de caracterização geotécnicas, ao longo da área de estudo foram coletadas amostras em porções pré-determinadas, com amostragens indeformadas e amolgadas para caracterização geotécnica em níveis específicos do maciço. As amostras coletadas foram submetidas a ensaios como: Análise granulométrica; Limites de Atterberg; Ensaios de Cisalhamento Direto e Triaxial; Índice de suporte Califórnia (ISC).

3.3 Levantamento Geofísico e Sondagens Geotécnicas

Em seguida ao mapeamento, foram determinadas 7 linhas geofísicas, pelo método eletrorresistivo (Sondagem Elétrica Vertical – SEV, arranjo Dipolo-Dipolo), totalizando aproximadamente 870 metros de arranjo, de forma a interceptar as principais descontinuidades do maciço, que por meio dos contrastes de resistividade elétrica se torna possível classificar e determinar os principais planos de fluxo d'água em subsuperfície (Telford *et al*., 1990), característica de comum observação em zonas fraturadas e caixas de falha, por se tratar de um contexto litológico de baixa condutividade (arenito). Os levantamento geofísicos na área foram realizados com equipamento GEOSINAL, modelo GEO_EF 800. Braga *et al.* (2016) obtiverem bons resultados com essa técnica ao mapear feições da Formação Botucatu em São Paulo.

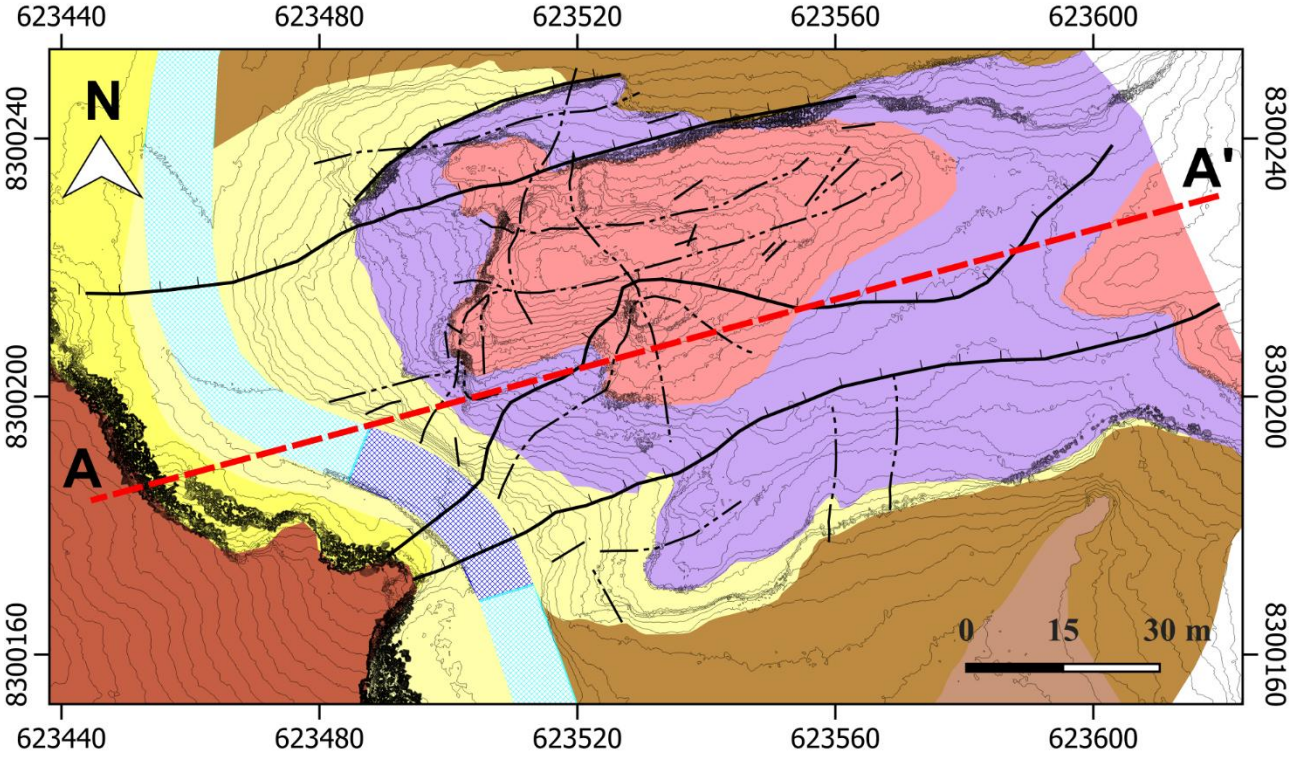
Com base nos resultados das linhas geofísicas, como método de investigação direta, foram realizados 5 furos de sondagem mista no local, com 3 pontos de ensaio locados no nível de pista (aproximadamente 25 metros de profundidade por furo) e 2 furos nas cotas de topo do maciço (aproximadamente 50 metros de profundidade por furo), com içamento dos equipamentos de sondagem viabilizados pelo uso de guindaste.

Os ensaios de sondagem foram executados e analisados de acordo com as normas ABNT NBR 6484/2020 e DNER-PRO 102-97, para sondagens de reconhecimento pelo método rotativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapeamento geológico foi executado após a supressão de vegetação do maciço para melhor visualização das descontinuidades e contextualização geológica estrutural total da área com a catalogação de 80 pontos de descrição, com controle de coordenadas. Como resultado das descrições de campo e sistematização dos dados foi elaborado o Mapa Geológico do Portão Inferno (Figura 1) em escala de 1:500.

Os caminhamentos terrestres do mapeamento foram restritos ao maciço localizada a montante do nível estradal, nos permitindo observar a ocorrência de 3 (três) litofácies principais, denominadas neste estudo como Inferior, Intermediária e Superior.



LEGENDA

- Formação Botucatu (Litofácie Superior)
  - Arenito fino a médio, fraturado, ferruginoso, muito brando a mediamente resistente, avermelhado.
- Formação Botucatu (Litofácie Intermediária)
  - Arenito fino, fraturado, brando a mediamente resistente, rosa/roxa.
- Formação Botucatu (Litofácie Inferior)
  - Arenito fino a médio, fraturado, limonitizado, muito brando a brando, amarelado.
- Formação Botucatu
  - Depósito de Talus
- Formação Botucatu
  - Areia fina siltosa, limonitizada, amarela clara
- Formação Furnas
  - Arenito fino a médio, brando a resistente, com intercalações argilicas, fraturada, cinza/marrom
- Grupo Cuiabá (Subunidade 7)
  - Metadiamictitos petromíticos, com clastos e raras intercalações de filitos.
- Viaduto do Portão do Inferno
- Rodovia MT - 251
- Curvas de Nível - Intervalo de 2 metros
- Falhas Extensionais
- Planos de Fratura Principais
- Perfil Longitudinal A-A'

Figura 1. Mapa Geológico do Portão do Inferno (DATUM SIRGAS 2000 - 21L).

A litofácie da base do maciço, denominada litofácie inferior, tem seu início na cota da rodovia com espessura variando entre 14 e 22 metros, perfazendo cotas de elevação entre 464 m e 486 m, composto de arenito médio (NBR 6502:1995), caulínico, feldspáticos, com aparente grau de limonitização, com

laminações plano paralelas de escala milimétrica em afloramento, apresentando pontualmente sinais de percolação de fluidos enriquecidos em ferro (Figura 2a), majoritariamente friável e com coloração amarela.

A litofácie denominada intermediária apresenta espessura variando entre 12 e 21 metros, perfazendo cotas de elevação entre 486 m e 508 m, composto preferencialmente de arenito de granulação fina (NBR 6502:1995) com silicificação moderada, colaborando assim para uma rocha de reologia mais resistiva, por vezes conglomerática, com presença de clastos arredondados compostos de caulim (Figura 2b), depositado em acamamentos tabulares, perfazendo coloração rosa arroxeada. Observa-se que nesta litofácie as porções de contato entre as camadas apresentam maiores graus de silicificação, evento este determinante para o modelamento dos patamares nas regiões periféricas do maciço.

A litofácie superior do maciço apresenta espessuras mais relevantes, variando entre 18 e 22 metros, perfazendo cotas de elevação entre 508 m a 532 m, composto de arenito médio (NBR 6502/1995), com estratificações plano paralelas e estratificações cruzadas, cimentação ferruginosa, mediamente friável e com coloração avermelhada. São presentes nesta litofácie diversos pontos de acentuada silicificação do arenito, correlacionadas com os principais planos de fratura, formando nos blocos uma espécie de “capa” resistente (Figura 2c).

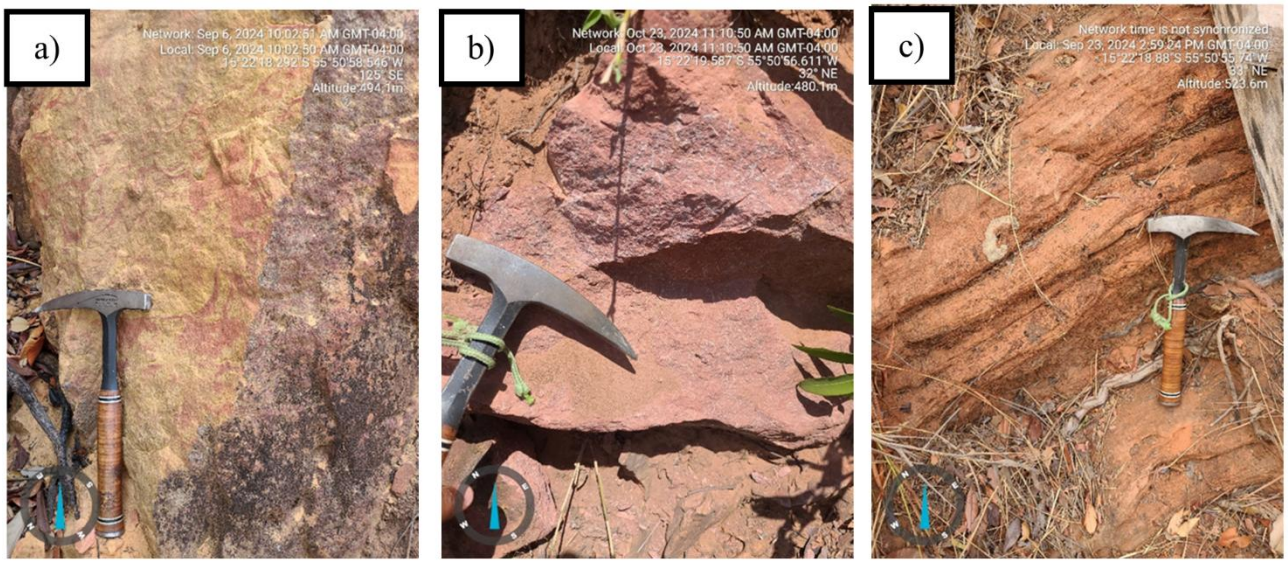


Figura 2. a) Sinais de percolação de fluidos ricos em Fe em meio as rochas da litofácie inferior. b) Imagem em escala de afloramento da litofácie intermediária. c) Imagem em escala de afloramento da estratificação presente na litofácie superior.

Como produto da correlação das linhas geofísicas, furos de sondagem e o mapeamento geológico preliminar foram elaborados perfis longitudinais (Figura 3), denominados A-A', como forma de ilustrar as projeções das descontinuidades relevantes e espessura das litofácies locais. As linhas geofísicas posicionadas perpendicularmente aos fraturamentos e falhamentos principais investigaram indiretamente o maciço, mostrando forte condutividade elétrica nestas faixas (Figura 4), associado a baixa recuperação de amostras em ensaios de sondagem realizados sobre estes planos.

Os arenitos da Formação Furnas apresentam forte silicificação quando comparados com os arenitos friáveis da Formação Botucatu, dado este confirmado pelos testemunhos de sondagem analisados, com a melhora expressiva nas taxas de recuperação e coesão das amostras destes níveis, com cotas destes contatos variando entre 458 m e 464 m de altitude nesta região.

Ambas as litofácies analisadas apresentaram Classificação HRB (*Highway Research Board*) mostrando predominância geotécnica de areia fina de praia ou desértica não plástica com teores de silte excedendo os limites de A3, com comportamento de subleito excelente a bom, sem propriedades expansivas.

Em resumo, segundo DNIT (2006), as litofácies do maciço foram classificadas como SP-SM, porém uma das amostras analisadas trouxe classificação SM para a litofácie intermediária, devido a maior presença de finos neste horizonte, com amostragem realizada na zona de falha principal do maciço. Os valores médios de CBR das litofácies não apresentaram variação expressiva, com resultados abaixo de 8%, com destaque

para as litofácies intermediária e superior, que perfazem respectivamente os maiores e os menores índices, em geral com umidades ótimas médias abaixo de 10%.

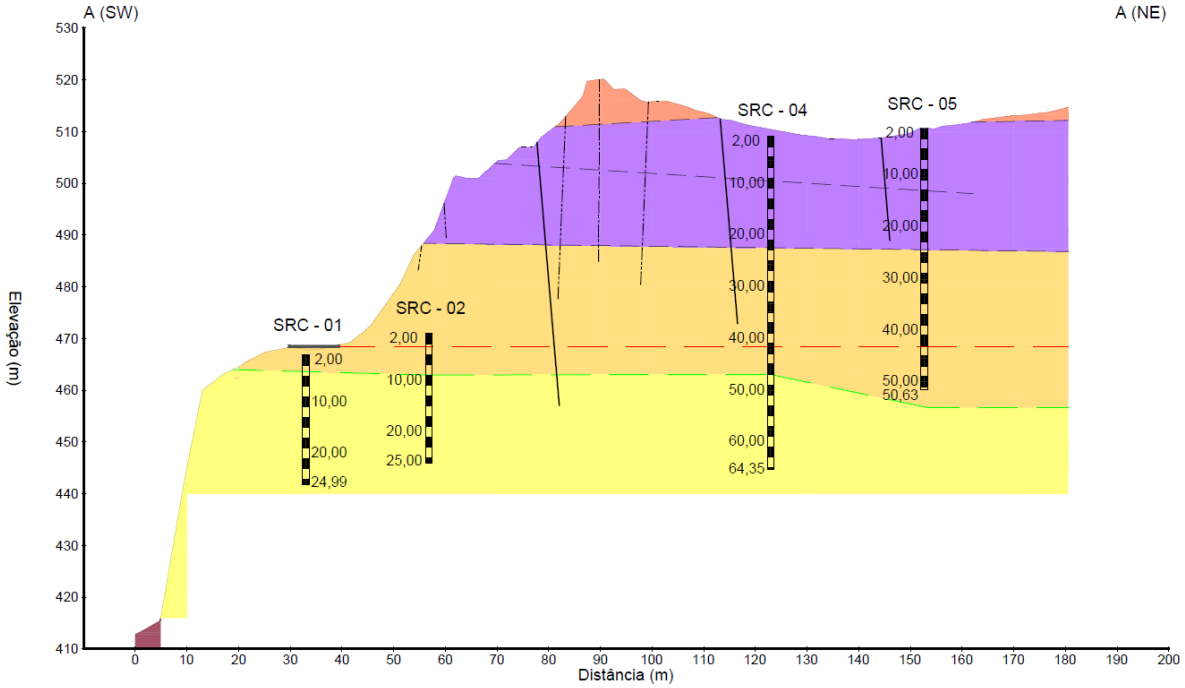


Figura 3. Perfil geológico longitudinal A-A', locado na Figura 1. São ilustrados no perfil o contato entre as Formações Furnas e Botucatu (linha tracejada verde), com locação dos furos de sondagem executados no nível de pista (linha traceja vermelha) e sobre o maciço. Também estão indicadas na figura os planos de falha (linhas cheias pretas) identificados, fraturas (linha tracejada alternada com dois pontos) e acamamentos sedimentares (linha tracejada preta), além as formações geológicas, que seguem os padrões estabelecidos pelo Mapa Geológico de detalhe (Figura 1).

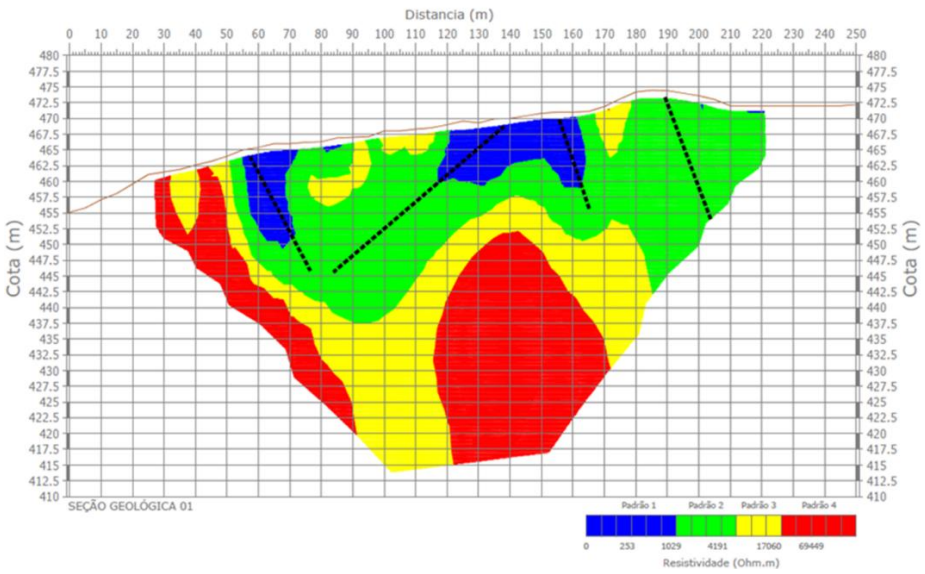


Figura 4. Sessão geofísica 01 com contrastes de baixa resistividade na caixa de falha principal da área de estudo (ECOPLAN, 2025).

Como ilustrado no mapa litoestrutural, são presentes 4 zonas de falha extensionais no Portão do Inferno, de escala regional com direção NE-SW e *dip* em alto ângulo para NW e SE (Figura 5a). Associadas

a estas descontinuidades principais são observados veios quartzofeldspáticos controlados de escala centimétrica (Figura 5b) e brechamentos.

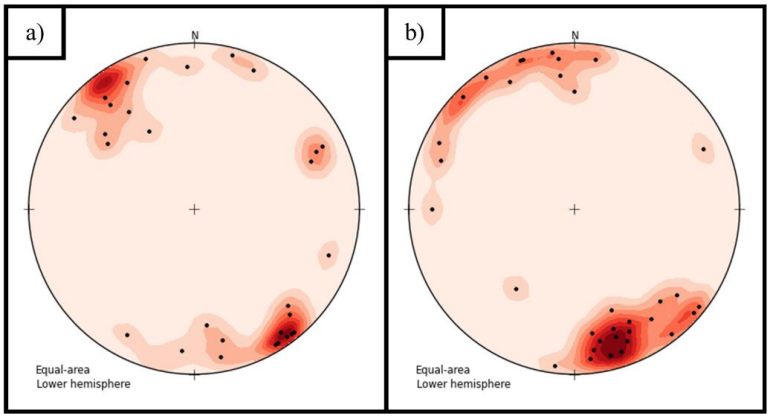


Figura 5. a) Estereograma com planos de falha medidos (n = 29), mostrando *trend* com direção NE-SW, com *dip* em alto angulo para NW e SE. b) Estereograma com veios de quartzo medidos (n = 34), concordante com os planos de falha.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento trouxeram resultados expressivos quanto a diferenciação das litofácies em estudo com destaque para a litofácie intermediária, que apresenta valores consideravelmente mais elevados de coesão (c), alcançando 36,5 KPa de resistência devido a maior presença de matriz fina nestes níveis. Os ensaios realizados na litofácie inferior do maciço mostraram coesões nulas ou da ordem de 10 kPa. Essa diferença é devida ao grau e tipo de cimentação encontrada nas duas litofácies. As mesmas considerações são feitas para o ângulo de atrito, porém as litofácies mostram relativa similaridade, com resultados de ângulos de atrito internos variando entre 29 graus e 37 graus. Nesse caso, a direção do acamamento também interfere no resultado.

Ao longo dos perfis de sondagem foram determinados níveis específicos para a realização de ensaios de resistência a compressão simples, trazendo para as rochas da Formação Furnas (abaixo do nível da pista) resultados de resistência expressivamente variáveis devido aos diferentes graus de silicificação observados nestes pacotes.

As sondagens rotativas realizadas no local tiveram por objetivo descrever o perfil e recuperar amostras. Os furos realizados no nível da estrada mostram que há um pacote com espessura variando entre 12 m e 18 m de arenito friável onde não recuperam amostras. Sotoposto a esse arenito tem-se um arenito mais cimentado onde se observam acamamentos horizontais e fraturas subverticais. Esse pacote tem espessura variando entre 10 e 20 m.

Os testemunhos recolhidos foram analisados quanto a alguns parâmetros. O intemperismo ao longo do perfil varia de rocha sã e rocha muito alterada. O fato que chama a atenção é a falta de uma graduação nessa escala. Isso é, o material começa como muito alterado, vai para rocha sã e dai para moderadamente alterada e volta a muito alterada. Portanto, isso difere do típico que seria a da alteração ir se reduzindo com a profundidade.

O grau de fraturamento destas rochas varia entre pouco fraturada e muito fraturada. Novamente não se observa uma tendência de aumento ou redução com a profundidade. A inclinação das fraturas vai desde subhorizontal até subvertical passando pela inclinada. Essas fraturas têm superfície plana. As fraturas que estão mais próximas da superfície tendem a ter superfície sedosa. Possivelmente isso acontece por que o material mais próximo à superfície seja mais friável. Ao longo destas fraturas não há preenchimento. Em alguns casos há uma suspeita de preenchimento.

O RQD (Índice de Qualidade da Rocha) varia desde menos de 10 até quase 90%. A depender da posição dos furos os melhores valores de RQD estão próximos a superfície. Contudo, isso varia muito de um furo para o outro. Por todas essas informações pode se assegurar a variabilidade do material estudado.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, fica evidenciado que o maciço rochoso do Portão do Inferno apresenta em 03 (três) litofácies principais acima no nível estradal, compondo arenitos eólicos da Formação Botucatu, com características mecânicas rúpteis e alto grau de alteração, mostrando um maciço de rochas friáveis e com diferentes níveis de silicificação. Abaixo no nível do pontilhão são presentes os arenitos de origem fluvial deltaica da Formação Furnas, apresentando maiores graus de silicificação e coesão, com fortes fraturamentos verticalizados e acamamentos bem definidos sub-horizontalizados.

O emprego do levantamento geofísico permitiu observar estruturas não visíveis da superfície e locar de forma adequada as sondagens rotativas de modo a obter informações mais confiáveis das estruturas e delimitações das litofácies.

O mapeamento mostrou que as propriedades destas litofácies variam com clareza no que se refere à peso específico, granulometria, formato dos grãos, cimentação, mas também em características mecânicas como a resistência à compressão simples e a resistência ao cisalhamento. As direções de acamamento e os planos de fratura também estão se refletindo no comportamento do maciço. Essas fraturas e acamamentos conduzem água em diferentes direções gerando graus de alteração diferenciados em todo o maciço. Assim, é possível encontrar rocha alterada em profundidade tanto quanto em superfície. Alguns blocos de rocha tendem a rolar para o sul enquanto outros tendem a rolar para norte ou nordeste em função das diferentes estruturas presentes.

Na área deste estudo, o contato geológico entre as formações Furnas e Botucatu, segundo Lacerda Filho *et al.* (2004), são caracterizados como contatos discordantes sub-horizontalizados o que nos permite abrir a possibilidade de correlação dos níveis de matriz mais finas da litofácie intermediária deste estudo com os níveis de topo da Formação Ponta Grossa (Devoniano), composto de arenitos finos conglomeráticos que selam os pacotes pelíticos característicos desta formação. Os autores deste estudo propõem o aprofundamento das caracterizações geológicas para estes níveis com a aplicação de técnicas como microscopia, geocronologia e geoquímica, como forma de segmentar e definir os contatos geológicos locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à SINFRA-MT e a ECOPLAN pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) NBR 6502 – *Rochas e solos*. Rio de Janeiro

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) *Manual de pavimentação*. Publicação IPR – 719. 3ª Ed. Rio de Janeiro.

ECOPLAN (2025) *Investigação geofísica empregando o método da eletrorresistividade visando subsidiar o estudo geológico/geotécnico - Rodovia MT - 251 – Chapada dos Guimarães – Trecho Portão do Inferno.* ECOPLAN Engenharia, Mato Grosso.

ECOPLAN (2025) *Relatório Técnico de Ensaios Geotécnicos*. Relatório Técnico Nº RTE-928-25. ECOPLAN Engenharia, Mato Grosso.

Lacerda Filho *et al.* (2004) Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso: texto explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso. CPRM; SICME-MT. Mato Grosso.

Medeiros, V.C. & Rosa Costa, L.T. (2020) Guia de Procedimentos Técnicos. Vol. 1 – Cartografia Geológica. CPRM; DGM-DF. Brasília.

Ross, J. L. S (2014) *Chapada dos Guimarães: Borda da Bacia do Paraná*. Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume 28, p. 180-197.

Silva, M.M.F. (2018) *Análise geotécnico-estrutural da estabilidade das escarpas do Portão do Inferno-rodovia Emanuel Pinheiro, Chapada dos Guimarães-MT.* Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Geociências da Universidade Federal de Mato Grosso / UFMT, Mato Grosso.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/13

QUEDAS DE BLOCOS DE ROCHA EM MATRIZ DE MATERIAL INCONSOLIDADO: COMO CADA VARIÁVEL INFLUENCIA NO PROCESSO SEGUNDO UM VIÉS ESTATÍSTICO

Dr.ª Larissa Regina Costa Silveira
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, larissaeng07@gmail.com

Maria Luiza Ferreira Soares
Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, marialuizafs05@gmail.com

Giovana Pires Cardoso Gonçalves
Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovana.pcg1809@gmail.com

Dr.ª Maria Giovana Parisi
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, mgparizzi18@gmail.com

RESUMO: Quedas e rolamentos de blocos são movimentos com grande potencial de destruição, onde as diversas variáveis envolvidas devem ser compreendidas para evitar desastres e mitigar riscos. Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento das principais variáveis associadas à queda de blocos encrustados em solos por meio de estatística multivariada, utilizando Análise Fatorial Exploratória (AFE) e Análise de Componentes Principais (ACP). Foi analisado um banco de dados com 56 taludes do Colorado (EUA), considerando sete variáveis relacionadas ao perigo de queda, com notas entre 1 (condição favorável) a 4 (situação crítica). Na AFE, o KMO foi 0,68 e os MSA das variáveis superaram 0,65, indicando que a amostra é adequada. O Fator 1 reuniu altura do talude, irregularidades da superfície e tamanho dos blocos, representando a energia de queda, enquanto o Fator 2 considerou a precipitação, interpretada como gatilho climático. A ACP apresentou resultados consistentes com a AF: o primeiro componente concentrou as mesmas variáveis do Fator 1 e explicou 28% da variância, e os três primeiros componentes, associados a energia, alcance dos blocos e condições climáticas e ambientais, explicaram conjuntamente 64% do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Quedas de Blocos, Estatística Multivariada, Movimentos de Massa, Perigo, Blocos em Solos

ABSTRACT: Rockfall and block rolling are movements with high destructive potential, in which the various involved variables must be understood to prevent disasters and mitigate risks. This study aimed to analyze the behavior of the main variables associated with the fall of blocks embedded in soils using multivariate statistics, specifically Factor Analysis (FA) and Principal Component Analysis (PCA). A database comprising 56 slopes from Colorado (USA) was examined, considering seven variables related to fall hazard, rated from 1 (favorable condition) to 4 (critical situation). In the FA, slope inclination, block shape, and vegetation were excluded due to MSA values lower than 0.5. After removal, the KMO value was 0.68 and the remaining MSA exceeded 0.65, indicating sampling adequacy. Factor 1 grouped slope height, surface irregularities, and block size, representing fall energy, whereas Factor 2 corresponded to precipitation, interpreted as a climatic trigger. The PCA produced results consistent with the FA: the first component concentrated the same variables as Factor 1 and explained 28% of the variance, while the first three components, associated with energy, block reach, and climatic and environmental conditions, jointly, explained 64% of the model.

KEYWORDS: Rockfall, Multivaraite Statistic, Mass Moviment, Hazard, Blocks in Soils.

1 INTRODUÇÃO

Quedas de blocos são movimentos de massa complexos e dependentes de diversos fatores, a começar pelo tipo de maciço. Os parâmetros que desencadeiam quedas de blocos em maciços rochosos metamórficos ou ígneos são diferentes daqueles envolvidos em maciços sedimentares. Essa diferença se torna ainda maior para os casos em que os blocos de rocha estão envolvidos por camadas de materiais inconsolidados, comum em maciços de solos residuais e coluvionares, como depósito de tálus.

Tendo essa compreensão, alguns pesquisadores desenvolveram metodologias de análise de perigo e risco de quedas de blocos, respeitando as particularidades dos diferentes maciços e considerando o máximo de variáveis envolvidas no processo, como a metodologia de análise de perigo proposta por Santi et al. (2009), o *Colorado Rockfall Hazard Rating System* (CRHRS) e a metodologia proposta por Silveira et al. (2024), de análise quantitativa de suscetibilidade de queda de blocos em taludes cristalinos em geral, com posterior análise de risco direcionada a taludes de rodovias.

Quando se trata de processos geológicos, como movimentos de massa, o perigo (*hazard*) é compreendido como um evento com potencial de causar perda ou dano, sem necessariamente quantificar essas perdas. Recomenda-se a leitura dos trabalhos de Fell et al. (2008) e Brasil (2007) para melhor entendimento de conceitos como perigo, risco, suscetibilidade, vulnerabilidade, entre outros.

Uma análise de perigo de quedas e rolamentos de blocos, seja em taludes rodoviários, ferroviários, urbanos ou em qualquer outro ambiente, permite hierarquizar as regiões com maior urgência de intervenção e identificar as melhores alternativas de mitigação do perigo. Para isso, é necessário compreender como as variáveis envolvidas no processo atuam e quais são as mais críticas. Diante disso, o objetivo desse trabalho é compreender como as principais variáveis envolvidas em quedas e rolamentos de blocos em matriz de solo se comportam e se interrelacionam, a fim de propor, futuramente, uma metodologia de análise perigo para esse tipo de maciço. Para isso, utilizou-se técnicas de estatística multivariada em um banco de dados referente a queda de blocos em rodovias do Colorado (Estados Unidos).

2 METODOLOGIA

Na Figura 1 está o fluxograma do trabalho desenvolvido.

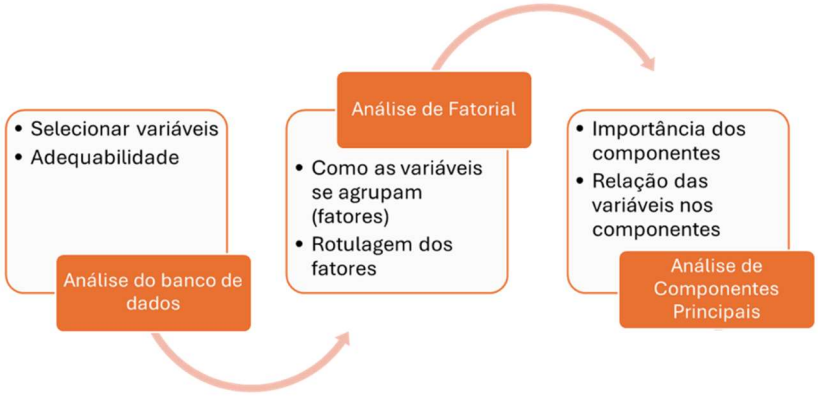


Figura 1. Fluxograma do trabalho.

2.1 Avaliação do banco de dados

O banco de dados analisado nesse trabalho é referente a aplicação do CRHRS em rodovias do Colorado (EUA) e foi utilizado por Santi et al. (2009) em sua proposta de modificação do CRHRS. É composto por 224 taludes em rochas cristalinas, 74 taludes em rochas sedimentares e 56 taludes cujos blocos de rocha estão encrustados em material inconsolidado (solo). Para esse trabalho, apenas os 56 taludes do último caso foram considerados.

Para os 56 taludes inseridos no banco de dados, todas as variáveis já estavam pontuadas com notas entre 3 a 81, sempre em múltiplos de 3, conforme os critérios estabelecidos pelo CRHRS (Santi et al., 2009), sendo

a nota 3 para características favoráveis a segurança e a nota 81, para as mais desfavoráveis. Ressalta-se que, nesse trabalho, as notas 3, 9, 27 e 81 foram modificadas, respectivamente, por 1, 2, 3 e 4.

Primeiramente, foram selecionadas as variáveis, dentre as várias contidas no banco, que seriam de fato utilizadas nesse trabalho. Como o intuito dessa pesquisa é entender como as variáveis se interrelacionam e contribuem para o perigo de queda de blocos, independente do tipo de talude, ou obra e independente da localização geográfica, variáveis relacionadas as características de rodovias, tráfego e neve foram excluídas.

A variável Frequência de Queda não foi considerada por ser de difícil obtenção em taludes que não são monitorados. Também foi retirada a variável Condição de Água, pois dos 56 taludes, 55 tinham a nota 3 pelo CRHRS (equivalente a nota 1) nesse parâmetro e apenas um talude tinha nota 9 pelo CRHRS (equivalente a nota 2 nesse trabalho); logo, não há variabilidade. A Tabela 1 mostra as variáveis selecionadas, com as devidas características a serem pontuadas.

Não foram feitas modificações nos critérios de pontuação das variáveis e suas características, ou seja, foi mantido aquilo que já havia sido adotado no CRHRS e por Santi et al. (2009). A variável Escore de inclinação do talude é obtida através do ábaco proposto por Maerz et al. (2005) (Figura 2).

Tabela 1. Variáveis selecionadas para análise (adaptado de Santi et al., 2009).

Nota atribuída	1	2	3	4
1) Altura do Talude (m) - H	7,5 a 15	15 a 23	23 a 30	> 30
2) Escore de inclinação do talude - Inc	0 a 2	2 a 4	4 a 8	> 8
3) Irregularidade na superfície do talude - Irreg	Nenhuma	Menores	Maiores	Extremas
4) Precipitação anual (mm) - Precip	< 250	250 a 500	500 a 900	> 900
5) Tamanho do Bloco (m) - Size	Até 0,3	0,3 a 0,6	0,6 a 1,2	> 1,2
6) Forma do bloco - Forma	Tabular	Maciço/compacto	Compacto angular	Arredondado
7) Vegetação - Veg	Vegetado	Desigual	Plantas isoladas	Nenhuma

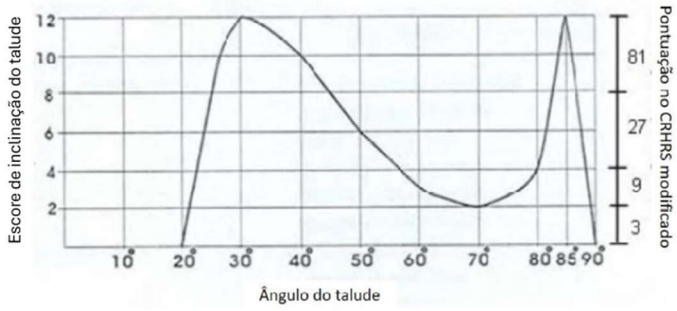


Figura 2. Ábaco de Maerz et al. (2005) para determinar o escore referente à inclinação do talude pelo CRHRS modificado (adaptado de Santi et al., 2009).

Posteriormente, foi avaliado se os requisitos básicos para aplicação das técnicas de estatística multivariada eram atendidos. De acordo com Hair et al. (2009), o banco de dados deve possuir pelo menos 5 vezes mais indivíduos que variáveis. Além do mais, as variáveis devem ser correlacionadas, o que pode ser identificado através do Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951), que compara a matriz de correlação das variáveis com a matriz identidade. Se o p-valor do teste for menor que 0,05, pode-se considerar, com 95% de confiança, que a matriz de correlação é diferente da matriz identidade, logo, os dados são correlacionados.

2.2 Análise Fatorial

A análise fatorial exploratória (AFE) é uma técnica de estatística multivariada cujo objetivo é identificar as relações entre as variáveis, agrupando-as em fatores interpretáveis. Em resumo, enquanto a análise de agrupamento (ou análise de *cluster*) agrupa os indivíduos de acordo com medidas de similaridade, a AFE

agrupa as variáveis de acordo com suas relações de covariância, permitindo uma interpretação dos fatores de acordo com as variáveis agrupadas.

Alguns pré-requisitos devem ser avaliados ao aplicar a AFE. Além de verificar a correlação das variáveis, através do Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951), outros índices de adequabilidade do banco de dados devem ser verificados especificamente para a AFE, sendo eles o KMO (*Kaiser-Meyer-Olkin*) e o MSA (*Measure of Sampling Adequacy*). O MSA avalia a adequação das variáveis individualmente, enquanto o KMO é uma medidade de adequação global da amostra. De modo geral, valores de KMO e MSA menores que 0,5 são considerados insuficientes, valores entre 0,5 e 0,6 são ruins; valores entre 0,6 e 0,7 são considerados regulares; valores entre 0,7 e 0,8 são considerados bons; valores maiores que 0,8 e 0,9 são considerados ótimos e excelentes, respectivamente (Kaiser & Rice, 1974).

Nesse trabalho, a AFE foi feita no *freeware* R (R Core Team, 2023), bem como a determinação dos índices mencionados acima. A função utilizada foi a fa() que está no pacote psych (Revelle, 2024). Essa função permite que a extração dos fatores, ou seja, como se dará o agrupamento das variáveis dentro dos fatores, bem como a carga de cada variável dentro dos fatores, seja feita por diversas maneiras, como método das componentes principais (“pa”), método dos resíduos mínimos (“minres”), método dos mínimos quadrados ponderados (“wls”), entre outros. O método de extração selecionado foi o que apresentou os melhores resultados.

A fim de potencializar a AFE e facilitar a interpretação dos fatores, foi utilizada a rotação “varimax”. O número de fatores extraídos foi indicado pelo critério de Kaiser (Kaiser, 1958). Maiores explicações sobre a matemática envolvida na AFE, bem como um detalhamento maior sobre métodos de extração de fatores e de rotação podem ser consultados em Hair et al. (2009) e Mingotti (2013).

2.3 Análise de Componentes Principais

Análise de componentes principais (ACP) é uma técnica de estatística multivariada onde um conjunto de variáveis correlacionadas é transformado em outro conjunto de variáveis não correlacionadas através de combinações lineares, chamadas componentes principais (Mingoti, 2013). O número de componentes principais geradas é igual ao número de variáveis.

A quantidade de informação em relação aos dados originais que cada componente carrega é relacionada com a variância explicada por cada componente e essa variância é dada em ordem decrescente, ou seja, a primeira componente explica melhor o modelo que a segunda e assim sucessivamente. Sendo assim, uma das principais finalidades da ACP é reduzir a dimensionalidade do banco de dados mantendo o máximo possível da informação contida nesse banco.

O objetivo do uso da ACP nesse trabalho é verificar quais as variáveis possuem maior peso nos componentes principais que carregam a maior parte da informação do banco de dados, a fim de compreender, não só quais são as mais relevantes e devem receber maior peso em uma futura metodologia de classificação de perigo de queda de blocos, mas também como elas se distribuem nos componentes, a fim de rotulá-los.

Todas as análise e critérios relacionados a ACP foram feitos através do *freeware* R (R Core Team, 2023). Para determinar quantos componentes devem ser retidos para análise, ou seja, reduzir a dimensão do banco de dados sem que as informações sejam perdidas, foi utilizado o critério de Kaiser (Kaiser, 1958). Apesar dos dados serem categóricos, a ACP foi feita através da matriz de correlação, a fim de evitar qualquer viés em relação a discrepâncias de valores.

Para a ACP, foi utilizada a função pca() que está no pacote FactoMineR (Lê et al., 2008). Essa função permite extrair a matriz de autovetores normalizados da matriz de correlação das variáveis, que são justamente os coeficientes que se multiplicam aos valores padronizados das variáveis, formando as combinações lineares. Além do mais, essa função também permite visualizar qual a contribuição de cada variável em cada componente e extrair a carga dos componentes, que é a correlação entre a cada variável com cada componente.

Sendo assim, para os componentes considerados de acordo com o critério de Kaiser (1958), foram avaliados os autovetores associados às variáveis para esses componentes, bem como a contribuição de cada variável, a fim de determinar quais eram as mais importantes e, de acordo com as variáveis mais importantes em cada componente retido, rotulá-los.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Adequabilidade do banco de dados

O Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951) apontou um p-valor igual a $6{,}05 \times 10^{-5}$, logo, pode-se considerar que as variáveis são correlacionadas e, portanto o banco é adequado para análises de estatística multivariada. Além do mais, como o banco de dados possui 56 taludes, com 7 variáveis, o tamanho da amostra obedece ao mínimo recomendado por Hair et al. (2009).

3.2 Análise Fatorial

Considerando inicialmente todas as variáveis presentes no banco de dados, a AFE foi aplicada conforme explicado na metodologia. O valor do KMO foi de 0,56, enquanto que o MSA das variáveis Forma dos blocos (Forma) e Vegetação (Veg) foi inferior a 0,5; apenas as variáveis Altura (H) e Tamanho dos Blocos (*Size*) apresentaram MSA regular, o que indica que o banco de dados não é plenamente adequado para aplicação da técnica AFE (Figura 3a). Ainda assim a análise prosseguiu a fim de interpretar o comportamento das variáveis.

O Critério de Kaiser indicou que deveria ser retido um número k de fatores igual a 3 (Figura 3a). Diversos métodos de extração e rotação foram testados, sendo o método de extração dos resíduos mínimos, com rotação varimax selecionados. A Figura 3b mostra os três fatores (MR1, MR2 e MR3) com as devidas cargas de cada variável. Em MR1, as variáveis com maior carga e, portanto, mais signifivativas são Irregularidades na superfície (Irreg), Precipitação (Precip) e Tamanho dos blocos (*Size*). Em MR 2, a variável mais significativa foi Vegetação (Veg). Em MR3, Altura (H), Inclinação (Inc) e Forma dos blocos (Forma).

MR1 pode ser interpretado como um fator de energia e dinâmica de movimento dos blocos, cuja queda pode estar condicionada à precipitação. MR2 é composta apenas por vegetação, sendo esse o próprio rótulo do fator. MR3 pode ser rotulado como um fator geométrico, onde tanto a geometria do talude, quanto dos blocos contribuem para um maior ou menor alcance dos mesmos.

a)

```
> KMO(R)
Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy
Call: KMO(r = R)
Overall MSA =  0.56
MSA for each item =
     H    Inc  Irreg Precip   Size  Forma    Veg
  0.62   0.50   0.56   0.58   0.63   0.46   0.43
> k = sum(eigen(R)$values>=1)
> k
[1] 3
```

b)

	MR1	MR3	MR2
H	0.47616842	0.67866651	-0.02005792
Inc	0.03421336	0.44861342	-0.05676617
Irreg	0.75429329	0.06833508	-0.01660038
Precip	-0.31822666	0.07361755	0.16635696
Size	0.57751935	0.10961512	0.16476923
Forma	0.11082844	-0.65888439	-0.12576326
Veg	0.01550135	-0.01754393	0.99739920

Figura 3. a) KMO e MSA das variáveis. b) Cargas fatoriais de cada variável nos 3 fatores.

Embora tenha sido possível rotular os fatores mesmo com KMO ruim e MSA insuficiente para algumas variáveis, alguns problemas puderam ser identificados nas cargas de algumas variáveis. Nota-se que a variável Precip. apresentou uma carga próxima a 0,32 em MR1, sendo que o valor mínimo considerado para interpretar a estrutura de fatores é 0,30. Além do mais, H apresenta carga significativa tanto para MR1, quanto para MR3, visto que o valor da carga atribuída a ela em ambos fatores é alta (carga cruzada). Sendo assim, optou-se por excuir as variáveis problemáticas Inc, Forma e Veg, cujo MSA era menor ou igual a 0,5 e refazer a AFE a fim de comparar os resultados. Ressalta-se que embora essas variáveis não seja estatisticamente significativas nessa AFE, elas são de grande relevância em análise de perigo de queda de blocos.

O Teste de Esfericidade de Bartlett (Bartlett, 1951) para o banco de dados reorganizado apontou um p-valor igual a 0,00013. O número de fatores k sugerido pelo critério de Kaiser foi 1. No entanto, optou-se por extrair 2 fatores. O método de extração utilizado foi dos mínimos quadrados ponderados, com rotação varimax. O KMO foi de 0,69, com MSA superior a 0,60 para todas as variáveis, mostrando uma melhor adequação do banco de dados para AFE (Figura 4a). Na Figura 4b estão os dois fatores, WLS1 e WLS2, com as devidas cargas de cada variável. Uma observação, é que na primeira AFE, os fatores foram chamados de MR, devido ao método de extração ser pelos resíduos mínimos (*Minimun Residuals*). Na segunda AFE, a sigla dos fatores foi WLS devido ao método de extração dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares*).

a)

```
> KMO(R)
Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy
Call: KMO(r = R)
Overall MSA =  0.69
MSA for each item =
     H  Irreg Precip   Size
  0.70   0.66   0.74   0.69
```

b)

```
> unclass(L1)
                WLS1        WLS2
H         0.5692746 -0.03966155
Irreg     0.6701711 -0.15347088
Precip   -0.1373426  0.96007168
Size      0.6365450 -0.06757575
```

Figura 4. a) KMO e MSA das variáveis. b) Cargas fatoriais de cada variável nos 3 fatores.

Observando a Figura 4b, percebe-se que os problemas de carga cruzada e de variáveis com cargas baixas em todos os fatores foram resolvidos. Em WLS1, as variáveis mais influentes foram H, Irreg e *Size*, podendo então, rotula-lo como um fator de energia potencial dos blocos. Quanto maior a altura e o tamanho, maior a energia potencial que o bloco atinge, logo, maior seu poder destrutivo. Isso, aliado a irregularidades na superfície do talude, pode fazer com que a trajetória do bloco seja alterada e ele se comporte como um projétil, alcançando grandes distâncias. WLS2 é um fator climático, sendo a precipitação um importante gatilho para movimentos de massa.

3.3 Análise de Componentes Principais

Como o banco de dados possui 7 variáveis, 7 componentes principais (CP) foram gerados. O Critério de Kaiser (1958) foi aplicado e retornou que, dentre as 7, podem ser retidas 3 componentes principais a fim de reduzir a dimensão do banco de dados e, portanto, facilitar as análises sem perda significativa das informações que o banco de dados original fornece. A Tabela 2 mostra a porporção da variância explicada por cada componente (Var), bem como a proporção cumulativa (VCum), onde se nota que os 3 primeiros componentes preservam quase 65% da informação, sendo que 27,58% está na CP1.

Tabela 2. Variâncias explicadas por cada componente e variância cumulativa

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
Var (%)	27,58	19,43	17,45	12,82	9,85	7,53	5,34
VCum	27,58	47,01	64,46	77,28	87,12	94,65	100

Os 3 componentes principais retidos estão representados pelas Equações 1 a 3, que são as combinações lineares formadas pelos autovetores da matriz de correlação multiplicados pelas notas padronizadas de cada variável (ver Tabela 1).

$$CP1 = 0{,}554Z1 + 0{,}002Z2 + 0{,}531Z3 - 0{,}270Z4 + 0{,}537Z5 - 0{,}212Z6 + 0{,}058Z7 \quad (1)$$

$$CP2 = -0271Z1 + 0{,}424Z2 + 0{,}363Z3 - 0{,}284Z4 + 0{,}073Z5 + 0{,}685Z6 - 0{,}244Z7 \quad (2)$$

$$CP3 = -0{,}086Z1 + 0{,}502Z2 + 0{,}095Z3 + 0{,}527Z4 + 0{,}201Z5 + 0{,}030Z6 + 642Z7 \quad (3)$$

Onde:
CPx = componente principapal x, para x = 1,2,3,...,7;
Zx = nota padronizada da variável x, para x = 1,2,3,...,7.

Observando os coeficientes associados a cada variável Zx no CP1, pode-se perceber que os maiores são os multiplicados por Z1, Z3 e Z5, que representam, respectivamente, altura do talude (H), irregularidades no talude (Irreg.) e tamanho do bloco (*Size*). Logo, pode-se considerar que, de acordo com a ACP, essas variáveis podem ser bastante relevantes para explicar o perigo de queda de blocos, afinal, CP1 é o componente que possui a maior variância explicada, seguido de CP2 e CP3. Seguindo o mesmo raciocínio para CP2, as variáveis mais importantes são inclinação do talude (Inc.), Irreg. e a forma dos blocos (Forma). Para CP3, as variáveis são Inc., Precipitação (Precip.) e Vegetação (Veg.).

Observando as variáveis mais relevantes em cada um dos 3 componentes, é possível também rotulá-los. Quanto maiores as notas (3 ou 4) atribuídas às variáveis H, Irreg. e *Size,* maior o valor de CP1, logo, esse

componente pode ser rotulado como um índice de energia dos blocos em queda. Quanto maior a altura e o tamanho do bloco, maior a energia potencial. Se a superfície do talude é irregular, esses grandes blocos podem ricochetear e se comportar como projéteis. Essa interpretação é a mesma do fator 1 (WLS1) da segunda AFE.

A CP2 pode ser considerada como um índice de alcance dos blocos, visto que quanto maiores as notas para inclinação do talude (Z2), irregularidades em sua superfície (Z3) e forma dos blocos (Z6), maior é seu valor. A inclinação do talude nesse trabalho foi considerada por um viés de alcance dos blocos, conforme mostrado na Tabela 1 e Figura 2, com maiores detalhes em Santi *et al*. (2009). Então, as maiores notas para Inc. são para os casos em que blocos em queda tendem a atingir grandes distâncias. Em relação a forma dos blocos, quanto mais arredondado, maior sua tendência em rolar e também atingir grandes distâncias. Esse resultado se aproxima do fator 3 (MR3) da primeira AFE.

Já o CP3 é um componente climático e ambiental, que na verdade funciona como um gatilho para quedas de blocos encrustados em solos. Quanto menos vegetado (Z7) é um talude, maior a tendência em sofrer processos erosivos e escorregamentos, sobretudo quando a precipitação (Z4) é elevada. Essas duas variáveis são as mais relevantes no CP3 (Equação 3). Na Figura 5 estão os gráficos gerados no R de contribuição de cada variável nos 3 componentes, para reforçar ainda mais essas discussões.

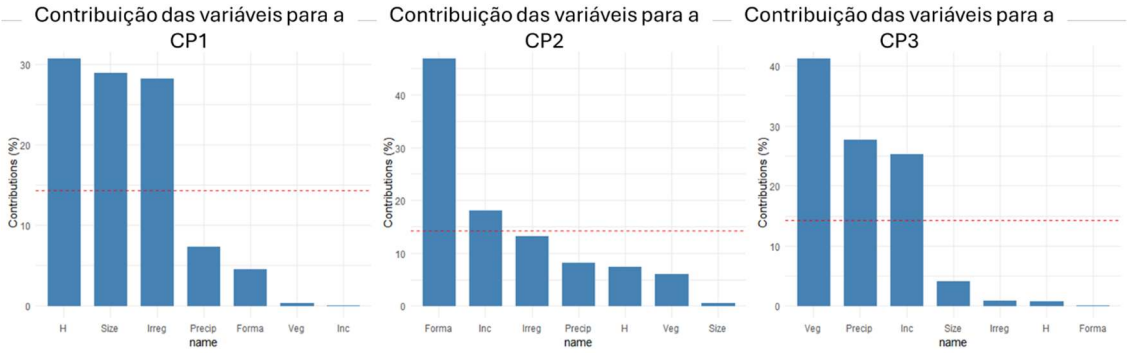


Figura 5. Contribuição de cada variável com cada componente.

4 CONCLUSÕES

Os estudos estatísticos realizados nesse trabalho mostram que a geometria do talude, principalmente a altura e irregularidades na superfície e o tamanho dos blocos são variáveis fundamentais para classificar um talude com blocos encrustados em solos quanto ao perigo de queda, além da precipitação.

Quanto maior é um bloco que cai de um talude alto, maior sua energia potencial e cinética, o que aumenta o seu poder destrutivo. Se a superfície do talude for irregular, o bloco pode tomar trajetórias complexas e atingir maiores distâncias, sendo mais difícil prever até onde vai uma possível zona exposta ao perigo. Maiores precipitações, além de serem gatilhos que desencadeiam movimentos de massa, contribuem para acelerar processos erosivos, que expões e descalçam blocos de rocha.

Apesar de esses estudos serem preliminares, já indicam quais as variáveis que devem receber maior peso em uma futura metodologia quantitativa de determinação do perigo de quedas de blocos em taludes como os tratados nesse trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam avaliadas as características e faixas de pontuações propostas para cada variável no CRHRS e que foram utilizadas também aqui, com o objetivo de verificar se essas faixas são também adequadas para taludes brasileiros, sobretudo no que diz respeito à condições climáticas, como precipitação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sobretudo à Pro-Reitoria de Pesquisa e ao Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) do Instituto de Geociências da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bartlett, M. S. 1951. The Effect Of Standardization On A Chi Square Approximation In Factor Analysis. *Biometrika*; 38:337 44.

BRASIL. Ministério das Cidades; IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (2007) *Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.* Brasília: MCidades; IPT, 2007. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/ publicacoes/publicacoes-periferias. Acesso em 10 fev. 2026.

Fell R.; Corominas J.; Bonnard C.; Cascini L.; Leroi E.; Savage W.Z. 2008. Guidelines For Landslide Susceptibility, Hazard And Risk Zoning For Land Use Planning. *Engineering Geology* 102 (2008) 85 98. www.elsevier.com/locate/enggeo.

Hair, J.F.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. 2009. *Análise Multivariada De Dados*. Porto Alegre: Bookman, 688 P.

Kaiser, H.F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200. https://doi.org/10.1007/BF02289233.

Kaiser, H. F., & Rice, J. (1974). Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement*, 34(1), 111–117. https://doi.org/10.1177/001316447403400115.

Lê, S.; Josse, J.; Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

Maerz, N.H.; Youssef A., Fennessey, T.W. (2005) New Risk-Consequence Rockfall Hazard Rating System For Missouri Highways Using Digital Image Analysis. *Environmental And Engineering Geoscience* 11, 229 249 2005.

Mingoti, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. 2ª reimpressão. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013. 295 p.

R Core Team (2023). R: *A Language And Environment For Statistical Computing*. R Foundation For Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.r project.org/.

Revelle, W. (2024). _psych: *Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research_*. Northwestern University, Evanston, Illinois. R package version 2.4.1, <https://CRAN.R-project.org/package=psych>.

Santi, P. M.; Russel, C. P.; Higgins, J. D.; Spriet, J. I. 2009. Modification and Statistical Analysis of The Colorado Rockfall Hazard Rating System. Engineering Geology 104 (2009) 55 65.

Silveira, L.R.C.; Lana, M.S. & dos Santos, T.B. (2024) A Quantitative Rockfall Risk Analysis System for Highway Rock Slopes. *Geotech Geol Eng* **42**, 1131–1152. https://doi.org/10.1007/s10706-023-02609-z

COBRAMSEG 2026

ANAIS DO

XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Eixo Temático:

Geossintéticos na Engenharia

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABMS | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Centro-Oeste
Núcleo Regional

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/14

A Influência da Variabilidade dos Parâmetros de Solda na Instalação de Geomembranas de PEAD.

Sergio Luiz da Costa Junior
Consultor Técnico, Nortène Plásticos, Jundiaí, Brasil, sergio.costa@nortene.com.br

Patrícia Natalí Ferreira
Consultora Técnica, Nortène Plásticos, Porto Alegre, Brasil, patricia.ferreira@nortene.com.br

Andreia Rodrigues Machado
Consultora Técnica, Nortène Plásticos, Porto Alegre, Brasil, andreia.machado@nortene.com.br

RESUMO: As geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) estão sendo cada vez mais utilizadas na construção de barragens, pilhas e reservatórios de água, devido à sua função de barreira. As geomembranas são fabricadas em painéis e, no campo, é feita sua instalação por meio de sobreposição de 15 cm e fixação por termofusão. Portanto, as soldas das geomembranas tornam-se o elemento mais crítico para garantir a estanqueidade dos sistemas de barreira, pois, mesmo que as geomembranas apresentem excelentes propriedades hidráulicas, uma falha na solda pode comprometer totalmente o sistema. Temperatura, pressão e velocidade são os parâmetros de calibração dos equipamentos de solda por termofusão das geomembranas. Esses parâmetros controlam diretamente a qualidade da solda e precisam ser ajustados e monitorados durante as obras, em função da espessura do material e das condições ambientais. Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da temperatura, da pressão e da velocidade na qualidade da solda. Em ambiente controlado, foram realizadas soldas por termofusão em tiras de geomembranas de PEAD, variando esses parâmetros. Após a execução das soldas, corpos de prova foram talhados e submetidos aos ensaios de cisalhamento e descolamento em um tensiômetro, para avaliar a resistência da solda. Conclui-se que a velocidade e a temperatura são os parâmetros que mais afetam a qualidade da solda, assim, identificar em campo o conjunto mais eficiente permitirá garantir a integridade das juntas soldadas.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembrana, Instalação, Parâmetros de Solda, Termofusão

ABSTRACT: High-Density Polyethylene (HDPE) geomembranes are being increasingly used in the construction of dams, stockpiles, and water reservoirs due to their barrier function. Geomembranes are manufactured in panels, and their field installation is performed through a 15 cm overlap and fixed by thermal fusion. Therefore, geomembrane seams become the most critical element to ensure the watertightness of barrier systems because, even if the geomembranes exhibit excellent hydraulic properties, a seam failure can completely compromise the system. Temperature, pressure, and speed are the calibration parameters for thermal fusion welding equipment. These parameters directly control seam quality and must be adjusted and monitored during construction, depending on material thickness and environmental conditions. This study aims to verify the influence of temperature, pressure, and speed on seam quality. In a controlled environment, thermal fusion welds were performed on HDPE geomembrane strips by varying these parameters. After welding, specimens were cut and subjected to shear and peel tests in a tensiometer to evaluate seam strength. It is concluded that speed and temperature are the parameters that most affect seam quality; thus, identifying the most efficient set in the field will ensure the integrity of the welded joints.

KEYWORDS: Geomembrane, Installation, Welding Parameters, Thermal Fusion.

1 INTRODUÇÃO

Scheirs (2009) explica que as geomembranas de PEAD ganharam populariedades no inicio das década de 80 devido a sua alta resistência química e facilidade de soldar as geomembranas com processos termicos

ao invés de processos químicos, como nas geomembranas de PVC. Logo, a crescente demanda por soluções seguras e ambientalmente adequadas em obras geotécnicas tem impulsionado o uso de sistemas de barreira com geomembranas, especialmente em aplicações como barragens, pilhas de rejeito, aterros sanitários e reservatórios. Nesse contexto, as geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) destacam-se por sua baixa permeabilidade, elevada resistência química e durabilidade, sendo amplamente utilizadas como elementos de barreiras. Segundo Scheirs (2009), o desempenho desses sistemas está diretamente relacionado à integridade do material polimérico e, sobretudo, à qualidade das juntas soldadas, que representam pontos potencialmente críticos quanto à estanqueidade e ao comportamento mecânico global do sistema.

Solda por termofusão é o principal método empregado na união de painéis de geomembranas em campo e em fábrica, sendo considerada uma etapa determinante para o desempenho do sistema de impermeabilização. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 16199:2020, o processo consiste na sobreposição dos painéis e na aplicação controlada de calor, pressão e velocidade por meio de equipamentos específicos, de modo a promover a fusão adequada do material e garantir a continuidade hidráulica e estrutural da barreira . A variabilidade desses parâmetros operacionais, no entanto, pode influenciar significativamente a qualidade da solda, tornando essencial o controle rigoroso do processo.

De acordo com Koerner (2012), a resistência mecânica das juntas soldadas deve ser equivalente ou superior à do próprio material base, sendo comumente avaliada por ensaios de cisalhamento e descolamento. O autor destaca que desvios nos parâmetros de soldagem, como temperaturas inadequadas ou velocidades incompatíveis com a espessura da geomembrana, podem resultar em defeitos como soldas frias ou degradadas, comprometendo a integridade do sistema.

Geosynthetics Institute (GRI GM19a) reforça a importância da calibração dos parâmetros operacionais em função das condições específicas de cada obra, incluindo espessura da geomembrana, condições ambientais e características do equipamento. Tais recomendações evidenciam que não existe um único conjunto de parâmetros universalmente aplicável, sendo necessária a realização de ensaios preliminares para definição das condições ótimas de soldagem. De forma complementar, o Bulletin 135 do ICOLD (2010) ressalta que falhas em sistemas de vedação frequentemente estão associadas a deficiências na execução das juntas, e não ao material em si, reforçando a criticidade do controle tecnológico nessa etapa.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo central avaliar a janela de soldabilidade para geomembranas de PEAD de espessura 1,0 mm, analisando a influência da variabilidade dos parâmetros operacionais (temperatura e velocidade) na integridade mecânica das juntas soldadas, visando garantir a estanqueidade e a segurança de sistemas de barreira em obras geotécnicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudos

O presente estudo foi realizado em Manaus (AM), nas dependências da unidade industrial da empresa produtora de geomembranas EZGEO, pertencente ao Grupo Nortène. Nessa unidade, foram utilizadas geomembranas íntegras, obtidas diretamente da linha de produção, sem a ocorrência de danos ou processos degradativos associados ao transporte, às operações em campo ou às variações térmicas.

2.2 Caracterização da Geomembrana

Para este trabalho, foram utilizadas três amostras de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade), com espessura de 1,00 mm. As caracterizações físicas e mecânicas das geomembranas foram realizadas conforme os parâmetros estabelecidos pela norma GRI GM-13 (2019). A Tabela 1 lista as propriedades ensaiadas, as suas respectivas normas e os valores encontrados. Os ensaios mecânicos de tração, perfuração e rasgo foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, dentro do laboratório de qualidade da empresa Nortène Plástico LTDA.

Tabela 1. Propriedades da Geomembrana

Propriedade	Método	GM 1	GM-2	GM-3	Média
Espessura	ASTM D 5994	1,03	1,03	1,02	1,027
Densidade	ASTM D1505	0,943	0,944	0,951	0,946
Resistência à Tração - Tensão no Escoamento	ASTM D6693	16,43	17,23	18,17	17,28
Resistência à Tração - Tensão na Ruptura		31,78	32,72	31,34	31,95
Resistência à Tração - Alongamento Escoamento		15,33	15,8	15,58	15,57
Resistência à Tração - Alongamento Ruptura		807,6	789,1	736	777,57
Resistência ao rasgo	ASTM D1004	145	153,5	162,1	153,53
Resistência à perfuração	ASTM D4833	421,23	428,25	455,66	435,05
Teor de negro de fumo	ASTM D4218	2,41	2,77	2,67	2,62

Conforme apresentado na Tabela 1, todas as propriedades avaliadas da geomembrana encontram-se superiores aos valores estipulados pela GM-13.

2.2 Soldas por Termofusão

Para a realização dos ensaios, as soldas por termofusão foram executadas em ambiente fabril controlado, utilizando geomembranas recém-produzidas, sem interferências de campo. Os painéis foram sobrepostos e soldados com termofusora automática de cunha quente COMET da marca LEISTER, que permite a variação da temperatura entre 0,80m/min e 3,2m/min, variação na temperatura entre 280 e 420 graus celcius e pressão até 1000N. Foram realizados ajustse prévio dos parâmetros de temperatura, pressão e velocidade, definidos a partir de soldas de calibração. As condições ambientais foram mantidas estáveis ao longo do processo, garantindo repetibilidade.

Após a execução das soldas, realizou-se inspeção visual preliminar para verificação de possíveis descontinuidades, defeitos superficiais ou irregularidades no cordão de solda. Em seguida, foram retiradas amostras para a realização dos ensaios de avaliação da resistência e integridade das juntas. Foram analisadas a resistência ao cisalhamento e ao descolamento, conforme a ASTM D6392, máquina universal de ensaios da marca EMIC. A Figura 1 apresenta ensaio de descolamento sendo realizado.



Figura 2 – Ensaio de Descolamento

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados nos ensaios de solda por termofusão, com a variação das propreidades de solda: temperatura, pressão e velocidade.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de solda

Teste	Temperatura (ºc)	Velocidade (m/min.)	Pressão	Observação	Cisalhamento (N/25mm)	Descolamento (N/25mm)
T1	280	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T2	280	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T2.1	280	1.0	2.5	Queimada	NA	NA
T2.2	280	1.0	1.0	Queimada	NA	NA
T3	280	1.5	3.0	Ok	416,8	359,0
T7	280	3.2	3.0	Ok	391,6	361,2
T8	300	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T9	300	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T10	300	1.5	3.0	Ok	405,9	380,4
T14	300	3.2	3.0	Ok	391,3	355,0
T15	320	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T16	320	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T17	320	1.5	3.0	Ok	406,3	362,1
T21	320	3.2	3.0	Ok	400,1	374,8
T22	340	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T23	340	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T24	340	1.5	3.0	Ok	404	370,2
T28	340	3.2	3.0	Ok	380	359,1
T29	360	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T30	360	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T31	360	1.5	3.0	Ok	389,9	358,5
T35	360	3.2	3.0	Ok	410	378,7
T36	380	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T37	380	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T38	380	1.5	3.0	Ok	393,3	354,0
T42	380	3.2	3.0	Ok	424,3	381,9
T43	400	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T44	400	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T45	400	1.5	3.0	Ok	413,7	335,7
T49	400	3.2	3.0	Ok	404	362,0
T50	420	0.80	3.0	Queimada	NA	NA
T50.1	420	0.80	1.0	Queimada	NA	NA
T51	420	1.0	3.0	Queimada	NA	NA
T51.1	420	1.0	2.5	Queimada	NA	NA
T51.1	420	1.0	1.0	Queimada	NA	NA
T52	420	1.5	3.0	Queimada	NA	NA
T52.1	420	1.5	2.5	Queimada	NA	NA
T53	420	2.0	3.0	Ok	402,1	339,3
T55	420	3.2	3.0	Ok	412,3	362,7

Os resultados obtidos permitem uma análise consistente da influência dos parâmetros de soldagem, como temperatura e velocidade, no desempenho mecânico das juntas de geomembrana de PEAD com

espessura nominal de 1,0 mm, evidenciando forte correlação entre a janela de soldabilidade definida e a qualidade estrutural das soldas.

2.1. Janela de Soldabilidade

A análise experimental permitiu mapear a correlação entre temperatura, velocidade e pressão, consolidando a "janela de soldabilidade" para a geomembrana de PEAD. De forma geral, observa-se que as combinações de parâmetros situadas dentro da janela operacional proposta entre 280 e 400 °C, com velocidade variando entre 1,5 e 3,2 m/min resultaram em soldas com desempenho mecânico satisfatório, atendendo integralmente aos requisitos estabelecidos pelas normas GRI GM19a e ABNT NBR 16199.

2.1.1 Degradação por Excesso de Energia (Burn-through)

Amostras submetidas a baixas velocidades (≤ 1,0 m/min) com temperaturas acima de 280°C resultaram em falhas, queimando os material. Isso ocorre porque o tempo de exposição térmica excedeu a capacidade de absorção do polímero, levando à degradação térmica e perda de seção transversal, o que invalida a solda mecanicamente.

2.1.2 Zona de Operação Segura

A janela ideal de operação validada situa-se no intervalo de temperatura de 280°C a 420°C, com velocidades variando entre 1,5 e 3,5 m/min. Dentro desta faixa de valores, a elevação da temperatura localizada permitiu o entrelaçamento das cadeias poliméricas sem comprometer a estrutura molecular do material base, ou seja, permitiu que a solda da geomembrana acontece, sem que houvesse perda na qualidade dos parâmetros desejados e sem que houvesse dano aos materiais.
A Figura 2 apresenta a janela de soldabilidade, destacando que as geomembranas de PEAD possuem no geral, uma ampla janela de soldabilidade e que os parâmetros de solda escolhidos dentre a faixa verde destacada são adequadas para o material, corroborando os fundamentos físico-químicos da soldagem por fusão de polímeros, nos quais a coalescência das cadeias poliméricas é maximizada em condições térmicas e cinemáticas equilibradas.

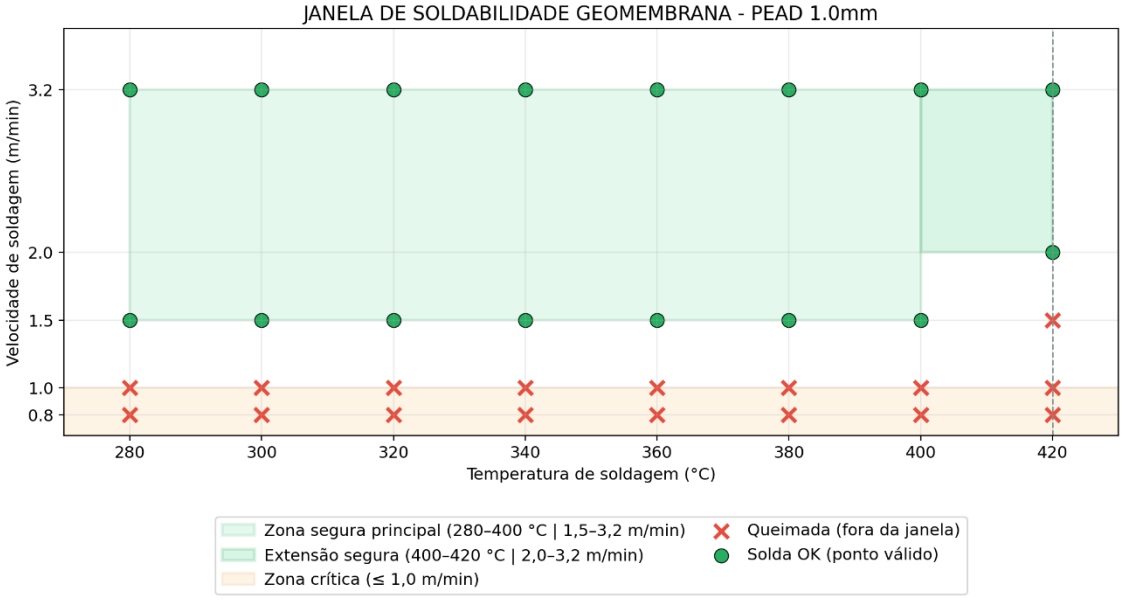


Figura 2 - Janela de Soldabilidade

Por outro lado, a análise dos pontos fora da janela de soldabilidade reforça a importância do controle operacional. Em condições de velocidades reduzidas, ou seja, velocidade inferior à 1,0 m/min,

independentemente da temperatura escolhiada, resultaram em degradação térmica do material, caracterizada como "solda queimada" da geomembrana e consequente perda de integridade do material. Esse efeito decorre do tempo excessivo de exposição ao calor, derrentando, queimando e, assim, promovendo alteração das propriedades do PEAD, o que inviabiliza a formação de uma interface estruturalmente confiável.
Outro aspecto relevante é a validação da extensão da janela para temperaturas mais elevadas (até 420 °C), desde que associadas a velocidades mínimas de 2,0 m/min. Os resultados demonstram que, nessas condições, é possível manter desempenho mecânico adequado, o que indica que o fator crítico não é apenas a temperatura isoladamente, mas sim o balanço térmico imposto pela relação temperatura × tempo de exposição (velocidade). Adicionalmente, a uniformidade dos resultados dentro da janela segura evidencia a robustez do processo de soldagem quando executado sob parâmetros controlados, refletindo baixa variabilidade e alta repetibilidade. Esse comportamento é fundamental do ponto de vista de engenharia, pois indica confiabilidade na execução e reduz a probabilidade de ocorrência de falhas localizadas ao longo das soldas.

2.2. Desempenho Mecânico: Cisalhamento e Descolamento

A análise do desempenho mecânico (Figura 3) revela que todas as amostras situadas na zona de conformidade superaram os requisitos da GRI GM19.

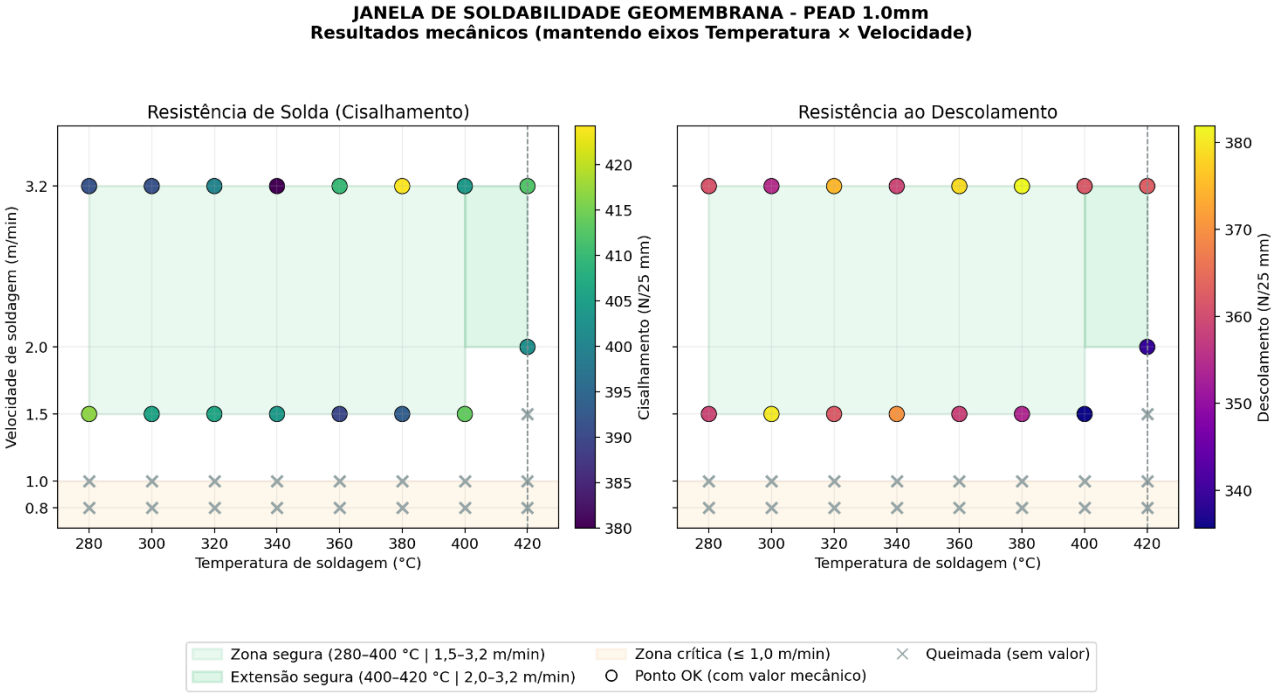


Figura 3 – Resultado dos Ensaios de Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descolamento.

2.2.1 Resistência ao Cisalhamento (Shear Strength)

Todas as amostras validadas dentro da janela operacional superaram o limite mínimo de 350 N/25 mm. Destaca-se o teste T10 (300°C @ 1,5 m/min), que atingiu 405,9 N/25 mm. Em geral, os resultados apresentaram baixa dispersão e valores consistentemente superiores ao limite mínimo normativo, indicando elevada eficiência na transferência de esforços tangenciais ao longo da interface soldada. Observa-se ainda que, dentro da faixa segura, o aumento da temperatura tende a promover leve incremento nos valores de resistência, especialmente nas velocidades mais elevadas (3,2 m/min), sugerindo maior grau de fusão e entrelaçamento molecular. Entretanto, esse ganho não é ilimitado, sendo condicionado à manutenção de velocidades compatíveis que evitem degradação térmica.

2.2.2 Resistência ao Descolamento (Peel Strength)

Este parâmetro, sendo o mais crítico para avaliar a ductilidade da interface, apresentou valores consistentemente acima de 263 N/25 mm. Por exemplo, a amostra T3 (280°C @ 1,5 m/min) registrou 359 N/25 mm, garantindo que a interface soldada não seja o elo frágil do sistema de impermeabilização. De maneira complementar, os resultados de resistência ao descolamento também se mantiveram acima do valor mínimo exigido (263 N/25 mm), demonstrando que a integridade da interface soldada foi preservada em todas as condições válidas. Nota-se, porém, uma maior sensibilidade deste parâmetro às variações de temperatura, com tendência de redução em temperaturas mais elevadas quando associadas a velocidades intermediárias ou baixas. Esse comportamento pode estar relacionado a alterações microestruturais na zona de fusão, como degradação superficial ou redução da ductilidade local, fenômenos amplamente descritos na literatura para polímeros submetidos a superaquecimento.

3 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu a delimitação técnica da janela de soldabilidade para geomembranas de PEAD de 1,0 mm, estabelecendo a correlação direta entre os parâmetros operacionais de temperatura, velocidade e pressão com a integridade mecânica das juntas. A análise sistemática dos dados laboratoriais, confrontada com os requisitos das normas GRI GM19 e ABNT NBR 16199, fundamenta as seguintes conclusões:

(1) A pesquisa confirmou que a zona segura de soldagem para o material de 1,0 mm situa-se entre 280°C e 420°C, com velocidades de 1,5 a 3,5 m/min. Fora desse envelope, o risco de falha por falta de fusão ou degradação térmica aumenta significativamente;

(2) Todas as amostras validadas dentro da janela superaram os requisitos da GRI GM19 e ABNT NBR 16199, apresentando resistências ao cisalhamento acima de 350 N/25 mm e ao descolamento superiores a 263 N/25 mm;

(3) Identificou-se que velocidades iguais ou inferiores a 1,0 m/min (especialmente em temperaturas elevadas) provocam a queima do polímero (burn-through), resultando em perda de propriedades mecânicas e comprometimento da estanqueidade do sistema, e;

(4) A baixa dispersão dos resultados laboratoriais indica que a metodologia de controle proposta oferece uma margem de segurança adequada para absorver variações ambientais em campo, sem comprometer a qualidade final da costura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo Nortène pelo fornecimento das amostras de geomembrana e pela disponibilização do galpão e do laboratório de qualidade GAI-LAP para a execução das soldas e dos ensaios de resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 16199:2020. Barreiras Geossintéticas – Instalação de Geomembranas Poliméricas

KOERNER, R. M. (2012). Designing with Geosynthetics. 6th Edition. Xlibris Corporation.

SCHEIRS, J. (2009). A Guide to Polymeric Geomembranes: A Practical Approach. Wiley.

GRI-GM19A. Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Homogeneous Polyolefin Geomembranes/Barriers. Geosynthetic Institute (GSI).

GRI-GM13. Standard Specification for Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Geosynthetic Institute (GSI).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Geomembrane sealing systems for dams. Bulletin 135. Paris: ICOLD, 2010.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/15

Análise Comparativa da Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelha e Não Reforçadas

Matheus de Marco Porreca
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, matheus.porreca@unesp.br

Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso
Professor do Departamento de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá - SP, Brasil, gabriel.pedroso@unesp.br

Luis Gustavo de Jesus
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, lg.jesus@unesp.br

Pedro Octávio Assis de Carvalho Santos Pinto
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, pedro.octavio@unesp.br

RESUMO: A malha rodoviária brasileira apresenta uma baixa taxa de pavimentação e elevados custos de manutenção, o que torna essencial o desenvolvimento de soluções que aumentem a durabilidade dos pavimentos. Nesse contexto, este trabalho investiga o uso de geossintéticos como camada intermediária de reforço em misturas asfálticas, avaliando seu impacto na resistência à fadiga e na reflexão de trincas. As misturas foram dosadas pelo método Marshall, determinando-se os teores ótimos de ligante, utilizando o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)- CAP 50/70, seguidas por ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). Posteriormente, confeccionaram-se corpos de prova em formato de vigas prismáticas em duas camadas (faixa granulométrica B como binder e faixa C na camada de rolamento), com inserção de geogrelhas na interface, e submetidas a ensaios de flexotração em 3 pontos sob cargas repetidas. Os geossintéticos utilizados foram de PET, PVA e fibra de vidro. Os resultados mostraram que todas as geogrelhas aumentam a vida de fadiga das misturas comparadas às misturas sem reforço. Além disso, observou-se diferentes formatos de trincas entre as geogrelhas e o ensaio controle.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento, Asfalto, Geogrelha, Fadiga, Módulo.

ABSTRACT: The Brazilian road network has a low paving rate and high maintenance costs, which makes the development of solutions that increase pavement durability essential. In this context, this study investigates the use of geosynthetics as an intermediate reinforcement layer in asphalt mixtures, evaluating their impact on fatigue resistance and crack reflection. The mixtures were designed using the Marshall method, determining the optimum binder contents with Petroleum Asphalt Cement (CAP) - CAP 50/70, followed by tensile strength (RT) and resilient modulus (MR) tests. Subsequently, two-layer prismatic beam-shaped specimens were prepared (gradation band B as binder and band C as the wearing course), with geogrid insertion at the interface, and subjected to three-point bending fatigue tests under repeated loads. The geosynthetics used were PET, PVA, and fiberglass. The results showed that all geogrids increased the fatigue life of the mixtures compared to unreinforced mixtures. Furthermore, different crack patterns were observed between the geogrids and the control test.

KEYWORDS: Pavement, Asphalt, Geogrid, Fatigue, Modulus.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Tribunal de Contas da União-TCU, “Em 2024, 73% dos gastos totais do Dnit foram em serviços de conservação e restauração da malha rodoviária”. Dessa forma, medidas que prolonguem sua vida útil, reduzindo, portanto, a necessidade de frequentes manutenções, são de extrema importância para favorecer o desenvolvimento da malha rodoviária nacional.

As tensões e deformações na camada asfáltica pela ação das cargas do tráfego são responsáveis pelo surgimento de danos nesta camada. Entre eles tem-se como os mais importantes de serem estudados para benefício de maior durabilidade dos pavimentos, o trincamento por fadiga e os afundamentos por deformação permanente. (BERNUCCI et al., 2008)

Diversos estudos realizados tanto em laboratório quanto em pavimentos reais demonstraram que os geossintéticos podem prolongar a vida útil por fadiga do pavimento e melhorar a resistência à formação de trincas reflexivas e ao afundamento. (RAGNI, 2020)

Nesse contexto, estudos de Correia e Zornberg (2015) demonstram que a utilização de geogrelhas como camada de reforço em misturas asfálticas promove a redução tanto das deformações elásticas quanto das permanentes, quando comparada a pavimentos sem reforço. As análises também indicam que a inclusão desse tipo de geossintético pode reduzir em até 50% as deformações de tração sob carregamento de roda, efeito associado ao enrijecimento da camada asfáltica, que restringe a movimentação lateral e favorece uma distribuição mais eficiente das tensões ao longo do pavimento.

De forma complementar, o estudo de V. V. Kumar, S. Saride e Zornberg (2021) demonstrou, por meio de ensaios de fadiga em vigas e técnicas de correlação digital de imagens (DIC), que diferentes tipos de geogrelhas - de polipropileno, poliéster e fibra de vidro - aumentam a resistência à fadiga de formas diferentes, de acordo com o tipo de material empregado, nesse estudo, a geogrelha compósita de fibra de vidro (GCC), correspondeu a uma elevação da vida de fadiga de 38 vezes em relação a misturas não reforçadas.

Diante desse cenário, este trabalho analisa três diferentes tipos de geogrelhas como camada intermediária entre camadas asfálticas – poliéster (PET), álcool polivinílico (PVA) e fibra de vidro (FV)- avaliando seu desempenho no trincamento por fadiga e na reflexão de trincas, através do ensaio de vida de fadiga em vigas prismáticas, que permitem quantificar a influencia do reforço quando submetidas a solicitações cíclicas, representando as condições de tráfego reais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos Agregados Minerais

Os agregados utilizados na mistura asfáltica foram provenientes de uma pedreira na cidade de Aparecida-SP, cuja composição mineralógica é predominantemente gnáissica. Assim, foram submetidos a caracterização quanto à granulometria e massa específica. A massa específica dos agregados graúdos foi determinada conforme a norma DNER-ME 195/97, envolvendo lavagem, secagem, imersão, pesagens nas condições seca, saturada superfície seca e imersa, permitindo o cálculo da absorção e da massa específica. Para os agregados miúdos, seguiu-se a DNER-ME 194/98, utilizando o frasco Chapman para obtenção do volume deslocado, e posterior cálculo da massa específica.

A definição da granulometria segue a DNIT 031/2024, que estabelece as faixas granulométricas. As faixas B e C foram selecionadas para este estudo, devido apresentarem características intermediárias, equilibrando resistência e trabalhabilidade. Além disso, estudos como o de Bock (2009) mostram que o uso de filler reduz o volume de vazios e o teor ótimo de ligante, sem alterar significativamente propriedades mecânicas como resistência à tração e módulo de resiliência, para isso, foi utilizado cal hidratada seca, na proporção de 1,0% da massa do corpo de prova.

2.2 Caracterização do Ligante Asfáltico

Nesse estudo, foi utilizado o ligante asfáltico CAP 50/70, selecionado devido sua ampla utilização no Brasil, suas propriedades e trabalhabilidade, proporcionando uma melhor qualidade da mistura. Sua especificação é fornecida pelo certificado de qualidade da empresa, e apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos Ligantes Asfálticos

Característica	Unidade	Especificação	Resultado
Penetração	0,1 mm	50 a 70	51
Ponto de Amolecimento	Grau C	46 min	51

Viscosidade Brookfield 135GC-SP21 20rpm	cp	274 min	313
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	cp	112 min	159
Viscosidade Brookfield 177GC SP21	cp	57 a 285	61
Ductilidade a 25GC	cm	20 min	> 150
Ponto de Fulgor	Grau C	235 min	314
Densidade Relativa a 20/4 GC	N/A	Anotar	0,999

2.3 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall foi realizada a partir da confecção dos corpos de prova seguindo a DNIT 178/2018, e ensaiados segundo a DNIT 447/2024. O procedimento iniciou-se com a separação dos agregados e filler, conforme a faixa granulométrica, adotando massas de 1200g e teores de ligante entre 4,0% a 6,0% a uma taxa de variação de 0,5%. Os materiais foram aquecidos, misturados até a completa cobertura, e despejados nos moldes cilíndricos, para serem compactados com 75 golpes por face, através do soquete de compactação manual de 4540 ± 1 g, que cai em queda livre de uma altura de 457,2 ± 1,5 mm. Posteriormente, foi registrado sua altura média, massas seca, submersa e superficie seca saturada, conforme DNIT 449/2024. Com esses dados, foi calculado seus parâmetros volumétricos como a densidade relativa máxima (Gmm), massa específica aparente da mistura (Gmb), volume de vazios (Vv), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV). Por fim, verificou-se sua conformidade dos parâmetros aos limites da DNIT 031/2024, e assim, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência a tração por compressão diametral, e módulo de resiliência.

2.4 Caracterização das Geogrelhas

Neste estudo foram empregadas três geogrelhas distintas, produzidas a partir de poliéster (PET), álcool polivinílico (PVA) e fibra de vidro (FV), materiais com diferentes propriedades mecânicas e modos de interação com a mistura asfáltica, cuja caracterização é fornecida pela empresa e está descrita na tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Caracterização das Geogrelhas

Propriedades	PET	PVA	Fibra de Vidro
Deformação em resistência à tração nominal	≤ 12 %	≤ 6 %	≤ 3 %
Resistência à tração (MD + CMD)	50 kN/m	50 kN/m	50 kN/m
Abertura da malha	4 cm	4 cm	3 cm
Resistência à tração após o teste de danos de instalação (DIN EN ISO 10722)	>90%	>90%	>90%

2.5 Corpos de Prova

As misturas asfálticas foram produzidas através da dosagem Marshall, os agregados são predominantemente de mineralogia gnáissica, o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70. As vigas prismáticas foram produzidas em duas camadas, sendo compostas pela faixa B na camada inferior (Binder) e pela faixa C na camada superior (camada de rolamento). Na interface entre as duas camadas foi aplicada pintura asfáltica na proporção de 0,5 l/m², baseado nos estudos de CORREIA (2022), e posteriormente inseridas as geogrelhas centralizadas na forma, com uma margem de 2,00 cm. As dimensões adotadas para os corpos de prova foram definidas com base na literatura proposta por Kumar (2021), sendo utilizadas fôrmas metálicas com medidas 30x10x12cm apresentadas na Figura 1, a seguir.

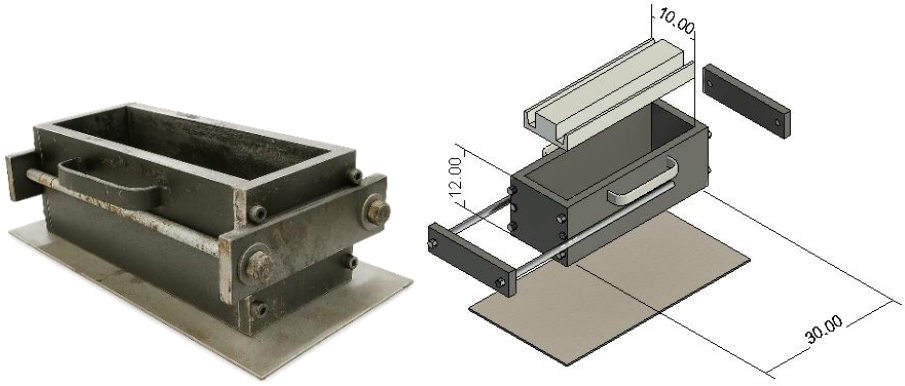


Figura 1. Esquema da forma metálica utilizada

Os corpos de prova foram produzidos com mistura manual, e compactados através da máquina universal de ensaios. Ao todo, foram produzidos 12 corpos de prova, organizados em quatro grupos de 3 unidades, onde três grupos possuiam um tipo de geogrelha e um grupo sem nenhum reforço. Após a produção dos corpos de prova, foram submetidos a ensaios de flexotração a cargas repetidas.

2.6 Ensaio de Flexotração

O ensaio de flexotração, também denominado ensaio de fadiga em três pontos, foi realizado em corpos de prova prismáticos (vigotas), conforme descrito no tópico 2.5. Inicialmente, uma das faces das vigotas foi pintada de branco, a fim de possibilitar análises futuras, através de correlação digital de imagens (DIC). Em seguida, os corpos de prova foram devidamente posicionados e centralizados na prensa de ensaio. Os ensaios foram realizados à uma temperatura de 24 °C, sob carregamento dinâmico com frequência de 2 Hz, e carregamento equivalente a 30%, 40% e 50% da carga de ruptura estática obtida nos ensaios de compressão diametral. O número de ciclos aplicados até a ruptura do corpo de prova foi considerado como o número N, representando a vida de fadiga da mistura. Após a falha, o valor de N correspondente foi devidamente registrado. O critério de ruptura foi padronizado, para assegurar que os diferentes materiais estejam associados ao mesmo nível de dano. Foi delimitado a ruptura quando o corpo de prova atingisse 200mm de deslocamento vertical no centro do vão.



Figura 2. Prensa do ensaio de fadiga em vigas sob flexão em três pontos

3 RESULTADOS

3.1 Dosagem Marshall

Entre os materiais utilizados para a execução deste trabalho, apenas foram desenvolvidos ensaios de caracterização dos agregados minerais, uma vez que seus parâmetros são fundamentais para a realização da dosagem Marshall. Além disso, as propriedades físicas e granulométricas dos agregados influenciam o comportamento e o desempenho da mistura asfáltica. Os resultados obtidos a partir desses ensaios encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado Ensaios de Caracterização dos Agregados

	Massa Específica (g/cm³)	Absorção (%)
Agregado Graúdo	2,641	N/A
Agregado Miúdo	2,823	1,00

Os resultados dos parâmetros da dosagem Marshall, bem como os obtidos no ensaio de resistência a tração, e módulo de resiliência, estão apresentados na tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Resultados Dosagem Marshall

Parâmetro	Faixa B	Faixa C
Massa Específica (g/cm³)	2,420	2,374
DMT	2,50	2,48
Volume de Vazios (%)	3,98	3,74
VCB	12,12	11,90
VAM	15,51	16,41
RBV	78,23	72,91
Teor Ótimo (%)	4,74	5,18
Resistência a Tração (Mpa)	2,10	1,48
Módulo de Resiliência (Mpa)	8829	9363

3.2 Análise de Imagens

A figura 3 apresenta o registro fotográfico das diferenças na morfologia da reflexão das trincas, após submetidas ao ensaio de flexotração a cargas cíclicas, da esquerda para a direita estão os corpos de prova sem reforço, com reforço de PET, com reforço de PVA e com reforço de fibra de vidro. As distintas configurações de trincamento evidenciam os diferentes comportamentos mecânicos entre as misturas. É possível observar que o corpo de prova sem reforço, apresenta a forma típica de trincamento por fadiga, onde após a formação da primeira microfissura, as tensões se concentram próximas a região pontual de menor área efetiva, promovendo sua propagação ao longo do pavimento. Quando inserido o reforço de PET, percebe-se um comportamento diferente, devido ao PET ser um material de média ductilidade, em comparação aos outros materiais analisados, isso resulta em uma capacidade de acompanhar as deformações do asfalto, e contribuir para as redistribuições das tensões ao longo da geogrelha, proporcionando a propagação de microfissuras espalhadas, em vez de uma trinca dominante concentrada, indicando que o reforço atua reduzindo a concentração de tensões e assim retardando a propagação das trincas. O padrão observado sugere um mecanismo de dissipação de energia mais uniforme, indicando uma distribuição mais homogênea das deformações no corpo de prova, em oposição ao comportamento frágil típico do material não reforçado.

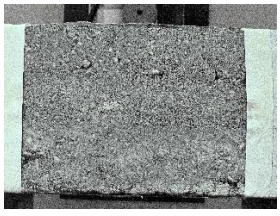
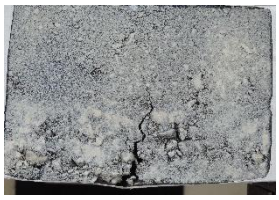
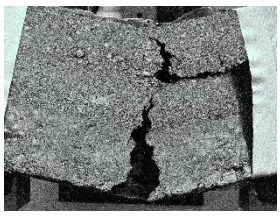
Tempo	Sem Reforço	PET	PVA	Fibra de Vidro
Inicial				
Após Trincamento				

Figura 3. Registro Fotográfico Ensaio Flexotração

O PVA, apresentou padrões de trincas semelhantes aos do PET, porém, o PVA possui uma maior ductilidade, e dessa forma maiores deformações, e melhor capacidade de alongamento, o que favorece a distribuição das tensões. Contudo, o PVA é um material hidrossolúvel, que na presença de água, altera suas propriedades mecânicas, aumentando sua ductilidade e alongamento. Quando esse alongamento é muito alto causa um efeito reverso, a geogrelha perde sua capacidade de distribuir as tensões, irrelevando o reforço. Assim, sua vulnerabilidade a água e agentes físicos limita seu desempenho em condições ambientais mais agressivas.

Por outro lado a fibra de vidro, diferentemente dos polímeros, possui um alto módulo de Young, isso é, uma maior resistência a tração, menor deformação e baixa ductilidade, resultando em um material mais rígido, e dessa forma reduzindo sua capacidade de acompanhar as deformações, promovendo altas concentrações de tensão na interface entre a geogrelha e a mistura, causando descolamento da camada e deflexão das trincas. Assim, observa-se um material mais frágil, com baixa capacidade de distribuir as tensões devido ao carregamento.

3.3 Curvas de Fadiga

Como demonstrado, os diferentes materiais de reforço empregados apresentam distintos comportamentos mecânicos, os quais influenciam diretamente o processo de fadiga das misturas asfálticas. Para complementar a análise qualitativa apresentada, a figura 4 sintetiza de forma comparativa o desempenho dos corpos de prova no ensaio de flexotração, relacionando a tensão aplicada ao número de ciclos suportados até a ruptura.

Nesse contexto, materiais mais dúcteis, como o PVA e o PET, tendem a apresentar maiores deformações, consequentemente, para que o corpo de prova atinja o deslocamento limite de 200 mm, esses materiais desenvolvem trincas menores e distribuídas, dissipando as tensões de forma mais homogênea e retardando a falha localizada. Por outro lado, materiais mais rígidos e de baixa ductilidade, como a fibra de vidro, apresentam menor capacidade de deformação. Devido sua rigidez acentuada, há uma concentração de tensões na interface entre o reforço e a mistura asfáltica, favorecendo a formação de trincas maiores para que o corpo de prova alcance o mesmo deslocamento final. Em função disso, a ruptura ocorre com menor número de ciclos, caracterizando uma vida de fadiga inferior.

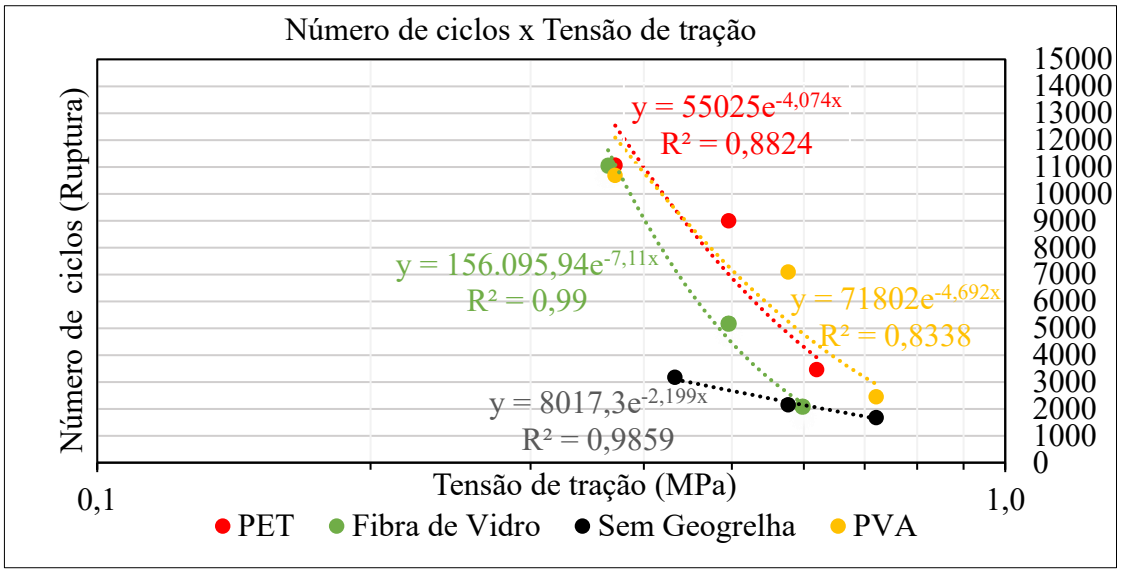


Figura 4. Resultado Ensaio Vida de Fadiga para Vigas Prismáticas Reforçadas ou Não com Geogrelha

Os resultados obtidos evidenciam suas diferenças de acordo com o tipo de geossintético empregado como reforço, a figura 4 apresenta os resultados onde é possivel observar que as geogrelhas que obtiveram melhor desempenho, isto é, maior número de ciclos sob uma tensão, antes de romperem, foram as geogrelhas de PET e PVA. A alta resistência a fadiga de ambos os materiais, pode ser atribuida à maior ductilidade, favorecendo a distribuição das tensões. O PVA, apresentou um desempenho inferior ao PET devido sua alta flexibilidade, que consequentemente sob tensões maiores, ele se deforma excessivamente, sem proporcionar resistência e assim reforço à mistura.

A fibra de vidro apresentou desempenho melhor que a mistura sem reforço, porém com menor vida de fadiga que os outros materiais estudados, isso devido a sua alta rigidez, que concentra as tensões na interface, formando trincas localizadas. A tabela abaixo apresenta o número de ciclos obtidos.

Tabela 5. Número de Ciclos-Ensaio Vida de Fadiga

Carga	Sem Geogrelha	PET	PVA	Fibra de Vidro
30%	3171	11065	10681	11040
40%	2152	9000	7088	5160
50%	1682	3457	2446	2080

A baixas tensões, as geogrelhas apresentaram desempenhos semelhantes, entretanto, à medida que o nível de tensão aumenta, seus comportamentos demonstram suas diferenças. A geogrelha de PET, apresentou melhor desempenho e número de ciclos, seguido pela geogrelha de PVA, que demonstrou-se efetiva a baixas tensões. A fibra de vidro alcançou o número de ciclos próximos à PET a baixas tensões, embora seu menor desempenho a tensões mais altas. A mistura sem reforço apresentou menor número de ciclos para ambas as tensões, demonstrando sua fragilidade, e portanto a necessidade de reforço para garantir uma maior vida de fadiga ao pavimento.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a utilização de geogrelhas de PET, PVA e fibra de vidro, como camada intermediária de reforço em misturas asfálticas, através de ensaios de flexotração a cargas cíclicas. As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, utilizando o CAP 50/70. Os resultados demonstraram que ambas as geogrelhas melhoram significativamente a vida de fadiga da mistura, sendo que o melhor resultado obtido foi com a geogrelha de PET, em ambos os níveis de tensão. Isso devido sua melhor capacidade de distribuir as tensões ao longo do pavimento, evitando esforços concentrados que geram trincas localizadas.

Além disso, reforça-se que o controle de temperatura durante a produção e execução do ensaio é fundamental, devido ao comportamento termoviscoplástico do ligante, que altera significativamente sua rigidez e, portanto, sua vida de fadiga. Diante desse cenário, conclui-se que o uso de geossintéticos é uma técnica viável para aumentar a durabilidade dos pavimentos asfálticos, contribuindo para a redução de custos de manutenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e oportunidades, à minha família pelo apoio e incentivo, ao meu orientador, prof. Dr. Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso, pela orientação, confiança e dedicação ao longo do trabalho, e à empresa Huesker pelo fornecimento das geogrelhas e financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2022.

Bock, A. L., Hartmann, D., Budny, J., Specht, L. P., & Ceratti, J. A. (2009). Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 14, p. 59-69, 2009.

Correia, N.S., and Zornberg, J.G. (2015). Evaluation of Strains and Unit Tension in Flexibles Pavements Using Geogrids to Reinforced the Asphaltic Layer. Proceedings of the VII Brazilian Congress on Geosynthetics, Brasilia, Brazil, 19-21 July (CD-ROM).

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 194/98: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. BRASIL. Brasília, 1998. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 195/97: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. BRASIL. Brasília, 1997. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 031/2024: ES – Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 178/2018 – PRO – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília, 2018. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 447/2024 – ME – Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 449/2024 – PRO – Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Genaro Urquiza Júnior, G., Pena da Silva e Silva, M. e de Souza Correia, N. 2022. Aderência de interface de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos e diferentes taxas de emulsão. Transportes. 30, 1 (abr. 2022), 2632.

Kumar, V. V., Saride, S. and Zornberg, J. G. (2021). Fatigue performance of geosynthetic-reinforced asphalt layers. Geosynthetics International, 28, No. 6, 584–597. https://doi.org/10.1680/jgein.21.00013

Ragni, D., Canestrari, F., Allou, F., Petit, C., & Millien, A. (2020). Shear-torque fatigue performance of geogrid-reinforced asphalt interlayers. Sustainability.

TCU – TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. Plano de manutenção de rodovias precisa de mais investimentos e estudos técnicos. Portal TCU – Notícias, Brasília, 06 ago. 2025. Acesso em: 10 set. 2025.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/16

Análise dos Fatores que Influenciam na Resistência ao Arrancamento em Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos

Alana Benedetto de Oliveira
Mestranda em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, alana.benedetto@usp.br

Matheus Pena da Silva e Silva
Professor Doutor, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil, mpena@ufam.edu.br

RESUMO: Muros de solo reforçado com geossintéticos são fundamentais para a estabilidade de obras civis, porém a complexidade da interação solo-reforço exige maior precisão nos projetos. Este estudo objetivou identificar os principais fatores que influenciam a força máxima de arrancamento na interface solo-geossintético. A metodologia consistiu na análise estatística de uma base de dados secundários, composta por informações de estudos nacionais e internacionais sobre ensaios de arrancamento, processadas com o auxílio do software JAMOVI. Os principais aspectos analisados evidenciaram que variáveis como o diâmetro D_{50} e a densidade seca impactam negativamente a força máxima de arrancamento. Em contrapartida, parâmetros como o diâmetro D_{10}, ângulo de atrito interno, coesão, resistência à tração e alongamento do geossintético, além da sobrecarga aplicada e espessura do reforço, exercem influência positiva, aumentando a resistência da interface. Conclui-se que a seleção criteriosa das propriedades do solo e do tipo de geossintético é indispensável para maximizar a eficiência do sistema, garantindo a segurança e a eficácia de projetos de solo reforçado.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Reforçado, Geossintéticos, Ensaio de Arrancamento, Interação solo-reforço.

ABSTRACT: Geosynthetic-reinforced soil walls are fundamental to the stability of civil works; however, the complexity of the soil-reinforcement interaction demands greater precision in design. This study aimed to identify the main factors influencing the maximum pull-out force at the soil-geosynthetic interface. The methodology consisted of a statistical analysis of a secondary database, composed of information from national and international studies on pull-out tests, processed using JAMOVI software. The main aspects analyzed showed that variables such as diameter D50 and dry density negatively impact the maximum pull-out force. Conversely, parameters such as diameter D10, angle of internal friction, cohesion, tensile strength, and elongation of the geosynthetic, in addition to the applied surcharge and reinforcement thickness, exert a positive influence, increasing the interface resistance. It is concluded that the careful selection of soil properties and the type of geosynthetic is indispensable to maximize the system's efficiency, ensuring the safety and effectiveness of reinforced soil projects.

KEYWORDS: Reinforced soil, Geosynthetics, Pull-out test, Soil-reinforcement interaction.

1 INTRODUÇÃO

A construção de solos reforçados consolidou-se como uma alternativa economicamente vantajosa na engenharia civil, especialmente em regiões com relevo acidentado e condições geotécnicas adversas. Nesse contexto, os muros de solo reforçado com geossintéticos, como geotêxteis e geogrelhas, destacam-se por viabilizar o aproveitamento do solo local, simplificando o processo construtivo, aumentando a resistência a recalques e reduzindo a dependência de materiais externos (Koerner, 2012; Lima, 2016).

A literatura técnica especializada indica que a resistência ao arrancamento em solos reforçados com geossintéticos é influenciada por múltiplos fatores inter-relacionados. Estudos como os de Moraci e Recalcati (2006) e Palmeira (2009) convergem ao apontar que as propriedades dos solos, especialmente ângulo de atrito, granulometria e compacidade, exercem papel preponderante na mobilização da resistência por atrito na interface. Da mesma forma, características dos geossintéticos, como rigidez, abertura da malha e geometria das transversais em geogrelhas, são destacadas como determinantes para o intertravamento mecânico com o solo. Há consenso na literatura de que solos bem graduados e com partículas angulares tendem a proporcionar melhores resultados de arrancamento, enquanto solos finos e coesivos frequentemente apresentam desempenho inferior devido à baixa capacidade de drenagem e à dificuldade de intertravamento (Bathurst et al., 2009; Sieira et al., 2009).

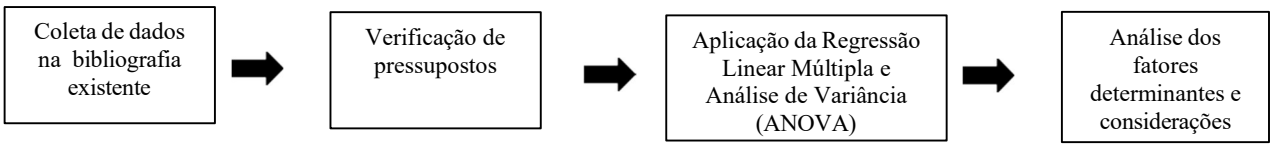
Entretanto, observam-se divergências quanto à magnitude relativa da influência de cada parâmetro. Enquanto algumas pesquisas enfatizam a predominância das propriedades do geossintético sobre o comportamento da interface (Lopes e Ladeira, 1996), outras defendem que as características do solo são o fator preponderante, sobretudo em condições de confinamento elevado (Abramento e Pinto, 1994). Essas controvérsias evidenciam a necessidade de análises integradas que considerem a interação entre os dois materiais de forma sistêmica. Estudos recentes baseados em análises estatísticas de bases de dados experimentais também têm buscado quantificar a influência simultânea dessas variáveis, demonstrando que tanto as propriedades dos solos quanto dos geossintéticos desempenham papel relevante na resistência ao arrancamento, embora com diferentes magnitudes de influência (OLIVEIRA, 2025).

Nesse contexto, o presente estudo contribui ao propor uma abordagem quantitativa baseada em dados da literatura, permitindo não apenas identificar quais propriedades dos solos e geossintéticos exercem maior impacto na força máxima de arrancamento, mas também analisar a natureza dessa influência, positiva ou negativa, e estabelecer correlações e tendências que possam subsidiar decisões de projeto com maior embasamento técnico.

2 METODOLOGIA

A estratégia experimental deste estudo baseia-se no levantamento e na sistematização de dados secundários provenientes da literatura técnica especializada sobre ensaios de arrancamento. Para viabilizar a análise estatística, foram selecionados estudos que abrangem diversos contextos geotécnicos, permitindo a composição de um banco de dados heterogêneo. O tratamento dos dados coletados foi realizado por meio do software estatístico JAMOVI, utilizado para a execução de análises multivariadas. O processo inicia-se com a organização e a padronização das grandezas físicas e mecânicas dos materiais. Na sequência, aplica-se a Análise de Variância (ANOVA) para verificar a significância dos fatores de influência, seguida pelo ajuste de modelos de regressão linear para determinar a correlação entre as propriedades dos solos, dos geossintéticos e a resistência da interface. Para assegurar a robustez das inferências, a metodologia inclui a verificação dos pressupostos estatísticos, como a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias. Abaixo, apresenta-se um fluxograma que ilustra o processo metodológico desta pesquisa:

Fluxograma 1. Processo metodológico da pesquisa



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Regressão Linear

3.1.1 Coleta de dados

Embora exista um número significativamente maior de estudos sobre ensaios de arrancamento disponíveis na literatura, nem todos apresentavam informações suficientes para compor uma base de dados única e consistente para análise estatística. Dessa forma, foram adotados critérios de seleção baseados na disponibilidade e compatibilidade dos parâmetros investigados neste estudo.

Foram incluídos apenas ensaios que apresentavam, de forma simultânea, a força máxima de arrancamento e as variáveis independentes consideradas na análise, tais como características granulométricas do solo, propriedades geotécnicas, condições de carregamento e parâmetros físicos e mecânicos dos geossintéticos. Diversos trabalhos consultados foram excluídos por apresentarem informações incompletas, ausência de variáveis relevantes ou diferenças metodológicas que impossibilitavam sua comparação direta com os demais dados.

Após a aplicação desses critérios de elegibilidade, obteve-se uma base final composta por 252 resultados de ensaios de arrancamento provenientes de estudos nacionais e internacionais. Considera-se que essa quantidade de observações é adequada para a realização das análises estatísticas propostas, permitindo avaliar de forma consistente a influência dos parâmetros selecionados sobre a força máxima de arrancamento na interface solo-geossintético. Ressalta-se ainda que esta pesquisa constitui uma análise inicial e exploratória do problema. A relação das fontes e estudos consultados encontra-se detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Banco de dados representativo da pesquisa

Pesquisa Utilizada (Caso)	Classificação do Solo	D10 (mm)	D50 (mm)	γd (kN/m3)	ϕ (°)	Coesão (kPa)	Geossintético utilizado	Resist. Tração (kN/m)	Alongamento na ruptura (%)	Espessura do reforço(mm)	Sobrecarga (kPa)	Força Máx. Arrancamento (kN/m)
Teixeira (1999)	Granular	0	0,13	-	36	15	Geogrelha T2	200	12	-	25	20,58
F. Ferreira (2020)	Granular	0,09	1	17,3	46,6	15,8	Geogrelha T2	69,5	8	-	25	36
M.K.A. Ismail (2021)	Granular	-	0,571	16,8	46,8	0	Geogrelha T2	22,34	10	1,2	100	19,68
M.R. Abdi (2011)	Fino	-	0,75	15,5	10	23,2	Geogrelha T2	80	13	0,3	75	51
Malik Rizwan (2022)	Granular	-	-	17,69	42,9	0	Geotêxtil	3,3	6,8	1,2	1,5	0,585
M. Oliveira (2015)	Granular	0,26	0,43	16,45	35,7	38	Geogrelha T1	55	11,5	0,3	40	53
Hutcherson (2012)	Granular	-	-	16,34	34	-	Geogrelha T2	27	-	0,059	48,26	244,51
L. Becker (2006)	Granular	0,02	0,4	18,02	34,2	10	Geogrelha T2	35	12	1	7,2	16,23
A. Koczicki (2022)	Granular	0,09	0,5	16,4	35	0	Geogrelha T2	50	-	1,2	15	4
M.G. Rodriguez (2018)	Granular	0,09	0,5	16,4	35	0	Geogrelha T1	50	-	1	15	2
Sayão (2021)	Fino	-	-	18,1	24	30	Geogrelha T2	97	12	-	50	62,5
J.A. Ferreira (2021)	Granular	0,6	-	22,7	45	-	Geogrelha T2	50	-	1,5	7	7,3
A. Sieira (2008)	Granular	0,07	0,7	16,71	16	37	Geogrelha T2	47	12,8	1,2	25	32,7
L. Heliodora (2009)	Fino	0,07	0,7	-	37	16	Geotêxtil	200	13	2,3	100	107
A.F. Bolt (2000)	Granular	0,61	1,19	16,71	34	-	Geogrelha T2	44	-	0,315	100	43
Ana Cristina Castro F, Sieira, 2008	Granular	0,07	0,7	-	16	37	Geogrelha	47	12	2,6	25	31,1

3.1.2 Anova omnibus

A Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada para determinar a significância estatística das variáveis preditoras no modelo de regressão linear múltipla. Este método permite distinguir as variações causadas por efeitos sistemáticos das variáveis independentes daquelas decorrentes de erros aleatórios ou ruídos experimentais, isolando o impacto individual e simultâneo de cada parâmetro sobre a variável resposta. A identificação da relevância de cada fator baseou-se no critério do p-valor (Probabilidade > F), em que valores inferiores a 0,05 indicam uma correlação estatisticamente robusta, com probabilidade de erro inferior a 5%.

Complementarmente, utilizou-se a estatística F como indicador da magnitude do impacto de cada variável: quanto maior o valor de F, superior é a proporção da variância da força de arrancamento explicada pelo parâmetro em questão, permitindo hierarquizar os fatores de maior influência no comportamento do sistema. Os resultados detalhados desta análise, que fundamentam a precisão das conclusões obtidas, encontram-se sistematizados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados teste ANOVA omnibus

Preditor	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Geossintético utilizado	2465	2	1232,6	22,12	<0,001
Classificação do solo	247	1	246,8	4,43	0,04
D10 (mm)	255	1	255,1	4,58	0,037
D50(mm)	597	1	596,9	10,71	0,002
γd (kN/m³)	283	1	283	5,08	0,029
φ (º)	1029	1	1029,5	18,48	<0,001
Coesão(kPa)	301	1	301	5,4	0,024
Resistência à tração longitudinal do geossintético (kN/m)	774	1	773,9	13,89	<0,001
Alongamento na ruptura no ensaio de tração (%)	464	1	463,9	8,33	0,006
Sobrecarga (kPa)	1185	1	1184,6	21,26	<0,001
Espessura do geossintético (mm)	1281	1	1281,3	23	<0,001
Resíduos	2786	50	55,7		

A análise dos resultados da ANOVA omnibus apresentada na Tabela 1 indica que todos os preditores avaliados exercem influência estatisticamente significante sobre a variável de resposta, uma vez que todos os valores de p situam-se abaixo do limiar de 0,05. Entre os fatores analisados, a espessura do geossintético e o tipo de geossintético utilizado destacam-se como as variáveis de maior impacto, apresentando as maiores razões F e níveis de significância extremamente elevados ($p < 0,001$). Esse cenário sugere que as características intrínsecas do material de reforço e sua geometria nominal são determinantes para o desempenho do sistema, superando inclusive a influência isolada de algumas propriedades do solo.

No que diz respeito aos parâmetros geotécnicos, observa-se que a sobrecarga aplicada e o ângulo de atrito interno possuem um peso estatístico consideravelmente superior à coesão. Tal disparidade indica que o comportamento do modelo é regido primordialmente por mecanismos de atrito e confinamento lateral, sendo a parcela coesiva um fator secundário, embora ainda relevante. Quanto à granulometria, a influência do D50 sobre a variância dos dados é mais pronunciada do que a do D10, sinalizando que a distribuição granulométrica média do aterro desempenha um papel mais crítico na interação solo-geossintético do que o diâmetro efetivo dos finos.

Por fim, as propriedades mecânicas de tração e alongamento também se mostraram fundamentais, com a resistência à tração longitudinal apresentando um impacto robusto. Curiosamente, embora a classificação do solo seja estatisticamente significante (p = 0,04), ela apresenta o menor valor de F (4,43) entre todos os preditores, o que sugere que as propriedades físicas e mecânicas específicas (como peso específico e parâmetros de resistência) explicam a variação dos resultados de forma muito mais precisa do que a simples categorização granulométrica do material. Em suma, o modelo demonstra que o desempenho é uma função complexa onde as variáveis de projeto e os parâmetros de atrito do solo predominam sobre as características de classificação geral.

3.1.3 Verificação de pressupostos

A validade e a confiabilidade das inferências extraídas do modelo de regressão linear foram asseguradas mediante a verificação dos pressupostos estatísticos fundamentais. A independência dos resíduos foi avaliada pelo teste de Durbin-Watson, que apresentou uma estatística de 1,83 (p = 0,088). Este valor, por aproximar-se de 2, indica a ausência de autocorrelação serial significativa, garantindo que as estimativas dos coeficientes sejam imparciais e eficientes. Complementarmente, a normalidade dos resíduos foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk (Estatística = 0,985; p = 0,643), onde a manutenção da hipótese nula atesta que os intervalos de confiança e os testes de significância do modelo são estatisticamente válidos.

A análise da colinearidade entre os preditores, realizada por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF), revelou valores compreendidos no intervalo de 1,16 a 4,15. Como todos os índices permaneceram significativamente abaixo do limite crítico de 10, e os valores de tolerância mantiveram-se superiores a 0,1, confirma-se que não há redundância excessiva ou multicolinearidade que comprometa a integridade do modelo. A convergência desses resultados demonstra que cada variável exerce uma contribuição independente e robusta, conferindo a precisão necessária para a interpretação dos coeficientes estimados na análise geotécnica proposta.

3.1.4 Regressão linear múltipla

As interações entre solo e geossintético foram investigadas por meio de análise de regressão linear múltipla para cada combinação de materiais. Inicialmente, a intenção era criar modelos globais que integrassem todas as propriedades selecionadas. Contudo, a análise estatística revelou que o tamanho da amostra e a área de abertura da grelha apresentavam valores de p superiores a 0,05, o que impediu a construção de um modelo preditivo unificado e estatisticamente válido que incluísse essas variáveis.

Para viabilizar as previsões, as geogrelhas foram segmentadas em dois grupos distintos: o Tipo 1, composto por materiais de PVC e malhas estruturais de composição indefinida, e o Tipo 2, que reúne materiais de poliéster (PET) e polietileno de alta densidade (PEAD). Diante da impossibilidade de um modelo abrangente, novos modelos foram derivados para cada combinação específica, focando na previsão da força última de arrancamento e omitindo as variáveis sem significância estatística. Os modelos resultantes, juntamente com a validação de suas premissas estatísticas, estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes do modelo de regressão linear

Preditor	Estimativa	Erro-padrão	t	p	Estimativas Estandardizadas
Intercepto	-64,4241	42,3907	-1,52	0,135	-
Geogrelha tipo 2 - Geotêxtil	45,9873	5,1559	6,34	<0,001	2,784
Geogrelha tipo 1 - Geotêxtil	20,7037	7,2572	3,19	0,002	1,253
Solo fino - Solo granular	15,0684	7,1593	2,105	0,04	0,912
D10 (mm)	62,4225	29,1764	2,139	0,037	0,451
D50 (mm)	-29,1175	8,8966	-3,2729	0,002	-0,595
γd (kN/m³)	-3,624	1,6081	-2,2536	0,029	-0,15
ϕ (°)	2,4818	0,5774	4,2983	<0,001	1,023
Coesão (kPa)	0,5571	0,2397	2,3243	0,024	0,463
Resistência à tração (kN/m)	0,0921	0,0247	3,7268	<0,001	0,282
Alongamento na ruptura (%)	0,5407	0,1874	2,8855	0,006	0,347
Sobrecarga (kPa)	0,4376	0,0949	4,6107	<0,001	0,451
Espessura do geossintético (mm)	14,0129	2,9222	4,7953	<0,001	0,64

A análise da regressão linear apresentada fornece informações relevantes sobre os fatores que influenciam a força máxima de arrancamento em sistemas de solo reforçado com geossintéticos. O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,835, indicando que 83,5% da variabilidade na força máxima de arrancamento é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. O valor ajustado do R^2, de 0,796, confirma a qualidade do ajuste, sugerindo que o modelo é robusto e adequado para descrever as relações entre as variáveis analisadas.

A análise da regressão linear múltipla para a força máxima de arrancamento ($F_{máx}$) revela um modelo estatisticamente robusto, onde todos os preditores, à exceção do intercepto, apresentam níveis de significância inferiores a 0,05. O comportamento do sistema é predominantemente governado pelas características de interface do reforço, sendo a Geogrelha tipo 2 o fator de maior impacto positivo no modelo (β = 2,784). Esse resultado indica uma superioridade técnica desse material em relação ao geotêxtil de referência, o que pode ser atribuído ao mecanismo de intertravamento mecânico proporcionado pelas aberturas da geogrelha com as partículas do solo. A espessura do geossintético e sua resistência à tração longitudinal também contribuem positivamente, sugerindo que materiais mais robustos e rígidos facilitam a mobilização de tensões na interface. No que tange aos parâmetros geotécnicos, o ângulo de atrito (ϕ) destaca-se como o preditor de maior relevância relativa (β = 1,023). Fisicamente, essa relação é coerente com a teoria clássica de arrancamento, uma vez que a resistência é gerada primordialmente pelo atrito entre o solo e o geossintético. A coesão, embora estatisticamente significante, exerce um papel secundário na magnitude da força máxima quando comparada ao atrito. Um aspecto interessante reside nos coeficientes negativos do D50 (β = -0,595) e do peso específico seco (γ_d), sugerindo que solos com diâmetros médios menores ou arranjos que favoreçam uma maior superfície de contato específica tendem a otimizar a força de arrancamento neste conjunto de dados. Por outro lado, o D10 apresenta uma correlação positiva, indicando que a fração de partículas correspondente ao diâmetro efetivo auxilia no travamento inicial do reforço.

A influência da sobrecarga aplicada também é confirmada como um motor essencial para a resistência, apresentando um coeficiente positivo e significativo (β = 0,451). O aumento da tensão normal sobre o plano de reforço eleva diretamente a força de atrito disponível, um comportamento esperado em ensaios de arrancamento. Em síntese, a análise dos coeficientes demonstra que o modelo é capaz de capturar as principais nuances físicas do fenômeno, priorizando o tipo de reforço e o ângulo de atrito como as variáveis de projeto mais determinantes. A combinação desses fatores permite uma estimativa precisa da força máxima, fundamentando a aplicação dos materiais em projetos de solo reforçado com alto grau de confiança estatística.

A equação final para a estimativa da força máxima de arrancamento (F_{max}), baseada nos coeficientes da regressão linear múltipla apresentados, é estruturada da seguinte forma:

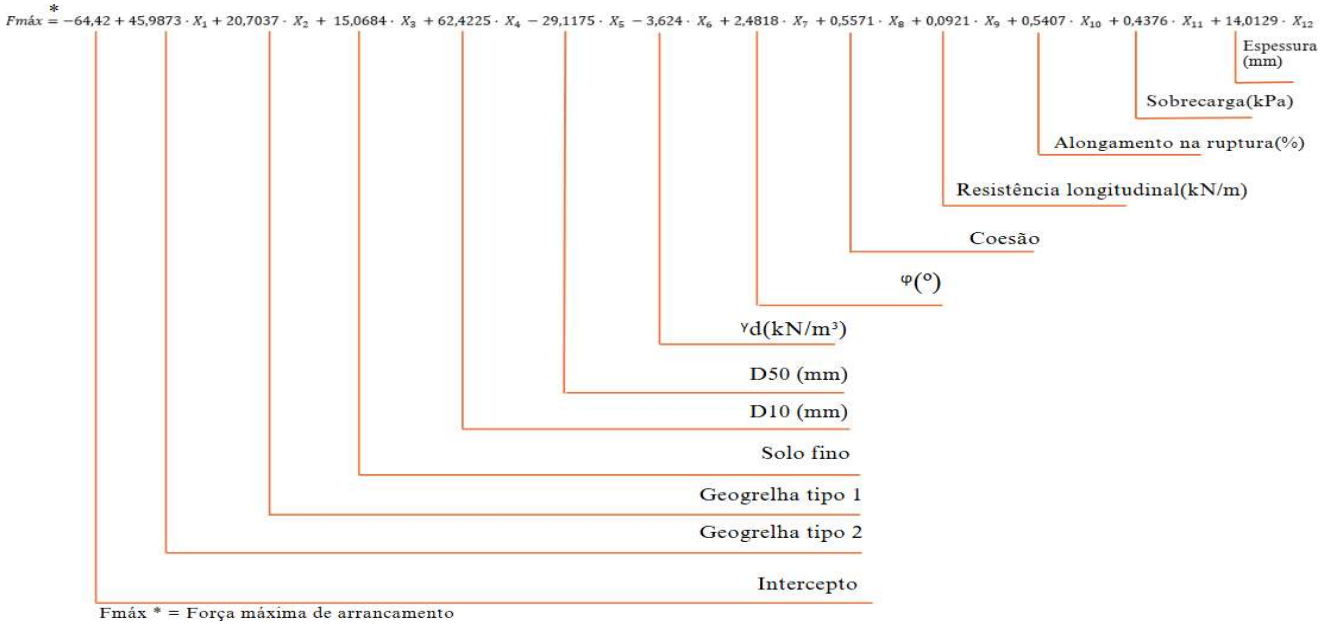


Figura 1. Equação da regressão linear aplicada para a pesquisa

A equação de regressão obtida para a força máxima de arrancamento ($F_{máx}$) constitui um modelo preditivo que traduz a influência ponderada de cada parâmetro do sistema solo-reforço. O intercepto do modelo (-64,42), embora apresente valor negativo, atua como uma constante de ajuste matemático que define o patamar inicial da função no espaço multidimensional das variáveis analisadas. A partir desse referencial, a magnitude dos coeficientes associados às variáveis qualitativas X1 (Geogrelha tipo 2) e X2 (Geogrelha tipo 1) revela um incremento substancial na resistência quando comparadas ao geotêxtil de referência. O coeficiente de +45,9873 para a Geogrelha tipo 2 confirma que a geometria de suas aberturas proporciona um intertravamento mecânico superior, mobilizando mecanismos de resistência passiva que elevam a capacidade de carga de interface de maneira mais eficiente do que o atrito puramente superficial.

A análise dos coeficientes das variáveis contínuas permite identificar a sensibilidade do sistema a variações nas propriedades do solo e do geossintético. O ângulo de atrito (ϕ) e a sobrecarga (σ) apresentam coeficientes positivos (+2,4818 e +0,4376, respectivamente), o que corrobora a fundamentação teórica de que a força de arrancamento é diretamente proporcional à tensão normal e à rugosidade da interface. Paralelamente, a relevância da espessura do geossintético (+14,0129) indica que materiais com maior seção transversal nas barras facilitam a distribuição de tensões e aumentam a área de suporte frontal, corroborando a hipótese de que a rigidez flexural do reforço desempenha um papel crucial na estabilidade da zona de ancoragem.

Por fim, os coeficientes relacionados à granulometria oferecem uma interpretação refinada sobre o encaixe das partículas. Enquanto o diâmetro efetivo (D_{10}) contribui positivamente, o diâmetro médio (D_{50}) apresenta um efeito redutor (-29,1175), sugerindo que, para este conjunto de dados, solos com partículas médias excessivamente grandes podem dificultar o pleno preenchimento das aberturas da geogrelha, reduzindo a eficiência do intertravamento. Somado à correlação negativa do peso específico seco (γ_d), o modelo sugere que a densidade e o arranjo granular devem estar em equilíbrio com as dimensões do reforço para otimizar a resistência. Em suma, a equação representa fielmente a hierarquia dos fatores intervenientes, permitindo não apenas a previsão da força máxima, mas também a compreensão dos mecanismos dominantes que regem a interação solo-geossintético.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a interação entre solo e geossintéticos em sistemas de reforço, com foco na resistência ao arrancamento, por meio de uma abordagem baseada em dados experimentais obtidos de diferentes autores e localidades.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o tipo de geossintético e as características do solo exercem influência significativa na força máxima de arrancamento. A Geogrelha Tipo 2 demonstrou o melhor desempenho como material de reforço, enquanto o Geotêxtil apresentou a menor resistência, possivelmente devido à sua menor rigidez e capacidade de interação com o solo. Em relação ao solo, o solo granular foi identificado como o mais eficiente, com os solos finos apresentando incremento moderado na força de arrancamento, embora de menor magnitude.

Entre as variáveis contínuas, destacaram-se influências positivas e negativas. O diâmetro efetivo dos grãos (D10), a coesão, a espessura do geossintético, sobrecarga, ângulo de atrito e o alongamento à ruptura foram variáveis que contribuíram positivamente para o aumento da força de arrancamento. Por outro lado, o peso específico seco (γd) e o diâmetro médio das partículas (D50) mostraram influência negativa, com aumentos nessas variáveis resultando em menor interação solo-geossintético e, consequentemente, redução na resistência ao arrancamento.

A análise estatística desempenhou um papel essencial ao fornecer uma base quantitativa para a identificação das variáveis mais impactantes no desempenho dos sistemas de solo reforçado, sobretudo nos ensaios de arrancamento. Os resultados da regressão linear múltipla demonstraram que variáveis associadas ao tipo de reforço, às características granulométricas e às propriedades mecânicas do solo apresentam influência estatisticamente significativa sobre a força máxima de arrancamento. Destacaram-se, em magnitude de efeito, o tipo de geossintético empregado, o ângulo de atrito interno do solo e a espessura do reforço, evidenciando que a resistência da interface solo-geossintético depende simultaneamente das propriedades dos materiais envolvidos e das condições de confinamento impostas ao sistema. Esses resultados corroboram as observações apresentadas por Oliveira (2024), que destaca a importância da interação entre as características do solo e do reforço para o desempenho de estruturas de solo reforçado.

Conclui-se que o sucesso no projeto de sistemas reforçados com geossintéticos requer uma abordagem multidisciplinar que leve em conta tanto as características dos materiais quanto as condições geotécnicas locais. Este estudo reforça a importância de uma análise cuidadosa e integrada, contribuindo para a concepção de projetos mais eficientes, seguros e adaptados às diversas realidades práticas.

4.1 Limitações da pesquisa

Embora os resultados forneçam diretrizes valiosas para o dimensionamento, é fundamental reconhecer as fronteiras desta investigação para garantir uma interpretação prudente dos dados. A análise aponta para três limitações principais que acompanham o estudo:

- Simplificações Geométricas e Mecânicas: A pesquisa não contemplou efeitos tridimensionais complexos nem as variações das propriedades mecânicas dos materiais sob condições extremas. Essa simplificação, necessária para a modelagem estatística, pode limitar a aplicabilidade direta em cenários de alta complexidade geométrica;
- lacuna entre laboratório e campo: como as análises basearam-se predominantemente em dados laboratoriais, variáveis críticas do mundo real, como sistemas de drenagem, carregamentos dinâmicos (tráfego ou sismos) e intempéries climáticas, não foram plenamente integradas, o que pode influenciar o desempenho prático dos geossintéticos;
- Representatividade Estatística: A amostragem, embora diversificada, pode não cobrir a totalidade das condições de uso global, sugerindo que a generalização dos resultados deve ser feita com cautela em contextos geotécnicos muito específicos.

Para fortalecer a robustez e a aplicabilidade prática das conclusões, a continuidade da pesquisa deve focar em uma abordagem integrada. Recomenda-se a combinação de análises estatísticas avançadas com monitoramento de campo em tempo real.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/17

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE GEOTUBOS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Leonardo Freitas Diamantino
Engenheiro Geotécnico, EESC USP, Belo Horizonte, Brasil, leonardo.diamantino@usp.br

Rogério Pinto Ribeiro
Professor, EESC USP, São Carlos, Brasil, rogerioprx@sc.usp.br

Lucas Almeida Campos
Engenheiro Geotécnico, WALM BH ENGENHARIA, Belo Horizonte, Brasil,
lucas.campos@walmengenharia.com.br

Jefferson Lins Da Silva
Professor, EESC USP, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma avaliação técnica do desempenho de geotubos confeccionados com geotêxteis aplicados ao desaguamento de rejeitos de minério aurífero, minério de ferro e bauxita. O estudo compara métodos clássicos de dimensionamento baseados na teoria das membranas para estimativa das tensões atuantes, a partir da caracterização físico-geotécnica dos rejeitos e da análise de dois geossintéticos com propriedades distintas. Foram determinadas as tensões circunferenciais e axiais sob diferentes condições de enchimento, bem como verificados os critérios de retenção, permeabilidade, permissividade e colmatação. Os resultados indicam que as propriedades granulométricas e o peso específico dos rejeitos influenciam diretamente as solicitações mecânicas e o desempenho hidráulico, destacando a importância da seleção adequada do geotêxtil e do controle da pressão de enchimento para a segurança das geoformas.

PALAVRAS-CHAVE: geotubos, desaguamento de rejeitos, bauxita, minério de ferro, ouro, sustentabilidade.

ABSTRACT: This study presents a technical and geotechnical evaluation of the performance of geotextile tubes applied to the dewatering of gold, iron ore, and bauxite tailings. The research compares classical design methods based on membrane theory for estimating the stresses acting on the tubes, considering the geotechnical characterization of the tailings and the analysis of two geosynthetics with distinct properties. Circumferential and axial stresses were determined under different filling conditions, and filtration criteria including retention, permeability, permissivity, and clogging were assessed. The results indicate that grain size distribution and specific weight significantly influence both the mechanical demands and hydraulic performance of the system, highlighting the importance of proper geotextile selection and filling pressure control to ensure safe performance of geotextile tubes.

KEYWORDS: geotextile tubes, tailings dewatering, bauxite, iron ore, gold, sustainability

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções eficientes e ambientalmente seguras para o manejo de rejeitos tem impulsionado o uso de geotubos confeccionados com geotêxteis de alta resistência. Esses sistemas promovem a separação sólido-líquido por meio da filtração e do confinamento da polpa mineral, reduzindo volume e umidade e oferecendo maior flexibilidade operacional à mineração. Estudos recentes demonstram seu desempenho satisfatório tanto para rejeitos convencionais quanto ultrafinos, consolidando-os como alternativa técnica viável para a gestão de resíduos minerais (Kiffle et al., 2023).

O funcionamento dos geotubos baseia-se na atuação do geotêxtil como elemento simultaneamente filtrante e estrutural, retendo partículas finas enquanto permite a drenagem da fase líquida. Essa configuração proporciona vantagens como redução de umidade, simplicidade construtiva e aplicabilidade a diferentes tipos de rejeitos, desde materiais arenosos até lamas finas e coesivas (Palmeira, 2018).

Além do desempenho hidráulico, a segurança do sistema depende do comportamento mecânico da geoforma durante o enchimento, uma vez que as tensões mobilizadas estão diretamente relacionadas às propriedades do rejeito e às condições operacionais. Nesse contexto, o uso de modelos teóricos para estimativa da tração no geotêxtil é essencial ao dimensionamento adequado e à seleção do material (Oliveira et al., 2025).

Este trabalho apresenta uma avaliação paramétrica da resistência à tração de geotubos aplicados ao desaguamento de rejeitos de bauxita, minério de ferro e minério aurífero. São analisadas as propriedades geotécnicas dos materiais e sua influência nas solicitações internas, destacando a importância da compatibilidade entre geotêxtil e rejeito para o desempenho seguro do sistema (Lawson, 2008).

2 REJEITOS ESTUDADOS: PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO

Os rejeitos analisados são provenientes de processos típicos de beneficiamento mineral e apresentam características granulométricas e físicas distintas, com influência direta nas solicitações mecânicas e no desempenho hidráulico dos geotubos.

2.1 REJEITO DE MINÉRIO AURÍFERO

O rejeito de minério de ouro é gerado após etapas de britagem e moagem intensiva, seguidas de concentração por flotação ou cianetação, conforme a mineralogia do depósito. A elevada energia de cominuição necessária para liberação do ouro resulta na produção de material predominantemente fino, composto por partículas silto-argilosas e minerais de canga remanescentes (Marsden et al., 2006).

Quanto à granulometria, apresenta valores típicos de D10 entre 0,002 e 0,006 mm, D30 entre 0,01 e 0,03 mm e D60 entre 0,05 e 0,10 mm. O peso específico natural situa-se entre 16 e 18 kN/m³ e o saturado entre 19 e 21 kN/m³. Trata-se de material de baixa permeabilidade, elevada fração de finos e tendência significativa à colmatação quando submetido a sistemas filtrantes. Essas características tornam o controle dos critérios de retenção e permeabilidade particularmente crítico em aplicações de desaguamento por geotubos.

2.2 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito de minério de ferro é originado de operações de britagem, moagem, classificação e concentração, usualmente por separação magnética e flotação reversa em depósitos itabiríticos. Após a remoção do minério rico em ferro, permanecem predominantemente partículas silicosas, como quartzo, além de fragmentos micáceos e filíticos (Braga et al., 2020).

A granulometria típica apresenta D10 entre 0,01 e 0,02 mm, D30 entre 0,05 e 0,08 mm e D60 entre 0,12 e 0,20 mm, com coeficiente de uniformidade variando entre 8 e 12. O peso específico natural encontra-se entre 18 e 20 kN/m³ e o saturado entre 20 e 22 kN/m³. Comparativamente aos rejeitos mais finos, apresenta drenabilidade moderada e menor suscetibilidade à colmatação, embora a variabilidade textural possa influenciar o comportamento hidráulico e a distribuição de tensões durante o enchimento das geoformas.

2.3 REJEITO DE BAUXITA

O rejeito de bauxita é resultante de etapas de britagem e lavagem para remoção de frações argilosas, podendo também incluir resíduos associados ao processo Bayer quando destinado à produção de alumina. Esse material

apresenta elevada finura e composição heterogênea, com predominância de óxidos de ferro, sílica residual e minerais argilosos (Paramguru et al., 2005; Villar, 2002).

Os valores granulométricos típicos situam-se entre 0,005 e 0,015 mm para D10, 0,02 e 0,05 mm para D30 e 0,06 e 0,12 mm para D60, com coeficiente de uniformidade entre 10 e 15. O peso específico natural varia entre 17 e 19 kN/m³ e o saturado entre 19 e 21 kN/m³. Caracteriza-se por baixa a moderada permeabilidade, elevada concentração de finos e maior propensão à colmatação progressiva do meio filtrante, especialmente em condições de altas concentrações de sólidos.

3 METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada para avaliar diferentes formulações de dimensionamento de geotubos aplicadas ao desaguamento de rejeitos de minério de ouro, minério de ferro e bauxita, analisando simultaneamente o desempenho mecânico e hidráulico dos geossintéticos.

Inicialmente, foram adotadas as propriedades físico-geotécnicas representativas de cada rejeito, incluindo peso específico natural e saturado, distribuição granulométrica e parâmetros derivados necessários ao cálculo das tensões induzidas pelo enchimento.

Em seguida, aplicaram-se as formulações clássicas baseadas na teoria das membranas propostas por Lawson (2006), Kazimierowicz (1994), Liu, Goh e Silvester (1997) e Leshchinsky e Leshchinsky (1996), para estimativa das tensões circunferenciais e axiais em diferentes geometrias e pressões de enchimento.

Foram avaliados dois geossintéticos com propriedades mecânicas e hidráulicas distintas. As resistências à tração foram reduzidas por fatores associados a danos de instalação, costuras, degradação química e ambiental e fluência, obtendo-se a resistência admissível de cálculo. As tensões solicitantes foram então comparadas às resistências disponíveis, nas direções longitudinal e transversal.

Paralelamente, foram verificados os critérios hidráulicos de retenção, permeabilidade, permissividade e suscetibilidade à colmatação, utilizando parâmetros granulométricos dos rejeitos e propriedades hidráulicas dos geotêxteis.

Por fim, realizou-se análise comparativa integrando os resultados mecânicos e hidráulicos, permitindo identificar o geossintético mais adequado para cada tipo de rejeito e as limitações operacionais relacionadas à pressão de enchimento.

4 RESULTADOS

4.1 LAWSON (2006)

Baseando no perímetro já fornecido pela fabricante (S=36 m) e Diâmetro Teórico = S/π (11,5 m), verificou-se pelos estudos Lawson (2006) a relação simplificada entre os elementos geométricos principais das geoformas de geotêxtil, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação simplificada entre elementos geométricos avaliados

Parâmetro (em função de:)	Sigla	Expressão	S=36 m	S=18 m	S=9 m
Altura Máxima (D)	H	H=0,6D	6,88	3,44	1,72
Altura Máxima (S)	H	H=0,19S	6,84	3,42	1,71
Largura (D)	b	b=1,4D	16,04	8,02	4,01
Largura (S)	b	b=0,45S	16,2	8,1	4,05

Parâmetro (em função de:)	Sigla	Expressão	S=36 m	S=18 m	S=9 m
Base (D)	B	B=0,9D	10,31	5,16	2,58
Base (S)	BS	B=0,29S	10,44	5,22	2,61
Área da seção (D)	A	$A=0,65D^2$	85,35	21,34	5,33
Área da seção(S)	A	$A=0,07S^2$	90,72	22,68	5,67
Tensão média na base Px (D)	Px	$0,72\gamma D$	214,52	107,26	53,63
Tensão média na base Px (S)	Px	$0,24\gamma S$	224,64	112,32	56,16

4.2 KAZIMIEROWICZ (1994 APUD MARTINS E VIDAL 2006)

Segundo o autor, o dimensionamento à tração de um tubo preenchido com material de densidade natural ($\gamma_{\nu\alpha\tau}$), pode ser calculado em função da pressão de enchimento e da altura de sua seção transversal, baseando-se no estado plano de deformação.

Para todas estas relações é considerado o γ como o peso específico do material, H a altura do tubo preenchido, p0 a pressão de bombeamento, como apresentado na Figura 1.

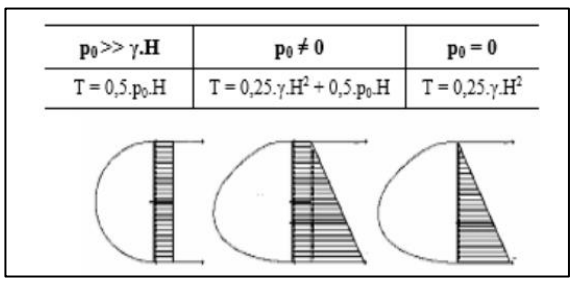


Figura 1 - Análise das tensões atuantes proposta por Kazimierowicz (1994 apud Martins e Vidal 2006)

O cenário intermediário é o que mais se aplica a situação aqui estudada, pois é relevante a pressão de enchimento assumida, além de considerar o peso próprio do rejeito em função da altura de tubo preenchido. Portanto, tem-se que:

- Pressão de enchimento definido (p0) = 1 bar =100 kPa
- Altura externa máxima (H) = 1,2 m
- Peso específico do material (γ) = 26 kN/m³ (Minério de Ferro), 20,9 kN/m³ (Minério Aurífero) e 22,0 kN/m³ (Bauxita)

Sendo assim, a tensão (T) calculada é igual a **69,36 kN/m** para o minério de ferro, **67,92 kN/m** para a Bauxita e **67,52 kN/m** para o minério aurífero. Os resultados mostraram que o peso específico pouco influencia para essa formulação, podendo ser aplicada para a verificação de ambos os materiais a fim de obter o valor de tensão atuante nas geoformas.

4.3 LIU, GOH E SILVESTER (1997)

Essa formulação é baseada no equilíbrio de uma casca flexível, calculando a força de tração na circunferência sob diferentes pressões. A estimativa de altura inicial e utilização do ábaco sugerido (ver Figura 2), permite variações para convergir a um valor de H sob o dado de entrada b1/S, calculado com a seguinte equação:

$$b1 = \frac{(\rho o + \gamma material \times H)}{\gamma água}$$

Sendo a pressão de enchimento da geoforma igual a 1bar (100kPa), temos que b1 = 13,12 m.c.a. Considerando S=36m (linha vermelha), tem-se que b1/S = 13,12/36 = 0,37. Para S=18m (linha rosa), tem-se que b1/S = 13,12/18 = 0,74 e por fim, para S=9m (linha azul), tem-se que b1/S = 13,12/9 = 1,49 conforme indicado na Figura 2.

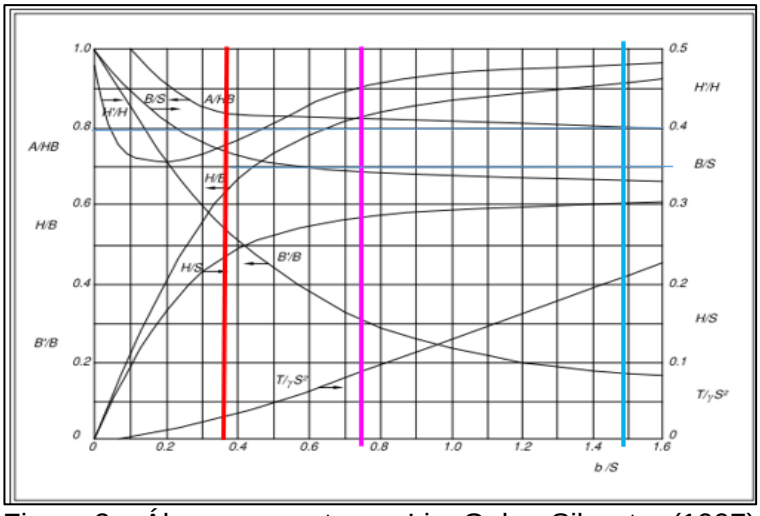


Figura 2 – Ábaco proposto por Liu, Goh e Silvester (1997)

Legenda: Linha vermelha S = 36,0 m, Linha Rosa S = 18,0 m e Linha Azul Claro S = 9,0 m

Através do ábaco acima é possível extrair os dados apresentados na Tabela 2, considerando peso específico da água (γ_w) para o cálculo de tração através desse mesmo ábaco é o da água, ou seja, γ_w = 9.8 kN/m³.

Tabela 2 – Valores avaliados a partir do ábaco

Valores extraídos do Ábaco	**Valores calculado com base nas relações (S=36m)**	**Valores calculado com base nas relações (S=18m)**	**Valores calculado com base nas relações (S=9m)**
B/S = 0,37	B = 0,37*36 = **13,3 m**	B = 0,37*36 = 13,3 m	B = 1,49*9 = 13,4 m
B'/B = 0,54	B' = 13,32*0,54 = **7,2 m**	B' = 13,3*0,31 = 4,1 m	B' = 13,32*0,54 = **2,1 m**
H'/H = 0,38			
H/S = 0,23	H= 0,23*36 = **8,3 m**	H= 0,28*18 = **5,0 m**	H= 0,23*36 = **2,7 m**
H/B = 0,63			
T/□S² = 0,03	T =0,03*9,8*36² = **381,2 kN/m***	T =0,09*9,8*18² = **285,8 kN/m**	T =0,03*9,8*36² = **166,7 kN/m**
A/HB = 0,84	A = 0,84*8,3*13,3 = **50,2 m²**	A = 0,84*8,3*13,3 = **92,6 m²**	A = 0,84*8,3*13,3 = **29,0 m²**

Considerando a geoforma confecionada com geotêxtil não tecido, tem-se resistência à tração longitudinal de 29 kN/m, e a transversal de 31 kN/m, com base em valores de catálogos de mercado para este tipo de material. Aplicando os fatores de redução citados no item 3, obtém-se a seguinte resistência admissível a tração.

$$Tadm = \left(\frac{T}{(FRPpi \times FRPct \times FRPaq \times FRPma \times FRPfl \times FRcreep)}\right) = \left(\frac{31}{6{,}35}\right) = 4{,}9\ kN/m$$

Como os valores obtidos de 381,2 kN/m, 285,8 kN/m e 166,7kN/m são muito maiores que 4,9 kN/m, conclui-se que a resistência a tração longitudinal para geossintético não tecido não atende segundo a formulação proposta.

4.4 LESHCHINSKY E LESHCHINSKY (1996)

As formulações acima apresentadas indicadas: por Lawson (2006) apresenta diretamente relação entre elementos geométricos em geoformas confeccionadas com geotêxteis que resultam na resposta de Tensão vertical média na base; a tensão retirada pelo ábaco sugerida pelo autor Liu, Goh e Silvester (1997), bem como a apresentada por Kazimierowicz considera fatores que relacionam alguns parâmetros de geometria do material.

Portanto, optou-se por adotar a metodologia de Leshchinsky e Leshchinsky (1996) mencionada por Vertematti (2018) e Notas Suplementares do GEOCOPS 2.0, assumindo como conhecida a densidade do material γ, e a relação entre a geometria da fôrma têxtil, y(x), onde é necessário conhecer ao menos uma das três variáveis a seguir: a força de tração circuferencial (T_{req}), a pressão de bombeamento, $p_{0,}$ e a altura da forma, H.

Portanto, para o cálculo da tensão axial (T_{axial}) tem-se ainda que considerar a força P, que atua nos planos verticais das extremidades da fôrma têxtil, que é distribuída da direção z (ao longo de todo o perímetro) e considerando $h_{máx}$=1,2m para que seja calculada a maior tensão suportada pela geforma:

$$Taxial = \frac{2}{S}(p0 + \gamma h) = \frac{2}{36}(100 + 26 * 1{,}2) = 7{,}3\ kN/m$$

As resistências apresentadas na ficha técnica deste material é de 29 kN/m para a tração na longitudinal e de 31 kN/m de tração na transversal.

$$Tult = \frac{Taxial}{FRT} = \frac{29}{6{,}3} = 4{,}6\ kN/m$$

A resistência à tração longitudinal nominal de 29 kN/m, após a aplicação dos fatores de redução recomendados para geotêxteis, resulta em resistência última de cálculo de 4,6 kN/m, valor inferior à tensão axial solicitante de 7,35 kN/m, não atendendo à condição de segurança.

Embora tenha sido adotada pressão de enchimento de 100 kPa, o GRI Test Method GT11 Standard Practice for "Installation of Geotextile Tubes used for Coastal and Riverine Structures" recomenda monitoramento contínuo da pressão interna e estabelece limite de aproximadamente 35 kPa (5 psi) na porta de enchimento.

Ressalta-se que a pressão e as tensões podem variar ao longo do comprimento do tubo, especialmente em costuras e conexões, de modo que o simples controle da pressão de bombeamento não elimina o risco de concentrações locais de tensão. Considerando que essas recomendações se aplicam para geoformas tubulares de geotêxteis usadas para estruturas costeiras e fluviais e que a informação de 100kPa pode ser alta o suficiente para elevar as tensões nas paredes do tubo, recomenda-se que seja acompanhada as pressões de enchimento para evitar possível rompimentos dos tubos, conforme Figura 3.

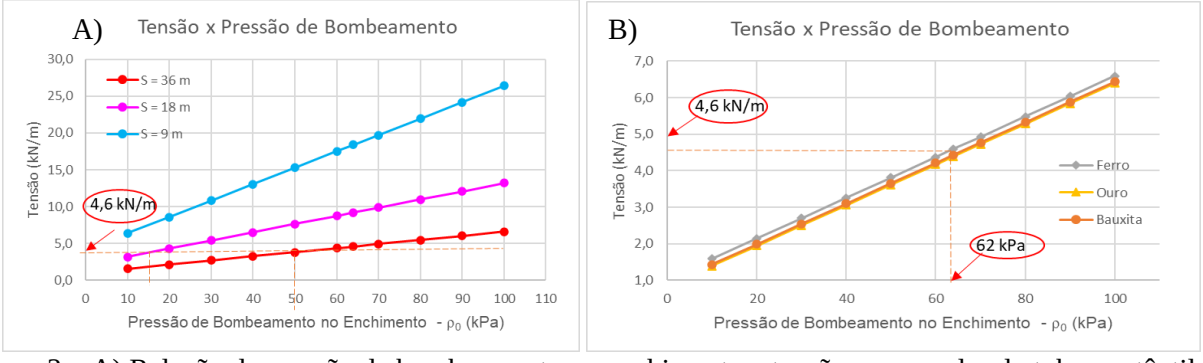


Figura 3 – A) Relação de pressão de bombeamento no enchimento *x* tensão nas paredes do tubo geotêxtil. B) Pressão de bombeamento no enchimento *x* tensão nas paredes do tubo geotêxtil diferentes tipos de rejeitos

Os resultados indicam que, para atender à tensão admissível do geotêxtil, a pressão máxima de bombeamento deve ser limitada a aproximadamente 50 kPa para S = 36 m e 15 kPa para S = 18 m. Para S = 9 m, o geotêxtil não tecido não atende às solicitações durante o enchimento. Para S = 36 m, verificou-se que a variação do peso específico dos rejeitos (20,9 a 26 kN/m³) não influencia significativamente as tensões mobilizadas.

5 AVALIAÇÕES HIDRÁULICAS E DE FILTRAGEM/RETENÇÃO

A avaliação dos critérios de filtração indica que o desempenho do geotêxtil não tecido de 31 kN/m depende fortemente da granulometria dos rejeitos. No critério de retenção, o rejeito de ferro, por ser mais arenoso e apresentar D85 mais elevado, mostra maior compatibilidade com a condição O95 < 0,5·D85. Já os rejeitos de ouro e bauxita, mais finos e silto-argilosos, tornam o critério restritivo, indicando risco de perda de finos com aberturas típicas da ordem de 0,1 mm.

Quanto à permeabilidade, o geotêxtil apresenta elevada capacidade drenante; contudo, a verificação da relação kGT > n·kS é limitada pela ausência de dados específicos, sendo mais crítica para os rejeitos finos, que apresentam maior suscetibilidade à colmatação. O rejeito de ferro tende a apresentar melhor compatibilidade hidráulica.

No critério de permissividade, não há restrições para os três materiais. Entretanto, sob o aspecto de anticolmatação, os rejeitos de ouro e bauxita apresentam maior risco de entupimento progressivo, enquanto o rejeito de ferro configura o cenário mais favorável, condicionado à verificação experimental.

6 GEOSSINTÉTICO MAIS ADEQUADO

A análise comparativa dos modelos de dimensionamento e dos critérios de filtração indicou que o geotêxtil não tecido com resistência à tração longitudinal de 31 kN/m é inadequado para o enchimento das geoformas. As tensões estimadas pelos métodos de Lawson (2006), Kazimierowicz (1994) e Liu, Goh & Silvester (1997) superam significativamente a resistência admissível após aplicação dos fatores de redução, evidenciando risco de ruptura. Do ponto de vista hidráulico, apesar da elevada permeabilidade, sua abertura de poros é excessiva para os rejeitos finos de ouro e bauxita, favorecendo perda de sólidos e colmatação.

Dessa forma, recomenda-se a utilização de geotêxteis tecidos de alta resistência, com valores de tração superiores a 200 kN/m e abertura aparente de poros controlada ($O_{95} \approx 0{,}04$ mm ou inferior), capazes de atender simultaneamente aos critérios mecânicos e de retenção. Esses materiais oferecem maior segurança estrutural e permitem ajuste do desempenho hidráulico conforme a granulometria do rejeito, com opções mais abertas para o rejeito de ferro e mais fechadas para os rejeitos finos.

7 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a escolha do geossintético é determinante para a eficiência e a segurança de geoformas utilizadas no desaguamento de rejeitos de mineração. Os modelos analisados evidenciaram que o geotêxtil não tecido com resistência de 31 kN/m é inadequado para as tensões mobilizadas durante o enchimento das geoformas e que sua abertura de poro não atende ao critério de retenção para rejeitos finos. A seleção de geotêxteis tecidos de alta resistência, com elevada capacidade de tração, abertura aparente controlada e alta permeabilidade, mostra-se a solução mais apropriada, permitindo ajustar o desempenho hidráulico e estrutural ao tipo de rejeito e proporcionando maior segurança frente a rupturas e colmatação.

Adicionalmente, destaca-se que, na prática operacional, é comum a realização de empilhamento de geotubos com o objetivo de otimizar a área necessária para disposição do material desaguado. Nesse contexto, o uso de geotêxteis não tecidos pode representar um fator adicional de risco, uma vez que sua menor resistência à tração torna o sistema mais suscetível às cargas decorrentes da sobreposição de geoformas empilhadas. Dessa forma, a gestão adequada das pressões de enchimento e a realização de ensaios específicos para cada tipo de rejeito tornam-se fundamentais para validar o comportamento do sistema em campo.

Com essas medidas, os geotubos podem se consolidar como uma alternativa eficiente e sustentável para o desaguamento de rejeitos, reduzindo o volume de material a ser disposto em estruturas convencionais de contenção e contribuindo para a otimização da gestão de resíduos nas operações de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, M. A.; VILLAR, L. M.; PIRES, A. B.; FERREIRA, C. D. Comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro. *Geotecnia*, n. 130, p. 45–64, 2020.

GRI – GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. GRI-GT11: Standard Practice for Installation of Geotextile Tubes used for Coastal and Riverine Structures. Folsom, PA: Geosynthetic Research Institute, 2016.

KAZIMIEROWICZ, J. Geotextile tube dewatering: theoretical considerations and design implications. In: PROCEEDINGS OF GEOSYNTHETICS CONFERENCE. Vancouver: IFAI, 1994.

KIFFLE, Z. B.; BHATIA, S. K.; LEBSTER, G. E. Dewatering of mine tailing slurries using geotextile tube: case histories. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 9, 2023.

LAWSON, C. R. Geotextile tube technology: an overview of dewatering theory and applications. *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384–395, 2008.

LESCHCHINSKY, D.; LESCHCHINSKY, O. Geosynthetic containers: seepage, consolidation and stability. *Geosynthetics International*, v. 3, n. 5, p. 655–684, 1996.

LIU, S. J.; GOH, K. S.; SILVESTER, M. J. Geotextile tubes for the containment and dewatering of dredged sediments. In: PROCEEDINGS OF GEOSYNTHETICS CONFERENCE. Long Beach: IFAI, 1997.

MARSDEN, J.; HOUSE, C. *The Chemistry of Gold Extraction*. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2006.

OLIVEIRA, L. F.; SANTOS, M. A.; PEREIRA, R. J.; CARVALHO, D. S. Toward sustainable tailings disposal: a geotechnical overview of Brazilian research. ResearchGate Preprint, 2025.

PALMEIRA, E. M. *Geossintéticos em sistemas de desaguamento de lodos e rejeitos: mecanismos, projeto e desempenho*. Brasília: Universidade de Brasília, 2018.

PARAMGURU, R. K.; RATH, P. C.; MISRA, V. N. Trends in red mud utilization: a review. *Minerals and Metallurgical Processing*, v. 22, n. 2, p. 75–83, 2005.

VERTEMATTI, P. C. (org.). *Manual de geossintéticos e geossistemas*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

VILLAR, L. M. *Caracterização e gestão do resíduo de bauxita (red mud)*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/18

Aplicação de Geossintéticos em Telhado Verde: Estudo de Caso na Favela da Maré, Rio de Janeiro

Ana Clara Marques Arruda Ferreira
Engenheira Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, aarruda@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

Wagner Nahas Ribeiro
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, wagnernahas@poli.ufrj.br

Luiz Augusto da Silva Florêncio
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, luiz.florencio@poli.ufrj.br

Roberto Menezes de Matos Pereira
Graduando de Eng. Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, robertoufrj2021@poli.ufrj.br

RESUMO: Nas metrópoles brasileiras, os impactos das mudanças climáticas são mais severos em áreas socialmente vulneráveis, como favelas, onde construções que frequentemente não seguem técnicas adequadas de isolamento, estão mais expostas a temperaturas extremas. Nesse cenário, telhados verdes com geossintéticos surgem como uma alternativa de tecnologia social e sustentável. Este trabalho objetiva analisar o desempenho térmico de duas configurações de telhados verdes sobre cobertura metálica em uma residência na Favela da Maré, Rio de Janeiro. A primeira configuração utilizou geomembrana, geotêxtil e uma camada drenante de tampinhas de garrafa PET; e a segunda, utilizou um geocomposto multifuncional. O monitoramento da temperatura foi realizado entre dezembro de 2024 e março de 2025, estação de verão. Os resultados demonstraram que ambas as configurações apresentaram desempenho satisfatório, reduzindo a temperatura da face inferior da telha em até 4,3 °C nos horários de pico e reduzindo a amplitude térmica interna em cerca de 12,6 °C em comparação ao telhado convencional. Conclui-se que telhados verdes com geossintéticos, especialmente com uso de materiais recicláveis, constituem uma solução tecnicamente viável e de baixo custo para melhorar o conforto térmico e a resiliência climática em assentamentos precários.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Telhado verde, Conforto térmico, Áreas urbanas de vulnerabilidade social, Maré.

ABSTRACT: In Brazilian metropolises areas, the impact of climate change is more severe in socially vulnerable communities such as informal settlements (favelas), where buildings often lack adequate thermal insulation techniques and are therefore more exposed to extreme temperatures. In this context, green roofs with geosynthetics emerge as a sustainable and social technological solution. This study aims to evaluate the thermal performance of two green roof configurations installed over a metallic roof in a residence located in Favela da Maré, Rio de Janeiro. The first configuration used a geomembrane, geotextile, and a drainage layer of PET bottle caps; and the second one used a multifunctional geocomposite. Temperature monitoring was carried out between December 2024 and March 2025, during the summer season. The results demonstrated that both configurations achieved satisfactory performance, reducing the temperature at the underside of the metal roofing by up to 4.3 °C during peak heat hours and decreasing the indoor thermal amplitude by approximately 12.6 °C compared to the conventional roof. It can be concluded that the green roofs with geosynthetics, particularly those with recycled materials, represent a feasible and low-cost solution to enhance thermal comfort and climate resilience in precarious settlements.

KEYWORDS: Geosynthetics, Green roof, Thermal comfort, Socially vulnerable urban areas, Maré.

1 INTRODUÇÃO

O acelerado processo de expansão urbana no Brasil tem provocado significativas transformações no ambiente construído, impactando diretamente no conforto térmico e na qualidade de vida (Shams; Giacomeli; Sucomine, 2009). Uma das principais consequências é a formação de ilhas de calor urbanas, causada por vários fatores, entre os quais se destaca o uso de materiais como concreto e asfalto, que apresentam elevada absorção de radiação solar e contribuem para elevar as temperaturas em áreas densamente edificadas (Righi *et al*., 2023; Sharma *et al.*, 2016). Esse fenômeno não apenas intensifica a temperatura na área externa (Zhang *et al*., 2011), mas também eleva o calor no interior das construções.

Esse fenômeno é intensificado em áreas de vulnerabilidade social, como as favelas, onde a carência de áreas vegetadas e predomínio de coberturas em lajes de concreto e telhas metálicas expõem a população a temperaturas extremas (Redes da Maré, 2024). As ondas de calor configuram-se como eventos adversos associados a desastres meteorológicos(Ministério da Integração Nacional , 2012). Como recurso, Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como telhados verdes, atuam na mitigação térmica e retenção de águas pluviais reduzindo o fluxo que alcança a superfície do terreno (Sharma *et al.*, 2016; Marques *et al*., 2021; Silva; Silva; Pastich, 2022). Além disso, no contexto de habitações populares, o uso de geossintéticos surge como uma alternativa promissora para simplificar a execução e reduzir a sobrecarga estrutural dos telhados verdes (Amorim, 2015; Ferreira, 2025).

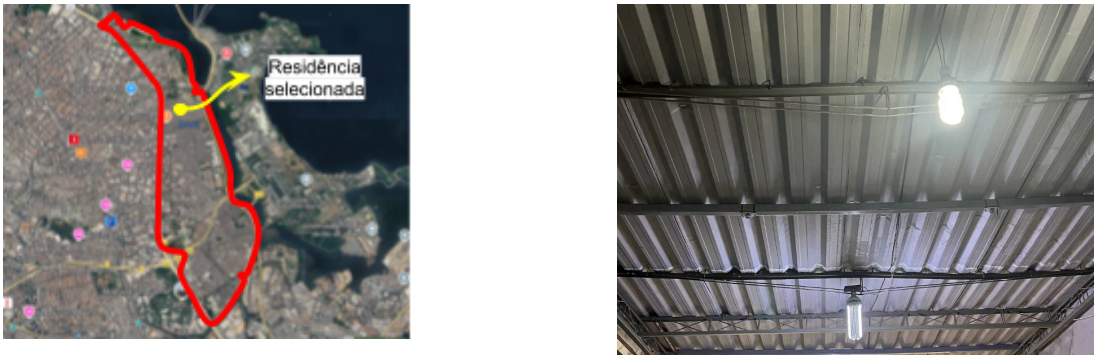
Desse modo, o presente estudo analisa o desempenho térmico de duas configurações de telhado verde com emprego de geossintéticos implantadas no Complexo da Maré, Rio de Janeiro, avaliando sua eficácia como tecnologia passiva de climatização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do Imóvel e do Território

O estudo investigou a aplicação experimental de telhado verde em uma residência na favela Parque Rubens Vaz, que faz parte do Complexo da Maré, Zona Norte do município do Rio de Janeiro. A localização da área de estudo é apresentada na Figura 1(a). Trata-se de um território caracterizado por alta densidade urbana, carência de áreas verdes e precariedade de serviços públicos adequados (Redes da Maré, 2024).

A residência selecionada para receber o telhado verde possui cobertura de telhas metálicas onduladas sobre estrutura de aço, apresentando uma área com dimensões aproximadas de 4m x 9m. Esta tipologia de cobertura, vista pelo interior da edificação na Figura 1(b) é comum na região e contribui para o baixo isolamento térmico das habitações.



(a) (b)

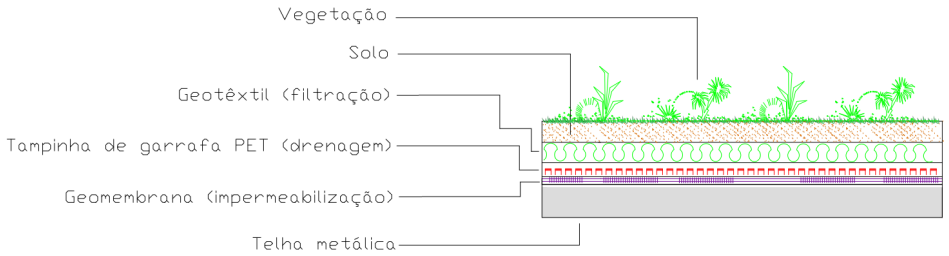
Figura 1. Contexto da pesquisa. (a) Localização da Favela da Maré; (b) Vista inferior do telhado metálico.

2.2 Materiais Geossintéticos e Configurações Experimentais

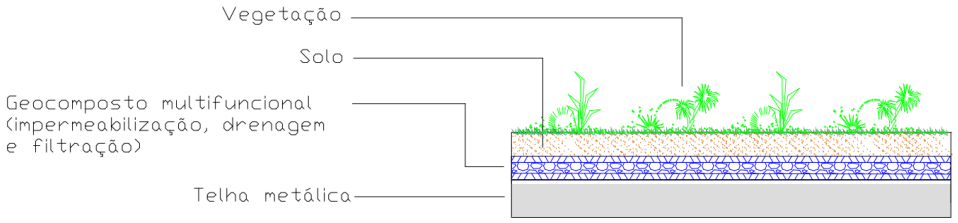
A cobertura da residência foi dividida em duas partes iguais para receber duas configurações de telhado verde: Telhado Verde A (TVA) e Telhado Verde B (TVB), seguindo o modelo semi-extensivo devido à sua leveza e baixa manutenção. Um telhado verde é composto por camadas sobrepostas de materiais distintos, cada um com sua função específica: impermeabilização, drenagem, filtração e substrato para vegetação. A Tabela 1 resume os materiais empregados em cada camada e suas respectivas funções para ambas as configurações. A Figura 2 apresenta os desenhos esquemáticos, fora de escala, com os detalhes da seção transversal longitudinal de cada configuração.

Tabela 1. Resumo das funções e materiais das configurações experimentais TVA e TVB.

Função	Material	
	Telhado TVA	Telhado TVB
Impermeabilização	Geomembrana	
Drenagem	Tampinhas de garrafa PET	Geocomposto multifuncional
Filtração	Geotêxtil	
Substrato	Solo orgânico (5,0 cm)	Solo orgânico (5,0 cm)



(a)



(b)

Figura 2. Detalhe das configurações do telhado verde. (a) Telhado TVA; (b) Telhado TVB.

Na configuração de telhado verde TVA, as tampas de garrafa PET foram coladas sobre a geomembrana, sendo posicionadas com a abertura para cima e espaçamento de 4 cm. Além de permitir a drenagem no plano horizontal, esta configuração permite o armazenamento temporário de pequenas quantidades de água dentro das tampinhas, para garantir uma maior umidade. Foi colocada uma manta geotêxtil não tecido sobre as tampas, com função de filtro para o substrato. Por fim, foi disposta uma camada de 5,0 cm de solo orgânico, seguido pelo plantio manual da vegetação selecionada.

Na configuração de telhado verde TVB, a execução foi simplificada com uso de geocomposto drenante (geomembrana, georrede e geotêxtil) como uma única camada. Este material atende, em uma única peça, às funções de impermeabilização, drenagem e filtração. A configuração TVB permitiu uma instalação mais rápida e uniforme. Na parte superior tem-se os mesmos 5,0 cm de solo orgânico seguido pelo plantio manual da vegetação. Mais detalhes sobre as duas configurações de telhado verde executadas podem ser encontrados em Ferreira (2025).

A Figura 3 apresenta os detalhes das camadas drenantes das duas configurações de telhado verde executados em campo.



(a) (b)

Figura 3. Detalhes dos geossintéticos utilizados. (a) Geomembrana, tampinha PET e Geotêxtil na configuração TVA; (b) Geocomposto da configuração TVB.

Após a montagem das camadas, foram instalados dispositivos adicionais para garantir o desempenho adequado e a manutenção do telhado verde, destacando-se a irrigação e a circulação de pessoas. O sistema de irrigação consistiu em uma instalação hidráulica diretamente da caixa d'água para a conexão de mangueiras perfuradas para manter a umidade do solo. Para a circulação de pessoas sobre o telhado, foram dispostas tábuas de madeira para distribuir o peso e não danificar as plantas ou comprimir excessivamente o substrato.

A Figura 4 apresenta o telhado verde logo após a finalização da montagem das camadas e disposição do substrato [Figura 4(a)] e sete meses após o plantio, momento em que a vegetação semi-extensiva já apresentava cobertura plena [Figura 4(b)]. Foi destacado na figura o respectivo lado de cada configuração.



(a) (b)

Figura 4. Fotos do Telhado verde (a) Após a disposição do substrato e tábuas para facilitar a circulação; (b) 07 meses após o plantio da vegetação.

2.3 Monitoramento térmico

O monitoramento térmico foi realizado por meio de sete sensores de temperatura *HOBO Pendant® MX Water Temperature Data Logger*, com acurácia de ±0,5°C. A numeração e localização de cada dispositivo utilizado no experimento estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Posição dos sensores de temperatura.

Sensor de temperatura	Posição do sensor
412	face inferior do telhado verde TVA
416	face inferior do telhado verde TVB
417	meia altura do cômodo abaixo do telhado verde TVA
415	meia altura do cômodo abaixo do telhado verde TVB
413	face inferior do telhado convencional (vizinho)
414	meia altura do cômodo abaixo do telhado convencional (vizinho)
395	externo - acima dos telhados

Os sensores foram fixados na face inferior das telhas metálicas (sensores 412 e 416) e a meia altura dos cômodos (sensores 417 e 415) para cada configuração de telhado verde. Como grupo de controle para comparação, um sensor externo (395) mediu a temperatura acima do telhado, enquanto outros dois sensores (413 e 414) foram instalados em uma residência vizinha com cobertura convencional. Os dados foram registrados em intervalos de 5 minutos, processados via software *HOBOconnect* e organizados em planilhas eletrônicas para análise. A Figura 5 apresenta um desenho esquemático com a posição dos sensores de temperatura.

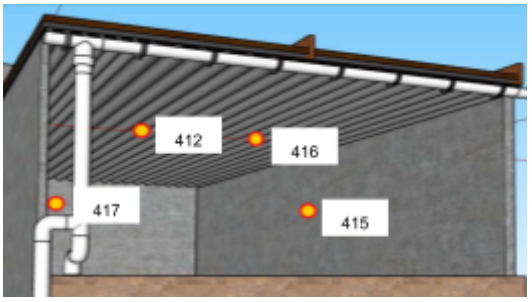


Figura 5. Desenho esquemático da disposição dos sensores na residência onde o telhado verde foi instalado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar a eficiência dos telhados verdes na mitigação do calor em condições extremas, foram selecionados três dias que apresentaram as maiores temperaturas máximas registradas pela Estação Meteorológica de Irajá durante o período de monitoramento. As datas selecionadas, seus respectivos horários de pico e as temperaturas externas máximas aferidas estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Temperaturas máximas registradas nos dias críticos de monitoramento.

Dia	Horário do Pico	Temperatura Externa Máxima (°C)
18/01/2025	14h00	41,5
17/02/2025	15h00	43,0
18/02/2025	13h15	41,8

A eficiência dos sistemas foi verificada através da análise do gradiente de temperatura e da variação da amplitude térmica diária. A Tabela 4 apresenta o resumo estatístico das temperaturas registradas no dia 17/02/2025, o evento de maior temperatura máxima identificado durante o período de monitoramento. Foram

priorizados os sensores 412, 416 e 413, na face inferior do telhado, pelo fato de ser a superfície com principal interface de troca de calor com o ambiente interno.

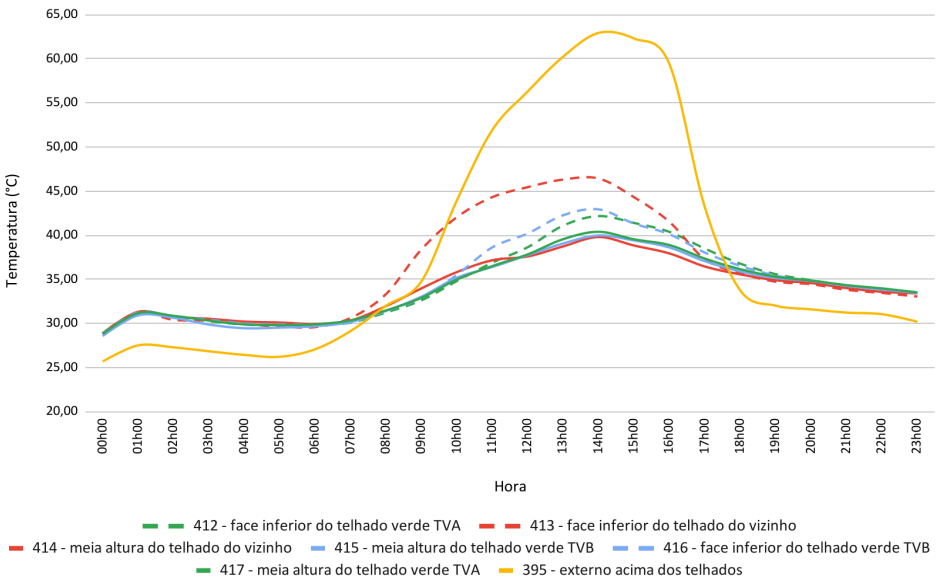
Tabela 4. Resumo estatístico das temperaturas no dia de pico térmico (17/02/2025).

Configuração	Sensor	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Amplitude (°C)
Externo (acima do Telhado)	395	63,8	26,1	37,7
Telhado Convencional (Vizinho)	413	46,8	29,3	17,5
Telhado Verde TVA	412	42,3	29,7	12,6
Telhado Verde TVB	416	43,1	29,8	13,3

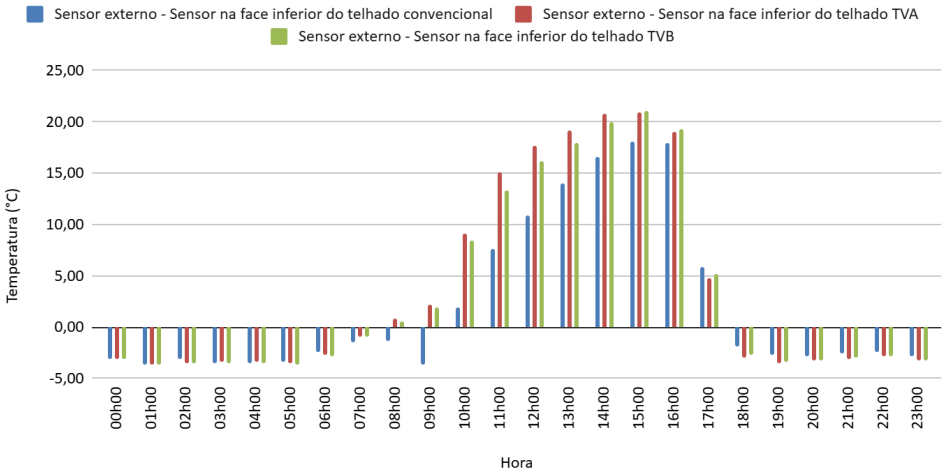
Para visualizar a eficiência dos telhados verdes com geossintéticos, a Figura 6(a) apresenta as curvas de temperatura registradas pelos sensores situados nos telhados TVA e TVB, além do convencional, durante o dia mais crítico de monitoramento (17/02/2025).

Conforme observado na Figura 6(a), a temperatura da face inferior do telhado convencional (sensor 413) apresenta um aumento abrupto, acompanhando diretamente a radiação solar e atingindo seu pico às 14h00. Em contraste, as curvas das configurações TVA (sensor 412) e TVB (sensor 416) mostram-se significativamente mais suavizadas no mesmo horário. Este comportamento evidencia o efeito de amortecimento térmico proporcionado pelo sistema de telhado verde. Enquanto a face inferior do telhado convencional responde rapidamente às variações externas, chegando a 46,8 °C, os telhados verdes retardam o fluxo de calor, mantendo as temperaturas nas faces inferiores abaixo dos 43,1 °C.

Complementarmente, a análise do gradiente térmico em relação ao ambiente externo (Sensor 395), ilustrada na Figura 6(b), destaca a capacidade de isolamento de cada configuração. Nota-se que, nos horários de pico de insolação, a diferença de temperatura entre o exterior e a face inferior da telha no sistema TVA chegou a superar 20 °C. Este elevado gradiente confirma que a combinação de geossintéticos, camada drenante (como tampinhas PET) e substrato vegetal atuou como uma barreira fundamental para mitigar a irradiação térmica excessiva, promovendo uma melhoria significativa nas condições de habitabilidade e conforto térmico dos moradores.



(a)



(b)

Figura 6. Desempenho térmico das configurações experimentais no dia crítico. (a) Variação horária da temperatura na face inferior das telhas; (b) Gradiente de temperatura entre o ambiente externo e interno.

4 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou o desempenho térmico de duas configurações de telhado verde com geossintéticos em uma área de vulnerabilidade social, especificamente no Complexo da Maré, Rio de Janeiro. O objetivo central foi analisar a viabilidade técnica dessas medidas como estratégia de mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas, visando à melhoria do conforto térmico e fortalecimento da resiliência climática em habitações situadas em contextos urbanos socialmente vulneráveis.

O uso de geossintéticos em telhados verdes mostrou-se tecnicamente viável e socialmente relevante, proporcionando: atenuação térmica significativa, com redução da temperatura da face inferior da telha metálica em até 4,3 °C no horário de pico em comparação com o telhado convencional; redução de carga estrutural em comparação aos sistemas convencionais e simplicidade construtiva para habitações em áreas urbanas de vulnerabilidade social. O sucesso da configuração com materiais recicláveis (tampinhas de garrafa PET) reforça o potencial de replicabilidade da tecnologia, aliando baixo custo à promoção da economia circular dentro da comunidade. Adicionalmente, o monitoramento confirmou que o retardo do pico de calor no interior da residência é proporcionado pelo telhado verde, oferecendo maior conforto aos moradores.

Conclui-se que o telhado verde com geossintéticos constitui uma tecnologia social, prática e eficiente para o fortalecimento da resiliência climática em territórios vulneráveis e melhoria da qualidade de vida.

AGRADECIMENTOS

A Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio fundamental para a realização desta pesquisa. A ONG Redes da Maré, especificamente à equipe do projeto EcoClima, pela parceria técnica, mobilização comunitária e suporte logístico indispensáveis para a implementação do protótipo no território. Ao Programa de Engenharia Ambiental da Poli/UFRJ pelo suporte acadêmico, institucional e pelo fomento ao projeto EcoClima. Por fim, um agradecimento especial a moradora da comunidade do Parque Rubens Vaz que gentilmente disponibilizou sua residência para a instalação dos módulos experimentais e para o monitoramento contínuo dos dados térmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, A.F.F.F. (2015). *A vegetação na envolvente exterior dos edifícios: impactos, condicionantes e estratégias de intervenção ecoeficientes*. Dissertação de Mestrado, Programa de Construção e Reabilitação Sustentáveis, Universidade do Minho, Portugal.

Ferreira, A. C. M. A. (2025). *Análise do efeito térmico de Telhados Verdes em Edificações Urbanas: Estudo de caso na favela da Maré, Município do Rio de Janeiro*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 75 p.

Marques, T.H.N., Rizzi, D.; Ferraz, V.; Herzog, C.P. (2021). Soluções baseadas na natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru. *Revista LABVERDE*, São Paulo, v. 11, n. 1. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/189419.

Ministério da Integração Nacional (2012). *Classificação e Codificação Brasileira de Desastres – COBRADE*. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil.

Redes da Maré (2024). *Cartilha Ilhas de Calor: efeitos e soluções a partir das favelas – Projeto EcoClima*. Coordenação: Rian de Queiroz Cunha. Rio de Janeiro: Redes da Maré. Disponível em: https://www.redesdamare.org.br/media/downloads/arquivos/Cartilha_IlhasdeCalor_Ecoclima.pdf.

Righi, D. P.; Kohler, L. G.; Antocheves, R; Neto, A. B. S. S.; Mohamad, G. (2023). *Cobertura verde: um uso sustentável na construção civil*. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Shams, J. C. A.; Giacomeli, D.C.; Sucomine, N. M. (2009). Emprego da arborização na melhoria do conforto térmico nos espaços livres públicos. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, Piracicaba - SP, v. 4, n. 4, p. 1-16.

Sharma, A; Conry, P; Fernando, H. J. S; Hamlet, A. F.; Hellmann, J. J; Chen, F. (2016). Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 6, p. 064004.

Silva, J.S; Silva, T.T.S.; Pastich, E. A. (2022). Benefícios e limitações do uso de telhados verdes: uma revisão sistemática. *Revista GEAMA, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology*, 8(3): 15-28.

Zhang, N; Zhu, L; Zhu, Y. (2011). Urban heat island and boundary layer structures under hot weather synoptic conditions: A case study of Suzhou City, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 28, n. 4, p. 855-865.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/19

Aplicação de Geotêxteis na Drenagem de Pavimentos: Análise de Critérios de Retenção, Permeabilidade e Sobrevivência

Fernanda Veiga Gonsalves Cotrim
Graduanda em Engenharia Civil, PUC Goiás, Goiânia, Brasil, feeveiga@gmail.com

Maria Eduarda Martins Eichler
Graduanda em Engenharia Civil, PUC Goiás, Goiânia, Brasil, maria.edueichler@gmail.com

Marta Pereira da Luz
Professora Adjunta, Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC GOIÁS, marta.eng@pucgoias.edu.br

RESUMO: A drenagem constitui um dos fatores mais relevantes para assegurar a durabilidade e a segurança das rodovias, visto que a presença de água nas camadas do pavimento pode comprometer a integridade estrutural, reduzir a vida útil e elevar os custos de manutenção. Nesse contexto, a utilização de materiais como os geotêxteis apresenta-se como uma opção promissora para aumentar o desempenho e a economia das obras viárias. O presente trabalho busca especificar o geotêxtil adequado, segundo os critérios de retenção, permeabilidade e sobrevivência, aplicado a um projeto de rodovia do centro-oeste. Para tanto, foram adotados os critérios estabelecidos por Vertematti (2015). Os resultados demonstraram que o geotêxtil GTX A atende satisfatoriamente a todos os critérios estabelecidos, cumprindo a função de material filtrante. Assim, este estudo comprova que o geotêxtil pode ser considerado como uma alternativa eficaz para a drenagem de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais filtrantes, Pavimentação, Dreno, Lençol freático.

ABSTRACT: Drainage is one of the most relevant factors in ensuring the durability and safety of highways, since the presence of water within pavement layers can compromise structural integrity, reduce service life, and increase maintenance costs. In this context, the use of materials such as geotextiles emerges as a promising option to enhance the performance and cost-efficiency of road infrastructure works. This study aims to specify the appropriate geotextile according to retention, permeability, and survivability criteria, applied to a highway project in the Midwest region. For this purpose, the criteria established by Vertematti (2015) were adopted. The results demonstrated that the GTX A geotextile satisfactorily meets all the established criteria, fulfilling its function as a filtering material. Thus, this study confirms that geotextiles can be considered an effective alternative for pavement drainage.

KEYWORDS: Filtering materials, Pavement, Drain, Groundwater table.

1 INTRODUÇÃO

Conforme o Manual de Drenagem de Rodovias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), a água da chuva pode escoar pela superfície ou infiltrar-se no solo, contribuindo para a formação de aquíferos subterrâneos. Para lidar com o lençol freático elevado, utiliza-se o sistema de drenagem profunda, responsável por rebaixar e controlar esse nível, favorecendo diretamente a melhoria do desempenho estrutural e o aumento da vida útil das rodovias.

De modo geral, os efeitos da água livre sobre o pavimento, conforme discutido por Suzuki et al. (2013), incluem a redução da resistência dos materiais granulares, o bombeamento em pavimentos, o desempenho insatisfatório de solos expansivos e o surgimento de trincas em revestimentos asfálticos e de concreto.

Nesse contexto, Jabôr (2023) ressalta que o projeto de drenagem profunda deve contemplar tanto o correto dimensionamento dos dispositivos quanto a seleção adequada dos materiais, com o objetivo de captar e conduzir as águas subterrâneas e infiltrações superficiais, garantindo a durabilidade prevista para o pavimento.

De acordo com o DNIT (2006), os drenos profundos longitudinais (DPL) devem ser empregados em locais suscetíveis à presença de água subterrânea, como regiões em corte, áreas com lençol freático elevado e zonas saturadas próximas à base dos taludes.

No Brasil, a utilização dos geossintéticos em sistemas de filtração foi uma das suas primeiras aplicações, amplamente difundidas e, ainda hoje, permanece como uma das principais. Segundo o Manual Brasileiro de Geossintéticos Vertematti, (2015), os geotêxteis substituem com vantagem uma ou mais camadas de agregados naturais nos sistemas filtrantes convencionais. Sua regularidade, decorrente do processo de fabricação, confere maior qualidade à obra e proporciona significativa redução de custos em comparação aos filtros naturais.

Com relação à função de filtração, pretende-se que o geotêxtil, ao ser atravessado perpendicularmente ao seu plano, permita a passagem de líquidos e, ao mesmo tempo, retenha as partículas do solo. Situações de grande importância para essa função incluem aplicações em barragens de terra e em sistemas de drenagem em geral (PALMEIRA, 2003).

De acordo com Gourc & Palmeira (2000), o emprego de geossintéticos em sistemas de drenagem exige atenção à possível colmatação do filtro, à capacidade de retenção de partículas e aos efeitos de altas tensões sobre suas propriedades hidráulicas. A colmatação biológica, especialmente em depósitos de resíduos sólidos, representa um desafio adicional devido à presença de microrganismos. Falhas nesses sistemas podem gerar problemas de estabilidade estrutural e impactos ambientais.

Em vista do exposto, o objetivo deste trabalho é identificar e especificar o geotêxtil mais adequado para aplicação em um projeto rodoviário, na região Centro-Oeste do Brasil (GO-319), tomando como referência os critérios técnicos de retenção, permeabilidade e sobrevivência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi aplicado no contexto da Rodovia GO-319, conforme ilustrado na Figura 1, entre o Distrito de Nova Fátima-GO (Hidrolândia-GO) e a rodovia GO-040, em Aragoiânia-GO, abrangendo um trecho de 11,74 km. O projeto executivo utilizado foi fornecido pela empresa Queiroz Almeida Engenharia.

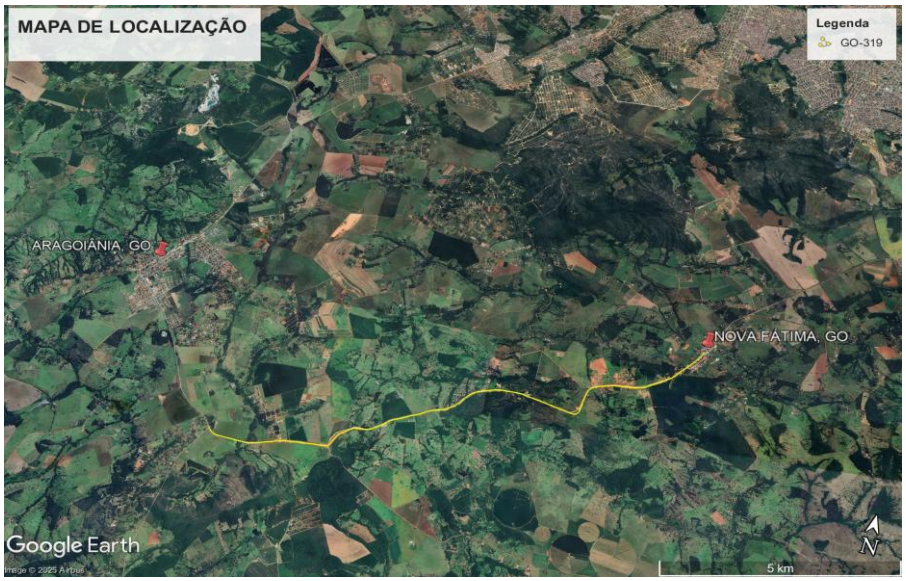


Figura 1. Trecho estudado da rodovia GO-319.
Fonte 1. Google Earth, 2025.

Os geotêxteis (GTX) são materiais têxteis aplicados em obras de engenharia geotécnica e ambiental, desempenhando diversas funções de acordo com suas características físicas e mecânicas. A ABNT NBR 12553:2012 classifica os geotêxteis em seis tipos, identificados de GTX-A a GTX-F, conforme sua função predominante: GTX-A (filtração), que permite a passagem de água retendo partículas sólidas; GTX-B (drenagem), destinado à condução de fluxos líquidos; GTX-C (separação), utilizado para impedir a mistura de materiais distintos; GTX-D (reforço), empregado para aumentar a resistência e estabilidade de solos; GTX-E (proteção), voltado à proteção de outros geossintéticos contra danos mecânicos; e GTX-F (barreira), aplicado como elemento de vedação, muitas vezes associado a geocompostos. Essa classificação auxilia na especificação técnica e na escolha do geotêxtil mais adequado às condições de projeto (SOUZA; LIMA; PEREIRA, 2021).

2.1 DIMENSIONAMENTO CONVENCIONAL

Para fins de dimensionamento de filtros, consideram-se, segundo Vertematti (2015), os métodos convencional e racional. Neste estudo, adotou-se o método de dimensionamento convencional, que se fundamenta em três critérios principais: retenção, permeabilidade e estabilidade (sobrevivência).

No primeiro passo, avaliou-se a autoestabilidade do solo utilizando o critério de Chen *et al*. apud Vertematti, (2015, p.179) apresentado nas equações 1 a 3. O critério de retenção permite verificar se a distribuição granulométrica do material garante estabilidade sem a necessidade de reforços adicionais, analisando a relação entre as frações de partículas do solo e sua capacidade de manter-se coeso, quando submetido a condições de fluxo.

$$D_{50} > \frac{D_{85s}}{5} \quad (1)$$

$$D_{15} > \frac{D_{35s}}{5} \quad (2)$$

$$D_{15} > \frac{D_{35s}}{5} \quad (3)$$

Após verificar a condição autofiltrante do solo, adota-se o critério do CFGG (Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas, apud Vertematti, (2015, p.180). Esse critério estabelece diretrizes para selecionar o geotêxtil mais adequado ao sistema de filtração, considerando a granulometria do solo e as características do material. Com base nesse critério, o diâmetro de filtração foi estabelecido, por meio das equações 4 e 5.

$$O < C\ x\ D_{85S} \quad (4)$$

$$C = C_1\ x\ C_2\ x\ C_3\ x\ C_4 \quad (5)$$

Onde:
O: Diâmetro de filtração;
C_1: Fator granulométrico = 1,00 (solos bem graduados e contínuos); 0,80 (solos uniformes e contínuos);
C_2: Fator de adensamento = 1,25 (solos densos e confinados); 0,80 (solos fofos e não-confinados);
C_3: Fator hidráulico = 1,00 (gradiente menor que 5); 0,80 (gradiente entre 5 e 20); 0,60 (gradiente entre 21 e 40 ou fluxo reverso);
C_4: Fator de função = 1,00 (somente função de filtro); 0,30 (função de filtro e dreno).

No segundo passo, avaliou-se o critério de permeabilidade, que determina que a condutividade hidráulica inicial do geotêxtil deve ser, no mínimo, equivalente à do solo, sendo preferencialmente superior. Essa condição é fundamental para evitar perdas de carga e assegurar o escoamento eficiente da água. Para tanto, a permeabilidade do solo foi estimada pelo Método de Hazen, conforme a equação 6, enquanto a permeabilidade do geotêxtil foi obtida por meio da equação 7.

$$k = C * (D_{10})^2 \quad (6)$$

$$K_n > e_g \, x \, 10^n \, x \, K_s \quad (7)$$

Sendo:
e_g= espessura do geotêxtil;
K_s= A permeabilidade do solo;
K_n= A permeabilidade normal do geotêxtil;
n = 4 (baixos gradientes, solos de baixa permeabilidade, silto-argilosos).
No último passo, o geotêxtil deve atender, além do desempenho como filtro, ao critério de sobrevivência, que inclui resistência à perfuração, deformações, absorção de energia, flexibilidade, capacidade de passagem de água, tolerância a sólidos em suspensão e resistência a agentes agressivos do meio ambiente.

3 RESULTADOS

O projeto executivo forneceu resultados de ensaios laboratoriais, permitindo a identificação das tipologias de solo: A-4, segundo a classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), e areia bem graduada sem finos plásticos, de acordo com a USCS (Unified Soil Classification System).

Com base nos dados obtidos no ensaio de granulometria, que indicam o percentual de material passante nas peneiras com aberturas entre 25 mm e 0,075 mm, foi traçada a curva granulométrica da amostra coletada (Figura 2). A análise da distribuição dos grãos classificou o solo como areia grossa mal graduada, em conformidade com os critérios de classificação granulométrica. A seguir, descrevem-se os passos do dimensionamento convencional:

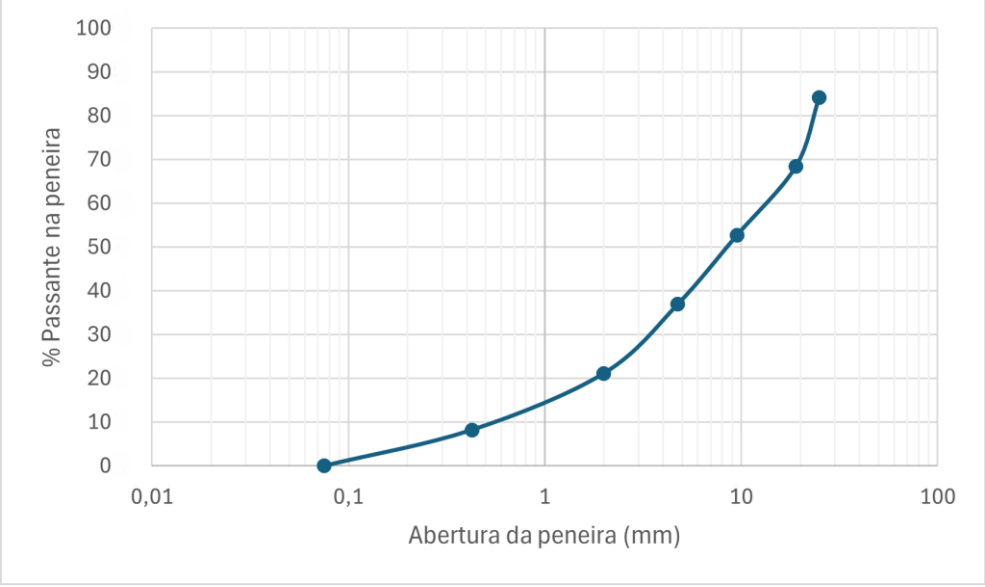


Figura 2. Curva Granulométrica.

No critério de retenção, utilizou-se como referência a relação entre o diâmetro de filtração do geotêxtil (O_{95}) e o diâmetro efetivo do solo (D_{85}), conforme a equação $O_{95} < 0{,}192 \times D_{85}$. Considerando-se o valor de D_{85} igual a 0,7 mm, obteve-se o limite de $O_{95} < 0{,}1344$ mm. Com base nesse limite, verificou-se que os geotêxteis GTX A, GTX C, GTX D e GTX E atenderam ao critério de retenção, apresentando diâmetros de filtração inferiores ao valor máximo permitido.

O critério de permeabilidade teve como objetivo assegurar que o geotêxtil apresentasse capacidade hidráulica suficiente para permitir a passagem do fluido, evitando o acúmulo de poropressões. Para isso, utilizou-se a relação $k_g > k_{min}$, na qual $k_g$representa a permeabilidade do geotêxtil e k_{min}a permeabilidade

mínima requerida para o material. Os resultados obtidos demonstraram que todos os geotêxteis avaliados apresentaram valores de permeabilidade superiores ao mínimo necessário, atendendo integralmente a este critério.

Considerando que se trata de uma condição de solicitação medianamente crítica, devido ao lançamento de pedra britada a partir de altura superior a 2,0 m, adotou-se o Nível II de solicitação conforme Vertematti (2015), que estabelece os requisitos mínimos de desempenho para garantir a integridade do geotêxtil frente às solicitações mecânicas decorrentes do material lançado. Com base nesse autor, foram adotados valores mínimos de 12 kN/m para resistência à tração, determinada segundo a NBR ISO 10319:2013 – Geotêxteis e produtos correlatos – Ensaio de tração de faixa larga, e 2,3 kN para resistência ao puncionamento, conforme a NBR ISO 12236 – Geotêxteis e produtos correlatos – Ensaio de puncionamento estático (CBR). Tais parâmetros asseguram que o geotêxtil suporte adequadamente os esforços longitudinais e as tensões pontuais, mantendo a integridade estrutural do sistema. Na etapa de verificação da sobrevivência, observou-se que os geotêxteis GTX A, GTX E e GTX F atenderam aos valores mínimos exigidos em ambos os ensaios, demonstrando desempenho satisfatório diante das condições de solicitação previstas.

Tabela 1. Geotêxteis que atendem a cada critério.

Geotêxteis que atendem ao critério de projeto				
Geotêxtil não tecido	Critério de retenção	Critério de permeabilidade	Critério de sobrevivência	Decisão
GTX A	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	APROVADO
GTX B	FALSO	VERDADEIRO	FALSO	DESAPROVADO
GTX C	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	DESAPROVADO
GTX D	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO	DESAPROVADO
GTX E	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	APROVADO
GTX F	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	DESAPROVADO

Portanto, verificou-se que os GTX A e o GTX E apresentaram desempenho satisfatório, atendendo aos critérios de retenção, permeabilidade e sobrevivência.

4 CONCLUSÃO

A drenagem constitui um fator crítico para a longevidade e segurança das rodovias, pois a presença de água nas camadas do pavimento pode comprometer severamente sua integridade estrutural, reduzir a vida útil e elevar os custos de manutenção. Diante desse cenário, a correta especificação de materiais filtrantes no projeto de drenagem profunda é fundamental para captar e conduzir as águas subterrâneas, assegurando a durabilidade prevista para o pavimento.

Este estudo buscou identificar o geotêxtil mais adequado para aplicação em um projeto de rodovia na região Centro-Oeste do Brasil (GO-319). Para isso, foi empregado o método de dimensionamento convencional, que se baseia nos critérios de retenção, permeabilidade e sobrevivência, conforme estabelecido por Vertematti (2015).

Após a análise integrada dos três critérios, verificou-se que apenas os geotêxteis GTX A e GTX E demonstraram desempenho satisfatório, atendendo simultaneamente aos requisitos técnicos de filtração, capacidade hidráulica e resistência mecânica. O geotêxtil GTX A, classificado pela ABNT NBR 12553:2012 como ideal para a função de filtração, apresentou as características necessárias para atuar como material filtrante no sistema de drenagem da Rodovia GO-319. Os geotêxteis substituem com vantagem as camadas de agregados naturais nos sistemas filtrantes convencionais, conferindo maior qualidade à obra.

Dessa forma, a análise evidenciou que o geotêxtil GTX A apresenta propriedades adequadas para desempenhar eficientemente a função de filtração no trecho da rodovia GO-319 em estudo. Os resultados confirmam que a utilização de geossintéticos constitui uma alternativa técnica eficaz e vantajosa para os sistemas de drenagem de pavimentos, apresentando desempenho superior aos filtros convencionais compostos por camadas de agregados naturais. Ademais, destaca-se que a adoção de critérios técnicos bem definidos —

envolvendo aspectos de retenção, permeabilidade e sobrevivência — aliada à correta especificação dos materiais, é fundamental para assegurar o desempenho e a durabilidade das estruturas viárias, reforçando o papel do engenheiro na implementação de soluções construtivas sustentáveis e de longa vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bouazza, A.; Freund, M.; Nahlawi, H. (2006*) Water retention of nonwoven polyester geotextiles. Polymer Testing*, 25, p. 1038–1043.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006) *Manual de Drenagem de Rodovias*. 3. ed., Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Rio de Janeiro.

Chen, Y. H.; Simons, D. B.; Demery, P. M. (1981) *Hydraulic testing of plastic filter fabrics. ASCE Journal*, 107 (IR3).

French Committee of Geotextiles and Geomembranes (1986) *Recommendations for the use of geotextiles in drainage and filtration systems*. Institut Textile de France, Boulogne-Billancourt.

Gourc, J.-P.; Palmeira, E. M. (2000) Geossintéticos em sistemas de drenagem e filtração. In: Vertematti, J. C. (org.*). Manual Brasileiro de Geossintéticos*. Associação Brasileira da Indústria de Não-Tecidos e Tecidos Técnicos – ABINT, São Paulo, p. 273–310.

Jabôr, M. (2023) *Estudos hidrológicos e projeto de drenagem*. [s.l.]: [s.n.].

Palmeira, E. M. (2003) Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis. In: IV *Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*, Porto Alegre.

Souza, M. A.; Lima, T. R.; Pereira, D. C. (2021) Classificação e desempenho dos geotêxteis segundo suas funções em obras geotécnicas. *Revista Brasileira de Geotecnia e Geossintéticos*, 9 (2), p. 112–120.

Suzuki, C. Y.; Azevedo, Â. M.; Kabbach, F. I. (2013) *Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento*. Oficina de Textos, São Paulo.

Vertematti, J. C. (coord.) (2015) *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2. ed., Edgard Blücher, São Paulo.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/20

Aspectos de Dimensionamento e Execução de Aterros Estaqueados - Caso de Obra em Rio das Pedras, Jacarepaguá, Rio de Janeiro

Cristina F. Schmidt
Diretora Técnica, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, cristina@huesker.com.br

Mateus Cleto
Gerente Comercial, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, mateus.cleto@huesker.com.br

Luis Brian Fuentes
Gerente de Engenharia, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, brian.fuentes@huesker.com.br

RESUMO: Aterros estaqueados são estruturas mistas onde um aterro compactado é apoiado sobre fundações profundas tipo estaca, em áreas de ocorrência de solos moles compressíveis e de baixa capacidade de carga. Seu conceito básico de funcionamento baseia-se no fenômeno de arqueamento do solo, que resulta no encaminhamento da maior parte das cargas de peso próprio do aterro e sobrecarga operacional diretamente para as estacas da fundação, sem a necessidade de se construir uma laje contínua na base do aterro. As estacas verticais, as estacas inclinadas nos bordos dos aterros, os capitéis no topo das estacas e o aterro compactado são componentes de aterros estaqueados convencionais. O uso adicional de geogrelhas e geotêxteis tecidos de alta resistência à tração e baixa deformação no topo dos capitéis traz otimizações quanto ao arranjo geométrico da solução, permitindo aumentar o espaçamento entre estacas e dispensar as estacas inclinadas do bordo do aterro, por exemplo. Ainda que as metodologias de cálculo sejam bem conhecidas e relativamente simples, os detalhes e cuidados construtivos são fundamentais para o bom desempenho dessas obras na fase operacional. O artigo aborda alguns aspectos das metodologias de cálculo utilizadas atualmente no Brasil e discute boas práticas executivas para garantir o desempenho adequado da solução. Por fim, apresenta o caso de obra de uma escola na comunidade de Rio das Pedras em Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro, construída em terreno com espessas camadas de solos argilosos moles, onde a solução de aterro estaqueado foi escolhida para a estabilização das áreas de pátios no entorno da construção em função do alto controle de recalques na fase operacional e exíguo tempo de execução.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Estaqueado, Geogrelha PVA, Capitel, Aterro sobre Solos Moles, Controle de Recalque.

ABSTRACT: Piled embankments are composite systems in which a compacted embankment is supported by deep foundations (piles) in areas underlain by soft, highly compressible soils with low bearing capacity. Their fundamental load transfer mechanism is based on the soil arching effect, whereby most of the embankment self-weight and operational surcharge loads are transferred directly to the foundation piles, eliminating the need for a continuous load transfer slab at the base of the embankment. Conventional piled embankments comprise vertical piles, battered piles along the embankment edges, pile caps at the pile heads, and the compacted embankment fill. The additional use of high-tensile-strength, low-strain geosynthetics, such as geogrids and woven geotextiles, placed over the pile caps provides significant optimization of the geometric arrangement of the system. This reinforcement allows for increased pile spacing and may eliminate the need for battered piles at the embankment edges, for instance. Although the design methodologies are well established and relatively straightforward, construction details and quality control measures are critical to ensuring satisfactory performance during the operational phase. The paper addresses selected aspects of the design methodologies currently adopted in Brazil and discusses construction best practices required to ensure the adequate performance of the system. Finally, a case study is presented involving the construction of a school in the community of Rio das Pedras, in Jacarepaguá, in the city of Rio de Janeiro, Brazil. The site is

characterized by thick layers of soft clay deposits. A piled embankment solution was selected for the stabilization of the surrounding yard areas due to the strict settlement control requirements during the operational phase and the limited construction timeframe.
KEYWORDS: Piled Embankment, PVA Geogrid, Pile Caps, Embankments on Soft Soils, Settlement Control.

1 INTRODUÇÃO

Nas palavras do professor Carlos de Souza Pinto, "*o projeto de aterros sobre argilas moles é um dos mais bonitos e interessantes tópicos da Engenharia Geotécnica*" (Almeida e Marques, 2010). A construção dessas estruturas traz como principal desafio garantir as condições de estabilidade e as deformações compatíveis com o uso, no curto prazo e ao longo de sua vida útil. Dentre as diversas soluções para estabilização de aterros sobre solos moles, a técnica de aterros estaqueados vem se popularizando no Brasil nos últimos anos. A primeira obra de aterro estaqueado com geogrelhas em nosso país foi executada no final da década de 1990, em Chapadão do Sul, MS (Vertematti, 2015). A construção de aterros sobre elementos de estacas para redução de recalques e aumento de estabilidade tem se mostrado economicamente viável, principalmente quando o prazo para execução da obra é reduzido. Sua utilização é imediata após a conclusão do aterro, não necessitando de tempo de espera para a operação.

Segundo a norma DNIT 381/2022, o aterro estaqueado em obras viárias deve ser classificado como Classe I e atender aos critérios de estabilidade e deformações desta classe de aterros. Além de fatores de segurança mínimos variando de 1,2 (período construtivo) a 1,5 (longo prazo), os aterros Classe I devem apresentar recalques residuais de 2 cm em 10 anos e 5 cm em 25 anos. Aterros estaqueados bem dimensionados e bem executados atendem satisfatoriamente os critérios restritos de recalques residuais da norma, sendo a manutenção praticamente inexistente da obra durante a fase de operação. Outro aspecto importante é a segurança às estruturas vizinhas quanto a deslocamentos horizontais na camada de solos moles, o chamado "efeito Tschebotarioff". Como o peso do aterro e as cargas operacionais são transmitidas para as camadas mais resistentes e profundas através das estacas, o acréscimo de tensões verticais no solo mole é mínimo, com reduzidas deformações horizontais na camada compressível.

O uso de geogrelhas e geotêxteis de alta resistência à tração e baixa deformação sobre os capitéis possibilita a absorção da parcela das cargas verticais não transmitida diretamente às estacas por arqueamento e garante a estabilidade dos taludes contra o risco de ruptura por empuxos horizontais excessivos. Como consequência, é possível aumentar o espaçamento da malha das estacas, otimizando a solução.

Há diversas metodologias para dimensionamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos, sendo a mais utilizada no Brasil a norma britânica BS8006-1, devido à sua simplicidade. Em um aterro estaqueado, o carregamento vertical é distribuído para as estacas, para o reforço geossintético e para o subsolo entre capitéis, conforme figura a seguir:

- Parcela A, transmitida diretamente às estacas, por arqueamento.
- Parcela B, transmitida às estacas através do geossintético.
- Parcela C, sustentada pelo subsolo entre os capitéis.

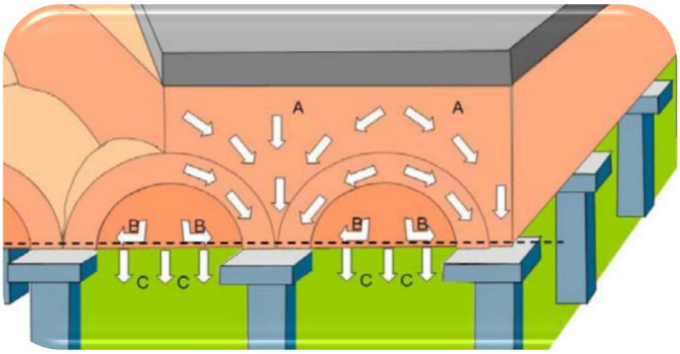


Figura 1. Divisão das cargas verticais em três partes (Van Eecklen, 2016).

2 ASPECTOS DE DIMENSIONAMENTO E CONSTRUTIVOS

Se por um lado o dimensionamento de um aterro estaqueado é um procedimento relativamente simples, sua execução requer cuidados especiais e atenção. O projeto deve levar em consideração as condições de contorno durante as fases executiva e operacional da obra, com detalhamento minuncioso dos elementos do sistema, incluindo a paginação dos painéis, a ancoragem dos geossintéticos e a sequência executiva. As falhas pontuais identificadas em algumas obras estão associadas a problemas executivos ou falhas no detalhamento do projeto. O executor deve cumprir todas as orientações do projeto. A instrumentação e o acompanhamento da obra é fundamental para garantir seu adequado desempenho na fase operacional. A seguir são comentados aspectos de dimensionamento e execução dos elementos que compõem uma estrutura em aterro estaqueado.

2.1 Estacas

As estacas podem ser pré-moldadas ou moldadas in loco, ter ou não capitéis no topo e, em geral, representam o item de maior custo da obra. Sua distribuição em planta deve considerar que a sobreposição lateral entre painéis adjacentes de geossintéticos se dê preferencialmente centrada nas estacas. Por exemplo, para uma geogrelha com largura de 5 m, o espaçamento da malha de estacas deve ser preferencial entre 2,0 m e 2,4 m, com sobreposição entre painéis de 1,0 m a 0,2 m, respectivamente. Essa é uma condição desejável, mas não obrigatória. Para aterros baixos, pode ser particularmente importante.

As estacas deverão ser dimensionadas para suportar a totalidade das cargas verticais, assim como o eventual atrito negativo. O atrito negativo pode ter origem nos recalques devidos à construção da plataforma de trabalho para execução das próprias estacas, entre outras possibilidades.

É fundamental que haja rigor geométrico na execução das estacas; os desvios de locação em planta não devem ser superiores a 10 cm (Van Eecklen, 2016). O vão livre entre capitéis influencia substancialmente a solicitação no reforço geossintético. Por exemplo, para um aterro rodoviário com altura de 2,5 m e sobrecarga operacional de 20 kPa, capitéis com dimensões de 80 cm x 80 cm e espaçamento entre estacas de 2,25 m x 2,25 m, um desalinhamento de 10 cm na locação da estaca resulta em um aumento de 17% na solicitação à tração da geogrelha:

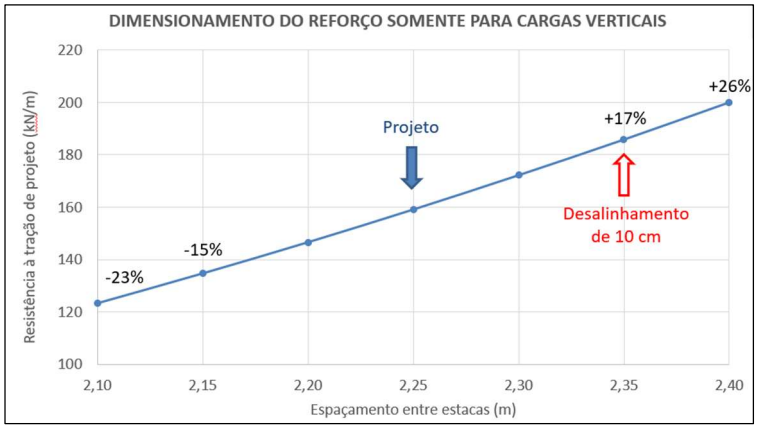


Figura 2. Influência do espaçamento entre estacas na solicitação do reforço geossintético.

Caso haja quebra de estacas e seja necessário instalar estacas adjacentes, havendo perda do alinhamento entre elas, é interessante que sejam providos capitéis maiores sobre tais estacas para garantir a manutenção do vão livre projetado em todos os lados do capitel. Neste caso, sugere-se prever a instalação de um painel adicional de geogrelha na área afetada, incluindo, pelo menos, uma linha de estacas além de cada lado da área afetada pela estaca quebrada. Caso a camada de solos moles se estenda além dos limites do aterro estaqueado, a transição para os trechos não estaqueados pode ser feita através do aumento gradual do espaçamento entre estacas, a redução da profundidade de apoio das estacas ou a execução de uma laje de transição, de forma a minimizar possíveis recalques diferenciais. Além disso, nas estacas das bordas, é relevante verificar a

possibilidade de ocorrência de carregamentos assimétricos, levando a deslocamentos horizontais na camada de solos moles e carregamentos horizontais adicionais nas estacas.

2.2 Capitéis

Capitéis com geometria adequada e bem confeccionados são fundamentais para o sucesso da solução. Os capitéis podem ser pré-moldados ou moldados in loco, apoiados no topo das estacas ou engastados às estacas. O modo de conexão entre o capitel e a estaca é determinante na definição dos momentos fletores no topo das estacas. Seu dimensionamento estrutural deve ser feito por calculista estrutural.

Os capitéis não devem apresentar bordas vivas e sim bordas arredondadas ou chanfradas, de forma a minimizar potenciais danos mecânicos ao reforço geossintético. Sobre os capitéis, recomenda-se pelo menos a colocação de um geotêxtil não tecido com gramatura mínima de 600 g/m, como proteção contra abrasão da geogrelha, com dimensões superiores às do capitel em 20 cm para cada lado. Medidas adicionais de proteção como a inclusão de uma camada de areia sobre o geotêxtil não tecido também podem ser adotadas.

Os capitéis devem ser instalados preferencialmente acima do terreno, sendo os vãos entre capitéis preenchidos com material pouco compacto. Essa condição facilita o pré-tensionamento do reforço geossintético durante a execução do aterro, minimizando recalques na fase de operação.

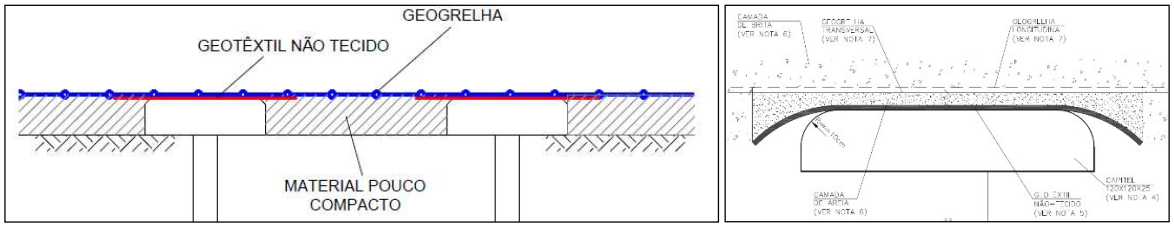


Figura 3. DetalheS da instalação dos capitéis.



Figura 4. Capitéis chanfrados sendo lixados após a desforma e capitéis com bordas arredondadas.

2.3 Reforço Geossintético – Geogrelhas e Geotêxteis Tecidos de Alta Resistência

Soluções em aterro estaqueado exigem reforço geossintético nas direções transversal e longitudinal, que pode ser configurado com duas camadas de geogrelhas ou geotêxteis tecidos unidirecionais de alta rigidez à tração posicionadas perpendicularmente entre si ou uma camada de reforço bidirecional, com painéis adjacentes devidamente costurados, para garantir a transmissão de esforços no sentido transversal. No caso de geogrelhas unidirecionais, a costura não é necessária.



Figura 5. Detalhe de costura de geogrelhas bidirecionais na obra e ensaio de tração em costura.

Um aspecto importante no dimensionamento da solução refere-se à definição do geossintético de reforço. Sua máxima deformação deve ser limitada, de forma a minimizar recalques diferenciais na superfície do aterro. Quanto menor a altura do aterro, mais crítica será essa condição. A norma britânica BS8006-1 recomenda que o reforço deva apresentar uma deformação máxima de 6% para garantir que todos os carregamentos sejam transferidos para as estacas. Nos casos de aterros baixos, onde a altura do aterro for menor do que 70% do vão livre entre capitéis, a deformação máxima no reforço deve ser limitada a 3%.

Os painéis devem estar posicionados seguindo o alinhamento dos eixos de locação das estacas. A eventual construção de uma plataforma de trabalho para dar suporte aos equipamentos durante a execução do aterro e a própria cravação das estacas poderão gerar pequenos recalques na superfície do terreno. Se esses recalques continuarem após a construção do aterro estaqueado, poderá ocorrer um "descolamento" da geogrelha em relação ao terreno de fundação. Essa hipótese de cálculo, recomendada na BS8006-1, deve ser considerada no dimensionamento do reforço, adotando-se que a reação vertical do terreno de fundação na geogrelha é zero (Parcela C, Figura 2), uma vez que a geogrelha não estará apoiada no terreno natural, nos vãos dos capitéis. Conforme já mencionado, a sobreposição lateral entre painéis adjacentes de geogrelha deverá ocorrer preferencialmente sobre os capitéis. Sobreposições no sentido longitudinal da geogrelha devem ser evitadas. Caso necessárias, seu comprimento pode ser calculado em função da resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha e da resistência à tração de projeto da geogrelha e deve ter comprimento mínimo cobrindo três linhas de estacas.

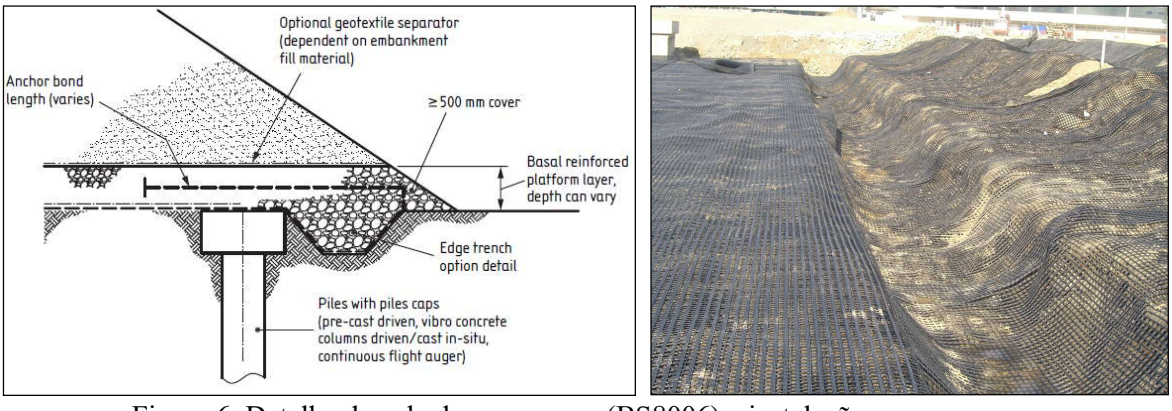


Figura 6. Detalhe da vala de ancoragem (BS8006) e instalação em campo.

As extremidades dos painéis de geogrelha devem estar devidamente ancoradas no sentido de sua maior resistência, utilizando-se valas de ancoragem e/ou envelopamentos, conforme exemplo ao lado. A execução do aterro na parte interna do aterro estaqueado só deve ser iniciada com todas as extremidades das geogrelhas já ancoradas. Ou seja, o aterro deve ser executado de "fora para dentro", a partir das valas de ancoragem.

2.4 Aterro Compactado

Para a execução dos aterros, deve-se dar preferência a solos mais granulares. Algumas bibliografias internacionais recomendam que se tenha uma plataforma de material granular para transferência de cargas na base do aterro, imediatamente acima da geogrelha, deixando os solos mais finos para as camadas mais altas do aterro. Entretanto, a grande maioria dos aterros estaqueados no Brasil não conta com essa plataforma granular e apresenta bom desempenho, sendo usados comumente solos mais finos e laterizados para execução do aterro.

O solo de cobertura deve ser espalhado e compactado de modo que minimize o risco de formação de dobras e movimentações da geogrelha; o sentido de lançamento do solo deve ser coincidente com o das sobreposições. O aterro pode ser executado diretamente sobre a geogrelha e a compactação deve ser leve nas primeiras camadas de aterro. As máquinas e equipamentos de construção não devem operar em contato direto com a geogrelha. Um mínimo de 15 cm de solo deve ser espalhado sobre a geogrelha para permitir o tráfego de máquinas. Além disso, deve-se evitar grandes velocidades e paradas repentinas para minimizar as movimentações da geogrelha durante a construção do aterro.

Conforme citado anteriormente, o princípio de funcionamento dos aterros estaqueados é o arqueamento do solo. Segundo a BS-8006, a perda de sustentação do arco do aterro pode se dar na sua base ou no topo. Para aterros altos, a eficiência de arqueamento é crítica na base (E_{cap}), enquanto para aterros baixos, o topo do arco é o ponto mais crítico (E_{crown}).

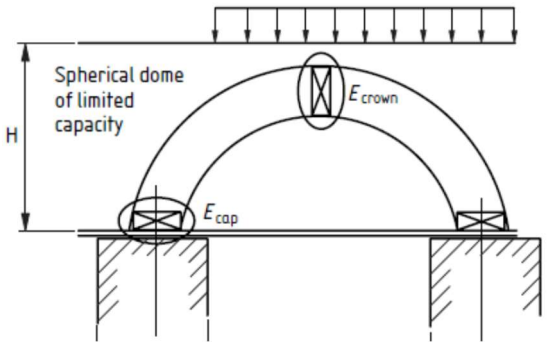


Figura 7. Eficiência de arqueamento do aterro no topo (E_{crown}) e na base (E_{cap}).

Dessa forma, especial atenção deve ser dada à fase construtiva do aterro, principalmente com alturas pequenas de aterro, onde a eficiência de arqueamento no topo (E_{crown}) pode ser crítica. A Figura 8 apresenta a variação da resistência requerida pelo geossintético em função da altura de aterro para o mesmo exemplo do aterro da Figura 2.

Pela figura a seguir, vê-se que a altura de aterro com menor solicitação no reforço é 2,50 m. Para alturas menores ou maiores do que essa, a tração no geossintético é maior. Na prática da obra, significa que se deve evitar tráfego pesado contínuo de equipamentos para baixas alturas de aterro ou, caso essa situação seja inevitável em campo, dimensionar o aterro estaqueado para essa situação. Nem sempre um aterro mais baixo do que o considerado em projeto significa uma condição mais favorável.

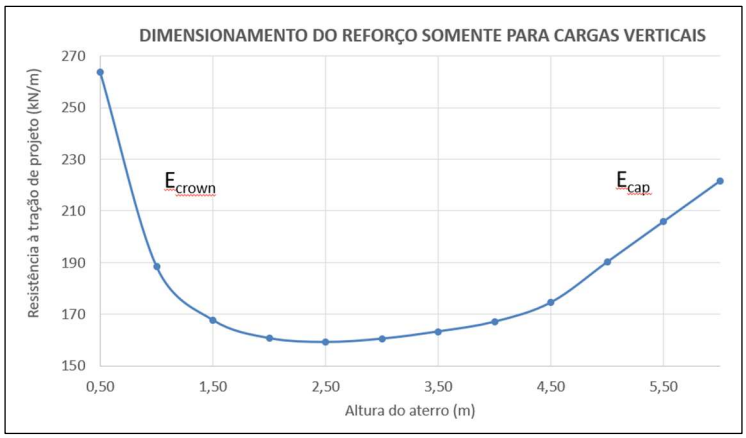


Figura 8. Solicitação de tração no geossintético em função da altura de aterro.

O tráfego de veículos também tem impacto diferente no reforço em aterros mais altos ou mais baixos. Para aterros baixos, o espraiamento das cargas de tráfego é menor, chegando mais esforço no reforço geossintético. Para aterro altos, o espraiamento ao longo da espessura do aterro é maior, com menor solicitação do reforço.

3 PROJETO ESCOLA DO AMANHÃ – RIO DAS PEDRAS, RIO DE JANEIRO

Localizado na baixada de Jacarepaguá, o terreno destinado à construção de uma unidade do projeto Escolas do Amanhã da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro apresentava camadas espessas de solos argilosos moles com baixíssima capacidade de suporte, com nível d'água aflorante e de difícil acesso. O prazo de obra exíguo era mais um dos desafios impostos à construção do colégio. Para implantação da obra, foi adotada a solução de aterro estaqueado com geogrelhas e geotêxteis tecidos de alta resistência à tração e baixa deformabilidade na área ao redor das edificações.

Para o estaqueamento do terreno foram utilizadas estacas com 33 cm de diâmetro e espaçamento de até 3 m em malha quadrada, com capitéis quadrados com dimensões 1,2 m x 1,2 m. O detalhamento dos capitéis incluiu chanfros em sua face superior, minimizando riscos de dano mecânico nos geossintéticos. Sobre os capitéis foi aplicada uma camada de geotêxtil tecido de poliéster, seguida de uma camada de geogrelha de poliéster, ambos com resistência à tração característica de 400 kN/m, sobre a qual foi executado o aterro com altura de cerca de 2 m. Os painéis dos geossintéticos foram posicionados ortogonalmente entre si, de forma a se obter uma plataforma bidirecional. Todos os materiais foram entregues à obra acompanhados dos respectivos resultados de ensaio de tração faixa larga do lote de fabricação. Para minimizar as perdas dos geossintéticos, foram fornecidos à obra desenhos com a paginação dos painéis e o plano de corte de todas as bobinas. A seguir são apresentadas algumas fotografias da execução da obra.



Figura 9. Capitéis sobre as estacas e colocação do geotêxtil tecido de 400 kN/m no sentido transversal



Figura 10. Colocação da geogrelha de 400 kN/m no sentido longitudinal e execução das primeiras camadas de aterro compactado com equipamento leve.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A solução de aterros estaqueados com geossintéticos apresenta uso crescente no Brasil em áreas de ocorrência de solo moles. A transmissão das cargas verticais para os estratos mais resistentes do subsolo através das estacas minimiza o carregamento das argilas moles sotopostas, evitando recalques e deformações horizontais relevantes, na projeção do aterro e nas vizinhanças da obra. Suas principais vantagens são rapidez de execução, garantia de estabilidade durante e após a construção e recalques praticamente inexistentes na vida útil da obra, resultando em baixa manutenção. O projeto deve levar em consideração as condições de contorno durante as fases executiva e operacional da obra, com detalhamento minuncioso dos elementos do sistema, incluindo a paginação dos painéis, a ancoragem dos geossintéticos e a sequência executiva. A execução rigorosa segundo as orientações do projeto é fundamental para o sucesso da solução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo compartilhamento das informações do projeto pela Redav Serviços de Engenharia, pelo acesso à obra por parte da Construtora Zadar e pelas fotos da instalação fornecidas pela Geomaks Comércio de Geossintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M.S.S. A., Marques, M. E. S. (2010). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. Oficina de Textos.

British Standards Institution. (1986). BS 8006 *Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills*.

DNIT (2022). 381/2022 *Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias – Procedimento*. Brasília.

Van Eekelen, S. J., Brugman, M. H. (2016). *Design guideline basal reinforced piled embankments*.

DGGT (2012) *Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements - EBGEO.*

Vertematti, J. C. (2015). *Manual brasileiro de geossintéticos*. Editora Blucher.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/21

Avaliação da Estabilidade de Longo Prazo em Aterros Reforçados sobre Solos Moles

Edwin Fernando Ruiz Blanco
ENGECORPS Engenharia, Barueri, Brasil, edwinfernando.ruiz@engecorps.com.br
CLAY Consultoria, Brasil, fernando.ruiz@clayconsultoria.com.br

Paulo Scarano Hemsi
Divisão de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, Brasil, paulosh@ita.br

Paulo José Brugger, Brugger Engenharia, São José dos Campos, Brasil, paulo@brugger.eng.br

Luis Brian Fuentes, HUESKER Brasil, São José dos Campos, Brasil, brian.fuentes@huesker.com.br

RESUMO:
Este artigo investiga o comportamento de aterros reforçados com geossintéticos sobre solos moles, com foco na mobilização de deformações no reforço durante o processo de adensamento e no efeito da fluência no comportamento do sistema. Esses aspectos são analisados por meio de simulações numéricas de um estudo de caso representativo (aterro rodoviário hipotético), em conjunto com análises de estabilidade por equilíbrio limite, com ênfase na avaliação da estabilidade do sistema no longo prazo, considerando o ganho de resistência não drenada do solo decorrente da dissipação das pressões neutras, bem como os efeitos dependentes do tempo no comportamento do reforço. Os resultados permitem avaliar os efeitos combinados desses fenômenos por meio de uma abordagem integrada dos mecanismos envolvidos, além de analisar o comportamento do sistema no estado limite de serviço. Por fim, o estudo propõe recomendações práticas para a incorporação aproximada desses efeitos em projeto, destacando a importância da consideração conjunta de processos dependentes do tempo na avaliação do desempenho desse tipo de estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros reforçados, Geogrelha, Solo Mole, Adensamento, Fluência.

ABSTRACT: This paper investigates the behavior of geogrid-reinforced embankments constructed on soft soils, with a focus on the mobilization of reinforcement strains during the consolidation process and the influence of creep on system behavior. These aspects are analyzed through numerical simulations of a representative case study (a hypothetical road embankment), combined with limit equilibrium stability analyses, with emphasis on evaluating system stability in the long term. The analysis considers the increase in undrained shear strength of the foundation soil resulting from pore pressure dissipation, as well as time-dependent effects on reinforcement behavior. The results allow for the assessment of the combined effects of these phenomena through an integrated analysis of the governing mechanisms, as well as the evaluation of system behavior under the serviceability limit state. Finally, the study proposes practical recommendations for incorporating these effects into design, highlighting the importance of jointly considering time-dependent processes in the assessment of the performance of such structures.

KEYWORDS: Reinforced Embankments, Geogrid, Soft Soils, Consolidation, Creep.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de aterros reforçados com geossintéticos sobre solos moles tem sido amplamente investigado na prática e na literatura (Humphrey & Holtz, 1987; Jewell, 1988; Leroueil & Rowe, 2001; Rowe & Li, 2005). De modo geral, reconhece-se que a fase mais crítica em termos de estabilidade ocorre durante e imediatamente após a construção, quando o reforço é essencial para evitar o colapso. Durante a fase operacional, o comportamento do sistema passa a ser governado predominantemente pelo ganho progressivo de resistência do solo de fundação, decorrente do processo de adensamento (Jewell, 1996).

Para fins de projeto, a estabilidade de curto prazo é usualmente avaliada sob condições não drenadas, em função da baixa permeabilidade das argilas moles (Ladd, 1991). Nesse contexto, podem ocorrer diferentes mecanismos de ruptura, incluindo ruptura do reforço, deslizamento na interface solo-reforço e ruptura por deslocamentos não drenados excessivos associada à rigidez insuficiente, entre outros (Rowe & Soderman,

1985; Rowe & Mylleville, 1990; Taechakumthorn, 2011). A partir de análises numéricas, Rowe & Soderman (1985) introduziram conceitos como altura líquida do aterro e deformação compatível admissível, posteriormente ampliados por Hinchberger & Rowe (2003).

Por outro lado, é reconhecido que o desempenho dessas estruturas no longo prazo é fortemente influenciado por fenômenos dependentes do tempo, incluindo o adensamento do solo de fundação, o comportamento viscoplástico dos solos moles, caracterizado pela dependência da taxa de deformação (*rate sensitivity*) e pela ocorrência de *creep* (ou adensamento secundário), bem como a resposta viscoelástica dos geossintéticos, associada à fluência e relaxação. Esses efeitos podem resultar no aumento progressivo das deformações após a construção (Silva, 2003; Rowe & Li, 2005; McGown et al., 1982; Leroueil & Marques, 1996).

Apesar de amplamente estudados, tais fenômenos e seus efeitos associados são, em geral, tratados de forma isolada, ou integrados por meio de abordagens complexas, sendo ainda limitadas as propostas que consideram sua interação conjunta e concatenada de forma prática na fase de projeto. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de um aterro rodoviário reforçado com reforço basal sobre solo mole, previamente estudado por Ruiz (2013), aprofundando alguns dos aspectos técnicos mencionados acima e propondo recomendações práticas para sua incorporação no dimensionamento. Inicialmente, realiza-se uma avaliação da estabilidade de curto prazo, incluindo a estimativa do módulo mínimo de rigidez do reforço (J_{min}) e suas implicações na definição do tipo de reforço requerido. Em seguida, para o comportamento de longo prazo (serviço), o foco do estudo está na avaliação da mobilização das deformações de tração no reforço ao longo do tempo, analisando a influência do processo de adensamento do solo de fundação e incorporando, de forma aproximada, os efeitos de fluência do geossintético nessa resposta. Adicionalmente, busca-se identificar o instante mais crítico para avaliação das propriedades do reforço, bem como examinar com maior detalhe a avaliação da estabilidade de longo prazo tanto no Estado Limite Último quanto no Estado Limite de Serviço.

2 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE NO CURTO PRAZO OU NÃO DRENADA (ESTADO LIMITE ÚLTIMO - ULS)

Os métodos de equilíbrio limite tem sido aceitos como técnica para avaliação da estabilidade não drenada de aterros reforçados sobre solos moles. No entanto, sua aplicação pressupõe a definição da deformação do reforço na ruptura, a qual não é diretamente conhecida e deve ser estimada por meio de métodos aproximados ou análises numéricas complexas.

O uso da deformação última de tração do reforço geossintético (também referida como deformação característica) em cálculos de projeto (Michalowski, 1992) pode levar à superestimação da estabilidade de curto prazo, uma vez que aterros reforçados podem atingir a ruptura associada a deslocamentos excessivos antes que a resistência última do reforço seja efetivamente mobilizada (Rowe & Soderman, 1987; Rowe et al., 1995). Nesse contexto, distinguem-se dois estados limite relevantes para o dimensionamento de curto prazo (fim da construção): (*i*) o estado limite associado à ruptura global do sistema, no qual a força de tração requerida no reforço é obtida por análises de equilíbrio limite, e (*ii*) um estado limite adicional associado à ocorrência de deslocamentos excessivos na condição não drenada, relacionado ao desenvolvimento de plastificação contínua na fundação (*contiguous plasticity*). A deformação mobilizada no reforço nesse estado é definida como deformação de compatibilidade, ε_a.

Assim, um procedimento de projeto eficiente e consistente deve considerar simultaneamente esses dois estados limite, combinando a força de tração requerida para a estabilidade global com a deformação mobilizada correspondente na ruptura (i.e., no estado limite último de máxima altura liquida de aterro). A deformação de compatibilidade constitui, portanto, um parâmetro chave para estimar a rigidez à tração mínima requerida do reforço. Essa abordagem, inicialmente introduzida por Rowe & Soderman (1985) e posteriormente complementada por Hinchberger & Rowe (2003), é consistente com recomendações normativas no Brasil, como a DNIT 380/2022–PRO, que estabelece a utilização da deformação de compatibilidade para tal finalidade.

2.1 Características das análises

A Figura 1 apresenta a geometria adotada, representando um aterro rodoviário típico com altura h = 2,30 m, largura de crista b = 28,8 m e taludes 2*H*:1*V*, construído sobre uma fundação de argila mole com espessura

de 8,0 m, com resistência ao cisalhamento não drenada na superfície S_{u0} e gradiente ρ_c. Considera-se a existência de uma camada competente subjacente.

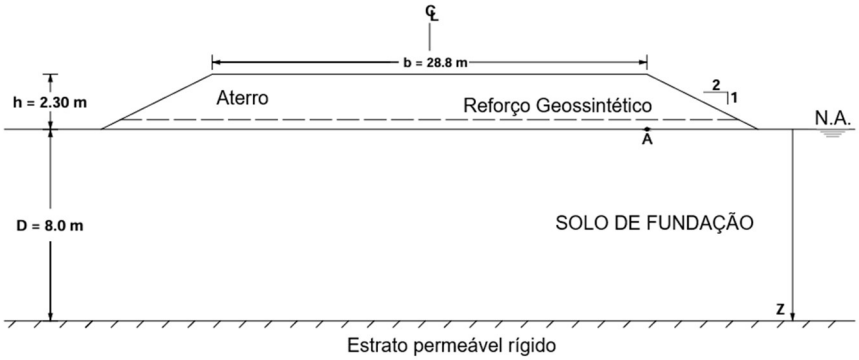


Figura 1. Geometria do aterro considerada e estratigrafia do solo de fundação.

A modelagem foi realizada no programa PLAXIS 8.6, em condição de deformação plana e pequenas deformações. Adotou-se malha não estruturada com elementos triangulares de 15 nós e refinamento global fino. O reforço geossintético foi modelado por elementos de barra com rigidez axial *J*, posicionado próximo à interface solo mole/aterro. A interface aterro/reforço foi considerada elastoplástica (*Mohr-Coulomb*), com R_{inter} =1,0. A resistência na interface solo mole/aterro foi assumida igual à resistência não drenada do solo de fundação na superfície. O estado inicial geostático foi definido pelo procedimento K'_0, com nível freático na superfície. A construção foi simulada por ativação gradual de camadas do aterro, assumindo construção instantânea (sem dissipação de pressões neutras).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos considerados para argila mole e material de aterro.

Solo de fundação	
Resistência ao cisalhamento não drenado na superfície (S_{u0}):	5,0 kPa
Taxa de aumento da resistência não drenada com a profundidade (ρ_c):	1,50 kPa/m
Ângulo de atrito total (φ):	0°
Peso específico saturado (γ_{sat}):	15 kN/m³
Coeficiente de Poisson não drenado (v_u):	0,48
Módulo de Young não drenado (E_u):	E_u/S_u = 125
Material do aterro	
Ângulo de atrito interno efetivo (φ'):	37°
Coesão efetiva (c'):	1,0 kPa
Peso específico compactado (γ_{bulk}):	20 kN/m³
Coeficiente de Poisson para descarregamento-recarregamento (v_{ur}):	0,20
Módulo de rigidez secante triaxial (E_{50}):	25 MPa
Módulo de rigidez para descarregamento-recarregamento (E_{ur}):	75 MPa
Módulo edométrico (E_{oed}):	25 MPa
Expoente de dependência da rigidez com o nível de tensão (m):	0,50

O comportamento do solo mole de fundação foi modelado pelo critério de *Mohr-Coulomb*, assumindo resposta linear-elástica perfeitamente plástica, com superfície de escoamento fixa e plasticidade não associada. Assim, não foram considerados efeitos como anisotropia, ruptura progressiva ou comportamentos constitutivos mais avançados. Para a análise de curto prazo, adotou-se condição não drenada em termos de tensões totais, na qual não se modela a geração de pressões neutras em excesso. Dessa forma, foi necessário utilizar um conjunto de parâmetros não drenados para o solo mole, conforme apresentado na primeira parte da Tabela 1. Esse conjunto de parâmetros foi selecionado com base em valores típicos reportados na literatura para a Formação Sedimentar Flúvio-Lagunar Holocênica (SFL) da Baixada Santista (Massad, 2009; Hinchberger & Rowe, 2003). Foi adotada a relação E_u/S_u = 125, conforme Duncan & Buchignani (1976). O material do aterro foi modelado como solo granular friccional utilizando o modelo *Hardening Soil*.

Para o caso analisado, foram adotados f_c= 1,3 para o S_u do solo de fundação, f_φ = 1,2 para ângulo de atrito do material de aterro e f_γ =1,1 para o peso unitário do material de aterro, conforme Hinchberger & Rowe (2003). A aplicação desses fatores parciais conduz a uma condição de projeto aproximadamente equivalente a um fator de segurança em condições globais da ordem de 1,30 (quando comparada a uma análise convencional sem fatores parciais).

2.2 Determinação do módulo J_{min}

Seguindo a metodologia proposta por Hinchberger & Rowe (2003), foi possível estimar, a partir das análises numéricas desenvolvidas para o caso em estudo, a deformação de compatibilidade admissível ε_a, obtendo-se um valor de ε_a = 3,44 %. Em contraste, o valor estimado com base no método de Futai (2010) foi de ε_a = 2,2 %, enquanto a estimativa aproximada por meio do ábaco de Hinchberger & Rowe (2003) resultou em ε_a = 3,9 %, evidenciando uma calibração preliminar consistente do modelo adotado.

Por meio de uma análise convencional de equilíbrio limite (círculo de deslizamento, método de Bishop modificado), a força de reforço requerida para uma altura de aterro de 2,30 m foi estimada em T_{ro} = 50 kN/m, correspondente a um fator de segurança global igual a 1,0, considerando as propriedades do solo modificadas pelos fatores parciais aplicados. Assim, o módulo mínimo de rigidez para o caso em estudo foi determinado como J_{min} = 1.672 kN/m, calculado a partir de α_r = 1,15, T_{ro} = 50 kN/m e ε_a = 3,44%. Maiores detalhes sobre o procedimento podem ser encontrados em Ruiz et al. (2013).

2.3 Influência do módulo de rigidez do reforço na estabilidade

Considerando uma deformação arbitrária para o reforço de ε_n = 10 % e a força requerida T_{ro} previamente calculada, obtém-se um módulo de rigidez arbitrário J = 500 kN/m. Quando esse valor é adotado como parâmetro de entrada nas análises numéricas do sistema em estudo, verifica-se que, mesmo considerando uma força de tração adequada (obtida por equilíbrio limite), a segurança frente à ruptura global não é garantida. Isso se evidencia em termos da altura máxima de aterro aplicada nesse Estado Limite Último, da força de tração efetivamente mobilizada na ruptura e do fator de segurança global calculado a partir dessa força mobilizada, sendo a estabilidade adequadamente atendida apenas para o caso em que se adota J_{min}.

Dessa forma, recomenda-se, como prática de projeto, que o geossintético atenda a um módulo de rigidez secante mínimo na faixa de deformação 0–ε_a e apresente deformação nominal igual ou superior à deformação de compatibilidade ($\varepsilon \geq \varepsilon_a$). Conforme Ruiz (2013) e outros autores, a adoção de módulos de rigidez superiores a J_{min} é recomendada, pois, além de garantir a estabilidade, melhora o comportamento deformacional global, reduzindo deslocamentos horizontais no solo de fundação e as deformações no reforço.

2.4 Estimativa da resistência nominal para diferentes tipos de reforço

Para fins de seleção do tipo de reforço necessário para garantir a estabilidade não drenada da estrutura, foi realizada uma estimativa da resistência à tração nominal mínima que seria requerida a partir do valor de J_{min} previamente calculado, considerando um valor de deformação característica (ou última) de 5% para materiais de PVA (álcool polivinílico) e de 8% para materiais de Poliéster. Para fins comparativos, adotou-se a hipótese de que, no cenário de ruptura estudado, a resistência requerida no reforço para o mecanismo de estabilidade global corresponderia diretamente à força de tração calculada para a determinação do J_{min}, assumida como equivalente a 100% da Resistência à Tração Última (*UTS*) neste caso. Nessas condições, verifica-se que, para atender ao critério de projeto associado ao módulo mínimo de rigidez, o reforço em PVA deveria apresentar uma resistência nominal de, no mínimo, aproximadamente 1,45 vezes o valor da resistência calculada para a combinação dos estados limite, T_{ro} (global e de compatibilidade), enquanto, para o Poliéster, esse fator é da ordem de 2,33.

Os valores obtidos são uma estimativa preliminar e não consideram a aplicação de fatores de redução específicos dos materiais, como fluência por exemplo. No entanto, a comparação realizada tem como objetivo evidenciar a necessidade de compatibilizar o requisito de projeto principal (atendimento do J_{min}) com a disponibilidade de produtos comerciais com diferentes características mecânicas (tensão-deformação).

3 ANÁLISE NA CONDIÇÃO OPERACIONAL DE LONGO PRAZO (ESTADO LIMITE DE SERVIÇO - SLS)

Como já mencionado, o projeto de aterros reforçados com geossintéticos deve incluir a avaliação do estado de serviço, com limites rigorosos de deformação em obras críticas (FHWA HI-95-038, 1995). Nesse contexto, reconhece-se que a natureza dependente do tempo dos solos e dos geossintéticos influencia significativamente o comportamento no longo prazo (Taechakumthorn, 2011). Diversos estudos experimentais e numéricos investigaram solos viscosos e aterros sobre fundações moles (Bjerrum, 1972; Graham et al., 1983; Leroueil & Marques, 1996; Taechakumthorn, 2011). Contudo, ainda são limitados os trabalhos que integram os efeitos viscosos do solo e do reforço, podendo ocorrer deformações excessivas ou até ruptura após a construção (Bassett & Yeo, 1988; Rowe et al., 1995). A seguir são abordados esses aspectos na condição de serviço para o caso em estudo, com ênfase na mobilização de deformações no reforço.

3.1 Características das análises

Foi adotada a mesma configuração de modelagem anterior, incluindo malha, refinamento, condições de contorno, estado inicial e sequência construtiva. A construção foi simulada com comportamento parcialmente drenado do solo mole, incorporando o efeito do tempo via taxa de execução e permitindo a dissipação parcial das pressões neutras em excesso. O adensamento primário pós-construção também foi considerado, viabilizando a análise da resposta no curto e longo prazo por meio do modelo acoplado de Biot (Biot, 1941), disponível no software utilizado. Para simular diferentes taxas de construção e a geração/dissipação de pressões neutras, foram realizadas análises não drenadas em termos de tensões efetivas. Os parâmetros drenados do solo e a condutividade hidráulica foram adotados com base em valores da literatura (Rowe & Taechakumthorn, 2008; Massad, 2009). Os parâmetros geotécnicos adicionais adotados podem ser encontrados em Ruiz (2013). Para representar o Estado Limite de Serviço – SLS nas simulações numéricas, todos os fatores parciais aplicáveis foram considerados neste caso iguais à unidade (f_c, f_ϕ e $f_\gamma = 1{,}0$), de acordo com as recomendações descritas na BS 8006 (2005).

3.2 Influência do processo de adensamento primário

O efeito da taxa de construção e do correspondente grau de adensamento parcial durante a execução do aterro sobre a deformação máxima mobilizada no reforço no fim da construção (EOC - $h = 2{,}30$ m) foi avaliado para três cenários: construção instantânea (sem adensamento parcial), 1 m/semana e 0,25 m/semana, adotando-se como valor de entrada $J = J_{min} = 1.672$kN/m. Como resultado, obtiveram-se $\varepsilon_{r0ins} = 0{,}95\%$, $\varepsilon_{r0v1} = 0{,}98\%$ e $\varepsilon_{r0v2} = 1{,}01\%$, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, o adensamento tende a aumentar as deformações mobilizadas no reforço, ao mesmo tempo que o solo de fundação torna-se mais resistente com a dissipação de poro-pressões, reduzindo progressivamente a probabilidade de instabilidade do sistema.

Para isso, o adensamento primário foi simulado numericamente considerando um período operacional extenso de vários anos e adotando o módulo do reforço como $J = J_{min}$, até atingir um grau médio de adensamento de aproximadamente 90%. Foi considerada uma drenagem pela superfície e pela base do aterro (distância máxima de 4,0 m). O coeficiente vertical de adensamento foi calculado automaticamente pelo software com base nos parâmetros de entrada adotados.

A Figura 2 mostra a evolução da deformação máxima mobilizada no reforço ao longo desse processo de adensamento. Observa-se que, após a dissipação das pressões neutras ($\bar{U} \approx 90\%$), a deformação mobilizada aumentou de 0,95% (construção instantânea) ao final da construção, para 1,46% após 15 anos de adensamento (~51 %). Os resultados indicam que a mobilização adicional de deformações devido ao adensamento primário é mais significativa nas fases iniciais após a construção, quando a dissipação de pressões neutras é mais intensa. Com o avanço do ganho de resistência não drenada ao longo do adensamento, as deformações tendem à estabilização, desconsiderando efeitos adicionais, como a fluência do reforço por exemplo.

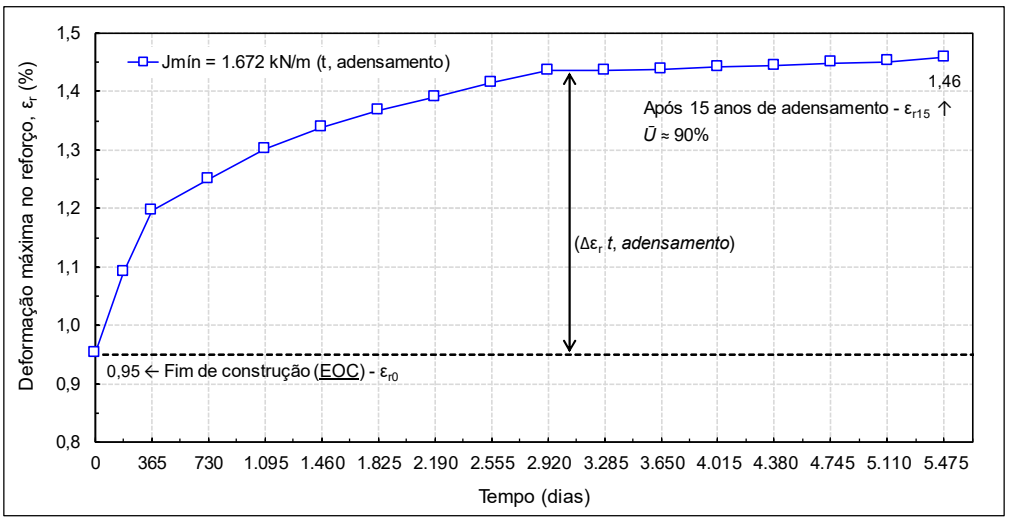


Figura 2. Deformações mobilizadas no reforço durante o adensamento primário.

3.3 Efeito da fluência do reforço

Com base na análise de duas curvas isócronas para reforços de Poliéster (British Board of Agrément – BBA, 2008) e de Polietileno de Alta Densidade - HDPE, tomada de Dobie (2001), foi possível estimar de

forma aproximada, a parcela de deformação mobilizada adicional por fluência (*creep*) que o reforço basal experimentaria de forma concomita ao adensamento e ao longo do período operacional do aterro (Figura 3). Através de um procedimento analítico de estimativa da variação do módulo de rigidez do reforço em função do tempo (a rigidez dependente do tempo *J(t)* diminui à medida que a deformação por *creep* se desenvolve sob carga constante, resultando em aumentos de deformação e possível redistribuição dos esforços de tração no sistema), e da consideração da porcentagem da resistência à tração nominal efetivamente mobilizada no final da construção (% de UTS para ε_{r0ins} = 0,95%), foi possível estimar a mobilização adicional de deformação para dois tipos de reforço, incluindo o período inicial de ação conjunta (soma de efeitos), e um estágio de longo prazo de até 120 anos de operação (com só a influência do *creep*). Os valores obtidos foram de 2,18% para o caso de um reforço de Poliéster (incremento de 0,72% em relação ao valor máximo mobilizado durante o adensamento), e de 5,97 % para o caso do HDPE (com variação de +4,51%). Os resultados indicam que, mesmo com a estabilidade global eventualmente atendida na condição ULS, efeitos dependentes do tempo podem levar à possível superação dos limites de serviço recomendados por normas internacionais (por exemplo, BS 8006). Ressalta-se que o *creep* do próprio solo mole (efeito viscoso adicional), não abordado neste estudo, tenderia a ampliar ainda mais a mobilização de deformações de tração no reforço.

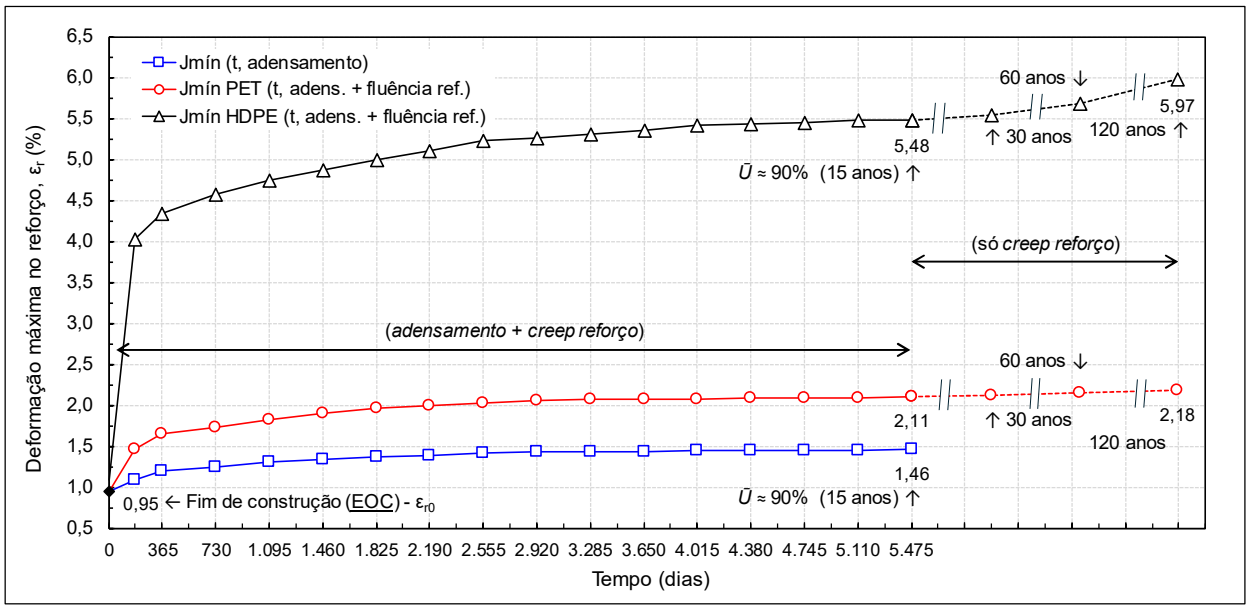


Figura 3. Deformações mobilizadas no reforço durante o adensamento e efeitos da fluência do reforço.

3.4 Estimativa do momento mais crítico para a definição das propriedades à tração do reforço

Mediante a utilização do método SANSHEP (Ladd & Foott, 1974), foi possível estimar o ganho de resistência não drenada no solo de fundação ao longo do processo de adensamento. Assim, considerando a evolução dos valores de S_u com o grau de adensamento desenvolvido durante o primeiro ano de operação do aterro, estimaram-se, por meio de análises convencionais de estabilidade por equilíbrio limite, as forças requeridas no reforço para diferentes instantes tanto na condição ULS como SLS. As análises foram conduzidas de modo a atender aos critérios de segurança para cada estado limite correspondente, adotando fatores de redução distintos da unidade para o Estado Limite Último e iguais a 1.0 para o Estado Limite de Serviço. A Figura 4 apresenta, de forma sintética, os resultados obtidos.

Considerando fatores de redução por fluência obtidos de curvas isócronas selecionada para o reforço de Poliéster no primeiro ano de operação, foi possível estimar a resistência máxima (ou nominal) no reforço para diferentes instantes no cenário ULS ($T_{max} = T_{proj}$ x FR_{creept}). Os resultados mostram que o instante mais crítico (i.e., tempo em que $T_{max(t)}$ atinge o valor máximo) necessário para a definição das propriedades do reforço no estado ULS não coincide necessariamente com o final da construção, conforme já observado por Silva (2003), e como evidenciado pelos resultados de T_{max} calculados (Curva verde na Figura 4).

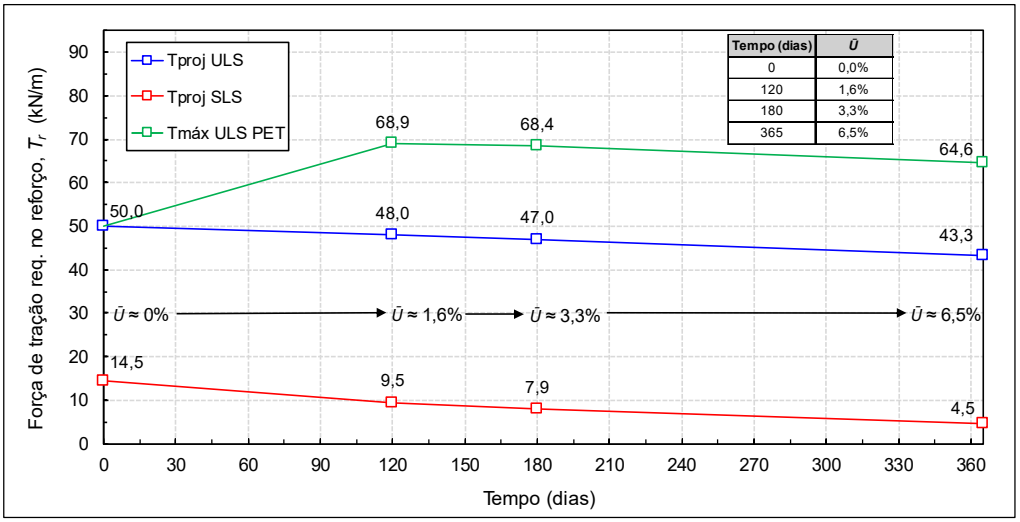


Figura 4. Resultados das análises de estabilidade por E.L considerando os efeitos do ganho de resistência S_u.

Tabela 2. Resumo de resultados da análise integrada (Combinação EL, MEF e Previsões analíticas).

Ano 1				
Tempo (dias)	0 (EOC)	120	180	365
Grau de adensamento médio ($\bar{U}$) - %	0,0	1,6	3,3	6,5
Estado Limite Último - ULS				
Força de tração requerida no reforço, T_r (kN/m)	50,0	48,0	47,0	43,3
Fator de segurança global aproximado	~1,30			
Deformação de compatibilidade	ε_a = 3,44 %			
Estado Limite de Serviço - SLS				
Força de tração requerida no reforço, T_r (kN/m)	14,5	9,5	7,9	4,5
Fator de segurança global aproximado	~1,00			
Deformação máxima mobilizada no reforço no fim da construção	ε_{r0ins} = 0,95 %	-		
Longo prazo				
Deformação mobilizada no reforço por adensamento (15 anos)	$\varepsilon_{r15anos}$ = 1,46 % para $\bar{U}$ =90% | $\Delta\varepsilon_1$ = +0,51%			
Deformação mobilizada adicional por *Creep* PET 120 anos	$\varepsilon_{r120anosPET}$ = 2,18 % | $\Delta\varepsilon_{2PET}$ = +0,72%			
Deformação mobilizada adicional por *Creep* HPDE 120 anos	$\varepsilon_{r120anosHPDE}$ = 5,97 % | $\Delta\varepsilon_{2HPDE}$ = +4,51%			

Ao longo do tempo, a solicitação no reforço necessária para manter o mesmo nível de estabilidade (i.e., FS) diminui devido à consolidação do solo, enquanto a capacidade do geossintético também se reduz em função do *creep*. Assim, o instante crítico para a determinação dessa propriedade corresponderia ao ponto em que a razão entre demanda (solicitação) e capacidade (reforço) atinge seu valor máximo, podendo ser determinado *i*) graficamente de forma aproximada para vários pontos em análise, *ii*) escolhendo um material com resistência disponível ou admissível sempre superior a todos os valores de T_{proj} calculados ($T_{dis} \geq T_{proj}$), ou *iii*) por meio de uma abordagem analítica baseada na combinação dessas duas relações (demanda e capacidade). Dessa forma, e como contribuição do presente estudo, sugere-se estimar o referido instante crítico considerando tanto a curva da resistência de projeto requerida do reforço ($T_{proj}(t)$) (ao longo do período analisado) quanto a curva de fluência específica ($FR_{creep}(t)$) como funções contínuas do tempo, determinando o instante t em que a relação entre essas duas funções é máxima ($dT_{max}/d_t = 0$). Para o caso em estudo, o instante crítico durante o Ano 1 ocorre aproximadamente $t_{crit} \approx 120$ dias, no início do período de consolidação, quando a redução da solicitação no reforço ainda é pequena, enquanto os efeitos do *creep* no reforço já se tornam significativos.

4 CONCLUSÕES

Foram examinados diversos aspectos técnicos relacionados à estabilidade não drenada e ao comportamento de longo prazo de aterros reforçados sobre solos moles, avaliando os efeitos da adequada determinação do módulo de rigidez na ruptura, as implicações da adoção de deformações de compatibilidade arbitrárias e os critérios para definição das propriedades do reforço para diferentes materiais. No Estado de Serviço, foram analisados os efeitos combinados do adensamento e da fluência na estabilidade ao longo do tempo, evidenciando que, em termos práticos, a definição do reforço necessário deveria incorporar uma abordagem mais abrangente, que considere o instante crítico e as interações entre esses fenômenos, mesmo que examinadas de forma aproximada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bassett, R. H.; Yeo, K. C. (1988). The behaviour of a reinforced trial embankment on soft shallow foundations. In: *Proceedings of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japão.

Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155–164.

Bjerrum, L. (1972). Embankments on soft ground. In: *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University.

British Board of Agrément – BBA (2008). *Agrément Certificate No. 01/R125*. United Kingdom.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2022). *DNIT 380/2022 – PRO: Utilização de geossintéticos em aterros sobre solos moles para obras viárias – Procedimento*. Brasília.

Dobie, M. J. D. (2001). Testing and specification of HDPE and polypropylene geogrids for reinforced soil structures. In: *Proceedings of the 1st Nationwide Seminar on Geosynthetics Testing Technology*, Shanghai, China.

Duncan, J. M.; Buchignani, A. L. (1976). An engineering manual for settlement studies. Geotechnical Engineering Report, University of California, Berkeley, 94 p., USA.

Futai, M. (2010). *Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles*. Pós-doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

Graham, J.; Crooks, J. H. A.; Bell, A. L. (1983). Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays. *Geotechnique*, 33(3), 327–340.

Hinchberger, S. D.; Rowe, R. K. (2003). Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: predicting reinforcement strains at failure. *International Journal of Geotextiles and Geomembranes*, No. 21.

Humphrey, D. N.; Holtz, R. D. (1987). Reinforced embankments: a review of case histories. *Geotextiles and Geomembranes*, 6(4), 129–144.

Jewell, R. A. (1988). The mechanics of reinforced embankments on soft soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 7, 237–273.

Jewell, R. A. (1996). *Soil reinforcement with geotextiles*. CIRIA Special Publication 123.

Ladd, C. C. (1991). 22nd Karl Terzaghi Lecture: Stability evaluation during staged construction. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 117(4), 540–615.

Ladd, C. C.; Foott, R. (1974). New design procedure for stability of soft clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 100(GT7), 763–786.

Leroueil, S.; Marques, M. E. S. (1996). Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering. In: *Proceedings of the ASCE National Convention*, Geotechnical Special Publication No. 61, Washington DC, USA.

Leroueil, S.; Rowe, R. K. (2001). Embankments over soft soil and peat. In: *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook* (ed. R. K. Rowe), pp. 463–500. Norwell, MA: Kluwer Academic.

Massad, F. (2009). *Solos marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Mashhour, M. M.; Myles, B. (1981). Strain behaviour of soil–fabric model embankments. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 3, pp. 739–744, Stockholm.

Michalowski, R. L. (1992). Bearing capacity of nonhomogeneous cohesive soils under embankments. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 118(9), 1098–1118.

Rowe, R. K.; Gnanendran, C. T.; Landva, A. O.; Valsangkar, A. J. (1995). Construction and performance of a full-scale geotextile reinforced test embankment, Sackville, New Brunswick. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), 512–534.

Rowe, R. K.; Li, A. L. (2005). Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations. *Geosynthetics International*, 12(1), 50–85.

Rowe, R. K.; Mylleville, B. L. J. (1990). Implications of adopting an allowable geosynthetic strain in estimating stability. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, pp. 131–136, The Hague, Netherlands.

Rowe, R. K.; Soderman, K. L. (1985). An approximate method for estimating the stability of geotextile reinforced embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(3), 392–398.

Rowe, R. K.; Soderman, K. L. (1987). Stabilization of very soft soils using high strength geosynthetics: the role of finite element analyses. *International Journal of Geotextiles and Geomembranes*, No. 6.

Rowe, R. K.; Taechakumthorn, C. (2008). Combined effect of PVDs and reinforcement on embankments over rate-sensitive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), 239–249.

Ruiz, E. F.B. (2013). *Geosynthetic-reinforced embankments on soft soils: numerical analysis of the strain mobilization in the reinforcement at failure, service condition and staged construction*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

Ruiz, E.F.B, Hemsi, P.S., Vidal, D.M. (2013). *Numerical Analysis of Reinforcement Strains at Failure for Reinforced Embankments over Soft Soils*. Soils and Rocks, 36(3):299-307.

Silva, A. E. F. (2003). *Análise de estabilidade à ruptura global de aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos considerando os efeitos do tempo*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

Taechakumthorn, C. (2011). *Effects of reinforcement and soil viscosity on the behaviour of embankments over soft soil*. Doctoral thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/22

Avaliação da Interação Solo-Reforço em Ensaios de Arrancamento Cíclico de Geogrelhas em Base de Pavimento Asfáltico

Marcus Vinicius Weber de Campos
Especialista Geotecnia CCR/ Motiva, Jundiaí, Brasil, e-mail: m.v.campos@hotmail.com

Orencio Monje Vilar
Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Brasil. e-mail: orencio@sc.usp.br

RESUMO: Geossintéticos aplicados para reforço de base de pavimentos ou taludes reforçados devem resistir a repetitivas cargas de tráfego, sob condições mais rigorosas do que as observadas em estruturas estáticas. Neste estudo foram avaliadas as condições de ancoragem de uma geogrelha de reforço por meio de ensaios de arrancamento, onde foram medidos os deslocamentos associados ao carregamento repetitivo, sobre diferentes confinantes. A caixa de ensaios foi instrumentada com células de tensão total, transdutores de deslocamento e LVDTs, para realizar ensaios de arrancamento sobre diferentes níveis de carga de ciclagem e a amostra utilizou fios inextensíveis para avaliar as deformações ao longo do reforço. Os ensaios foram realizados com o reforço ancorado em uma BGS (Brita Graduada Simples) faixa “C”, comumente usada em bases de rodovias. Os resultados mostram que a ciclagem danificou a amostra antes do final previsto do ensaio. Os módulos de cisalhamento de interface foram diferentes dos relatados na literatura, os deslocamentos não se estabilizaram e o comportamento foi dependente da tensão de confinamento e tensão de cisalhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço, Geogrelha, Pavimento, Interação, Arrancamento Cíclico.

ABSTRACT: Geosynthetics used for pavement base reinforcement or reinforced slopes must withstand repetitive traffic loads under conditions more rigorous than those observed in static structures. This study evaluated the anchorage conditions of a reinforcement geogrid through pull-out tests, measuring displacements associated with repetitive loading under various confining pressures. The test box was instrumented with total stress cells, displacement transducers, and LVDTs to conduct pull-out tests at different cyclic load levels, while the sample utilized inextensible wires to assess deformations along the reinforcement. The tests were performed with the reinforcement anchored in a "Grade C" graded crushed stone (BGS)—a material commonly used in highway base layers. The results indicate that cyclic loading damaged the sample before the scheduled end of the test. Interface shear moduli differed from those reported in the literature, displacements did not stabilize, and the behavior was dependent on both confining stress and shear stress.

KEYWORDS: Reinforcement, Geogrid, Pavement, Interaction, Cyclic Pullout

1 INTRODUÇÃO

Vias trafegáveis são dimensionadas a partir de parâmetros como resistência, deformabilidade e o acúmulo das deformabilidades (resiliência) dos solos de fundação em suas diversas camadas, gerando assim como resposta uma espessura mínima necessária de capa (para vias pavimentadas), de base, sub-base e subleito, por vezes em diversas camadas diferentes a fim de dissipar as tensões provenientes dos veículos. São considerados ainda fatores como o volume de tráfego, representado pela quantidade de passadas do veículo padrão e o peso dos veículos para os quais a via é projetada, condições climatológicas entre outros.

Comumente a base e/ou sub-base de vias utiliza materiais granulares como Brita Graduada Simples (BGS), as vezes em diversas faixas e camadas diferentes devido à sua maior capacidade de dissipação de tensões do que solos comuns, buscando assim dissipar e diminuir o nível de tensões em uma espessura menor possível (por fins econômicos e ambientais).

O advento tecnológico dos geossintéticos tem atuado nesta linha de reforço de pavimentos de forma a reduzir ainda mais a espessura destas camadas de BGS, mantendo ou diminuindo as tensões que chegam às

camadas inferiores e assim economizando recurso natural cada vez mais escasso e caro, de maneira sustentável e ambientalmente correta.

Com os reforços de geogrelhas inseridos no meio granular vêm a necessidade de se conhecer o comportamento e a interação entre estes materiais. Comumente esta interação é obtida através de ensaios de arrancamento monotônico, que reflete a interação no arrancamento contínuo e mede uma movimentação relativa entre os materiais de maneira constante. Tal ensaio pode não representar a realidade pois em campo o que ocorre pontualmente em cada parte do reforço é um ciclo de breve carregamento e descarregamento, devido à componente elástica inerente a cada material, que pode ser melhor representado por meio de ensaios de arrancamento cíclico. Sob essa ótica foram criados os ensaios de arrancamento cíclico (Perkins et al, 2004; Cuelho & Perkins, 2005) onde eram medidos os ciclos de carregamentos e suas respectivas deformações. As deformações são compostas por uma parcela plástica (permanente) e uma parcela elástica (não permanente), que podem ser representadas através do módulo de cisalhamento de interface G_i. Tal parâmetro é base para cálculos empírico-macanísticos em estruturas de pavimentos reforçados (Perkins et al, 2004), e consta em referencias normativas nacionais (DNIT-ME 134 (2010)).

Esta presente pesquisa tem a finalidade de avaliar a interação de um sistema de reforço com geogrelha de poliéster embutido em um solo granular (BGS faixa C do DER) utilizando as metodologias existentes na literatura tanto em relação ao arrancamento monotônico quanto cíclico e assim mensurar o parâmetro G_i, contribuindo com informações sobre diferentes tipos de solos e complementando as primeiras informações relatadas por Campos & Vilar (2015) e posteriormente Campos & Vilar (2016), onde foram apresentados os comportamentos de reforços em solos arenosos e Silto-argilosos, respectivamente, com seus respectivos módulos G_i, resistências, deformações entre outros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caixa de ensaios

O dispositivo utilizado para a realização dos ensaios denominado caixa de ensaios era dotado de um sistema de carregamento de arrancamento eletro-hidráulico programável (Figura 1), situado a meia altura e longitudinalmente à caixa de ensaios, que continha dimensões internas de 1,70m de comprimento, por 0,48m de altura e 0,70m de largura, de modo que o reforço de 0,510m de comprimento por 0,376m de largura não sofresse influência das paredes de entorno durante os ensaios.

A caixa de ensaios apresenta ainda um sistema de acréscimo de tensão confinante por meio de uma bolsa alimentada por ar comprimido, alcançando a tensão máxima acima de 100kPa.

Para controle da influência das paredes e da manga por onde era solicitada a amostra foram utilizadas células de tensão total dispostas próximas e ao longo da amostra na horizontal e na vertical e nomeadas “H” e “V” respectivamente.

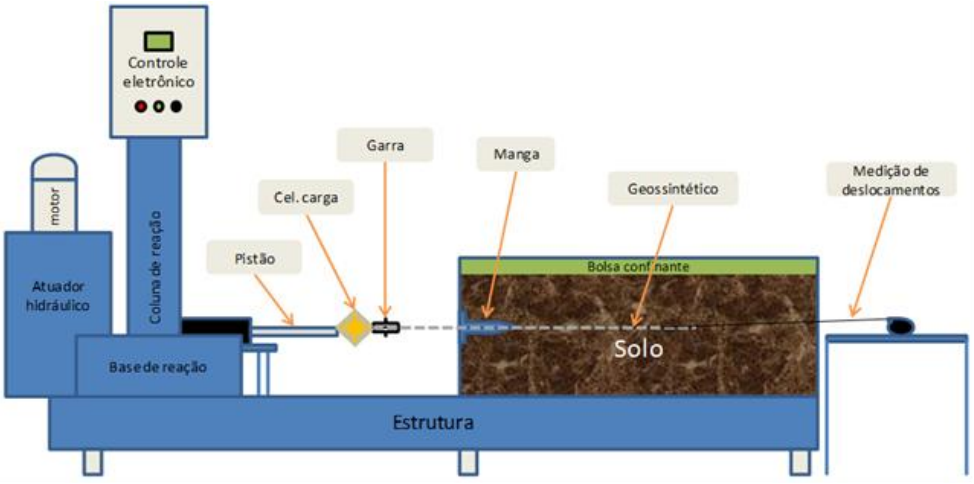


Figura 1. Esquema do equipamento de ensaios de arrancamento monotônico e cíclico da EESC-USP. (Campos & Vilar 2016).

2.2 Geogrelha de reforço

O material geossintético de reforço utilizado foi uma geogrelha de poliéster (PET) com resistência de 40kN/m por 30kN/m no sentido longitudinal e transversal respectivamente, comumente utilizada como reforço de base de vias, entre outros usos de solo reforçado, e também utilizada em Campos & Vilar (2015) e em Campos & Vilar (2016). Este reforço apresentava abertura de 51% que permite um imbricamento eficiente entre as camadas adjacentes ao reforço.

A geogrelha era instrumentada, em cada ensaio, com fios inextensíveis fixados nos filamentos de cada elemento. Este sistema era conduzido para fora da caixa de ensaios, no sentido oposto ao do arrancamento (parte traseira) e conectado a transdutores de deslocamentos com precisão de 0,001 mm, nomeados conforme a Figura 2 a seguir.

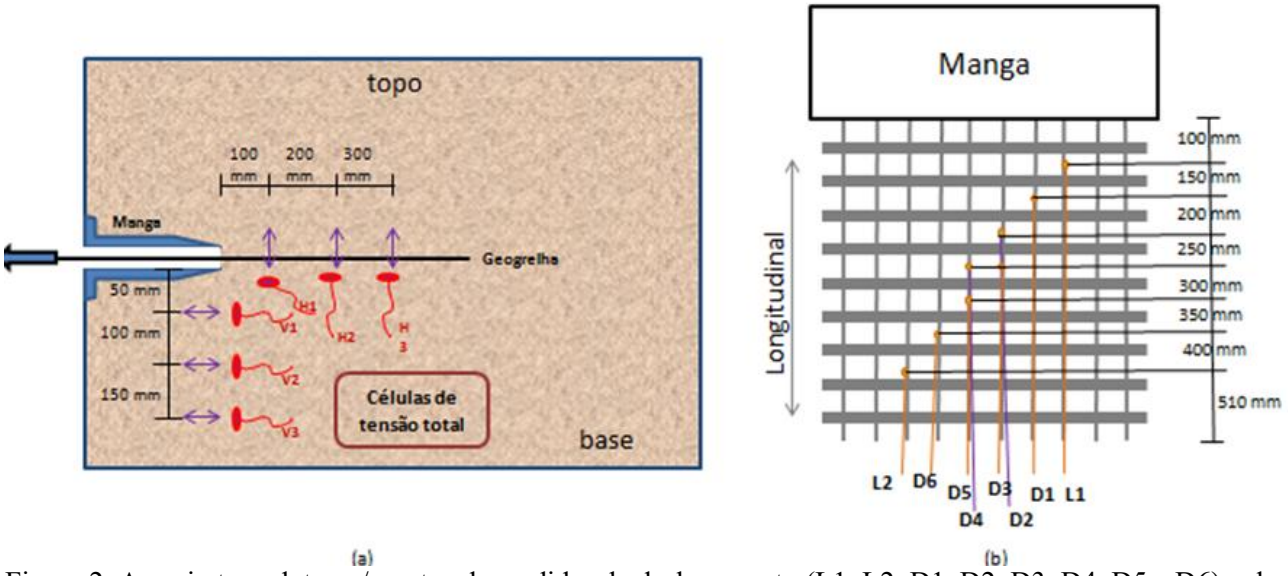


Figura 2. Arranjo transdutores/ pontos de medidas de deslocamento (L1, L2, D1, D2, D3, D4, D5 e D6) e das células de tensão total (V1, V2, V3, H1, H2 e H3), (fonte: Campos & Vilar 2016).

2.3 Solo granular

O solo granular adotado foi uma BGS faixa C segundo classificações do DER, também muito utilizado para fundação de vias devido ao seu alto nível de dissipação de tensões e estabilidade física e química.

A composição deste solo foi "montada" a partir da combinação de três materiais com granulometrias diferentes, sendo pedra 1", pedrisco e pó de pedra, que foram combinados em suas devidas porcentagens, gerando um novo material (enquadrado na faixa característica da gradação C das normas DER ET-DE-P00/008 (2005). A compacidade relativa obtida nos ensaios foi de 94% e a umidade do solo era de 1%.

2.4 Ensaio de arrancamento monotônico

O ensaio de arrancamento foi baseado na norma ASTM D 6706-01 e era o ensaio base da sequência, iniciando-se com tensão confinante de 25, passando a 40 no próximo ensaio e por último 55kPa, que são tensões próximas às encontradas à profundidade da base de vias segundo normas DNER ME 131 (1994) e DNIT ME 134 (2010). O reforço era arrancado a uma velocidade constante de 3,6mm/min.

A realização desta série de ensaios gerava uma envoltória de arrancamento, onde eram combinadas a força de arrancamento e a deformação, cujos respectivos pontos máximos geravam uma reta (envoltória de arrancamento).

2.5 Ensaio de arrancamento cíclico

A partir do momento que se têm a envoltória de arrancamento era montado novo ensaio com as mesmas configurações de montagem do corpo de prova anteriores (arrancamento monotônico), alterando-se a forma de arrancamento agora de acordo com a norma ASTM D 7499-09, que pede a aplicação breve de carregamento e relaxamento à uma frequência de 1Hz, especificando ainda o número de ciclos e sequências de ciclagem. O início do teste se dava com a aplicação de 1000 ciclos denominados condicionamento e após este deveriam ser aplicados, para cada nível de ensaio, 300 ciclos. Na série pesquisada foram utilizadas tensões de arrancamento cíclicas da ordem de 20, 40 e 60% da resistência máxima ao arrancamento para cada tensão confinante, e as tensões confinantes foram as mesmas utilizadas nos ensaios de arrancamento (25, 40 e 55kPa).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Arrancamento monotônico

O arrancamento monotônico realizado na BGS gerou curvas de força versus deslocamento, que apesar da variação da tensão confinante não apresentaram variação da resistência máxima conforme era aumentada a tensão confinante, mostrando comportamento diferente do esperado, ilustrado na Figura 3 a seguir.

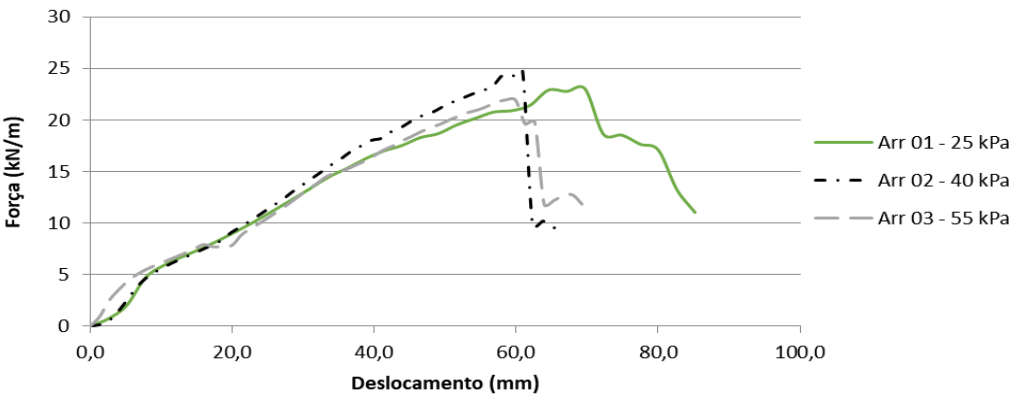


Figura 3. Curvas força de arrancamento versus deslocamento da garra em brita.

Devido à incoerência dos valores obtidos, a envoltória de arrancamento considerada foi uma reta horizontal no valor médio das forças máximas de arrancamento obtidas.

Os ensaios de arrancamento geraram deslocamentos ao longo do reforço conforme era aumentada a carga de arrancamento, como pode ser observado na Figura 4 a seguir.

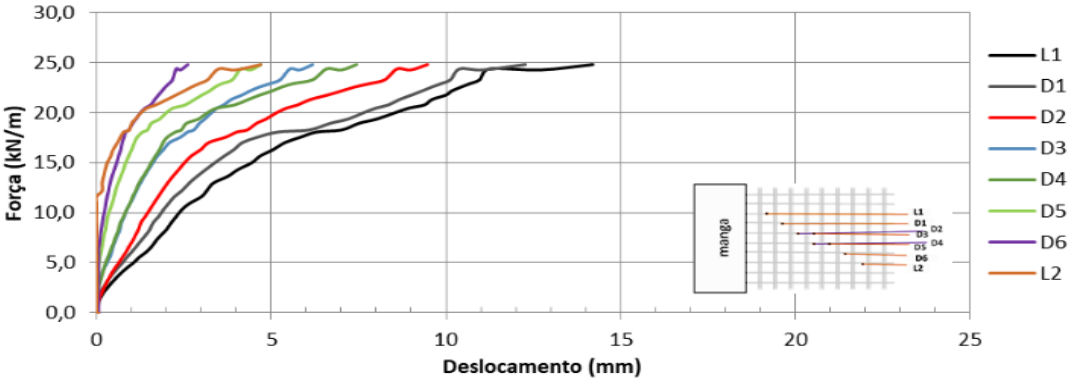


Figura 4. Deslocamento dos sensores ao longo da amostra durante arrancamento com tensão, σ, de 40 kPa em brita.

Pode-se perceber que os deslocamentos são maiores na parte próxima à garra e tendem a diminuir gradualmente com o afastamento em relação à fonte tensionadora, como era esperado, mostrando que o reforço

é solicitado em ao longo do seu comprimento ancorado conforme a carga é aumenta, solicitando um comprimento maior da geogrelha.

Este comportamento pode ser mais bem visualizado na Figura 5 a seguir.

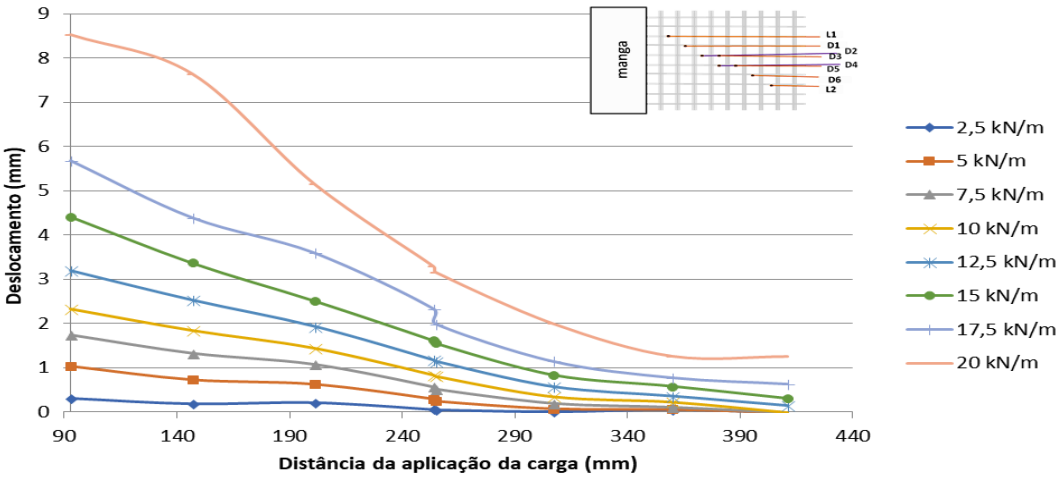


Figura 5. Solicitações ao longo do corpo de prova em ensaio de arrancamento com tensão, σ, de 40 kPa em brita..

A partir desta forma de análise pode-se notar que uma carga de 2,5kN/m mobiliza cerca de 250mm do reforço, o aumento da carga para 5,0kN/m solicita cerca de 310mm, para 10kN/m são solicitados 400mm e a partir deste carregamento o reforço é integralmente mobilizado e tem seus deslocamentos aumentados, sempre de maneira mais expressiva na parte próxima à garra de tração.

Em relação à variação de tensões registrada pelos sensores “H” e “V”, os valores registrados pelo sensor diretamente à frente da manga (H1) apontaram valores iniciais maiores na ordem de 4 vezes os valores registrados mais longe da manga, concluindo que a manga interfere na distribuição das tensões na caixa, principalmente próximo à geogrelha.

Ao início do arrancamento a célula horizontal mais próxima à frente do reforço (na entrada da manga) H1 sofre redução das tensões em cerca de 33%, devido ao desconfinamento e movimentação do material granular neste local. Quase em seguida ocorre uma redução das tensões da segunda e terceira células (H2 e H3) da ordem de 2%, mostrando que a perturbação do solo ocorre de modo muito mais pronunciado próximo à entrada da manga, em cerca de 100mm e já se estabiliza a 200mm de distância desta. Após aqueda de tensão confinante se inicia gradualmente o aumento desta, alcançando níveis cerca de 40% maiores do que os valores iniciais.

Já em relação às células verticais, o início do ensaio não se caracteriza pela diminuição das tensões, mas sim pelo aumento gradual destas, da ordem de 400% no sensor mais próximo à geogrelha (V1), e da ordem de 40% nos sensores V2 e V3, mostrando que ocorre perturbação acentuada em cerca de 50mm da geogrelha e a partir de 100mm a perturbação já se estabiliza.

3.2 Arrancamento cíclico

Os ensaios cíclicos foram baseados na envoltória (reta horizontal) considerada a partir dos ensaios de arrancamento, onde o reforço era solicitado ciclicamente com 20, 40 e 60% em relação à envoltória de arrancamento considerada.

Ao longo do tempo foram registrados os deslocamentos na amostra, e foram selecionados um sensor próximo à parte frontal (próxima à aplicação de carga) e outro próximo ao final do reforço (parte mais embutida), com a finalidade de representar os deslocamentos médios na parte frontal e traseira da amostra, que quando combinados com a carga aplicada, também ao longo do tempo geraram o gráfico da Figura 6 a seguir.

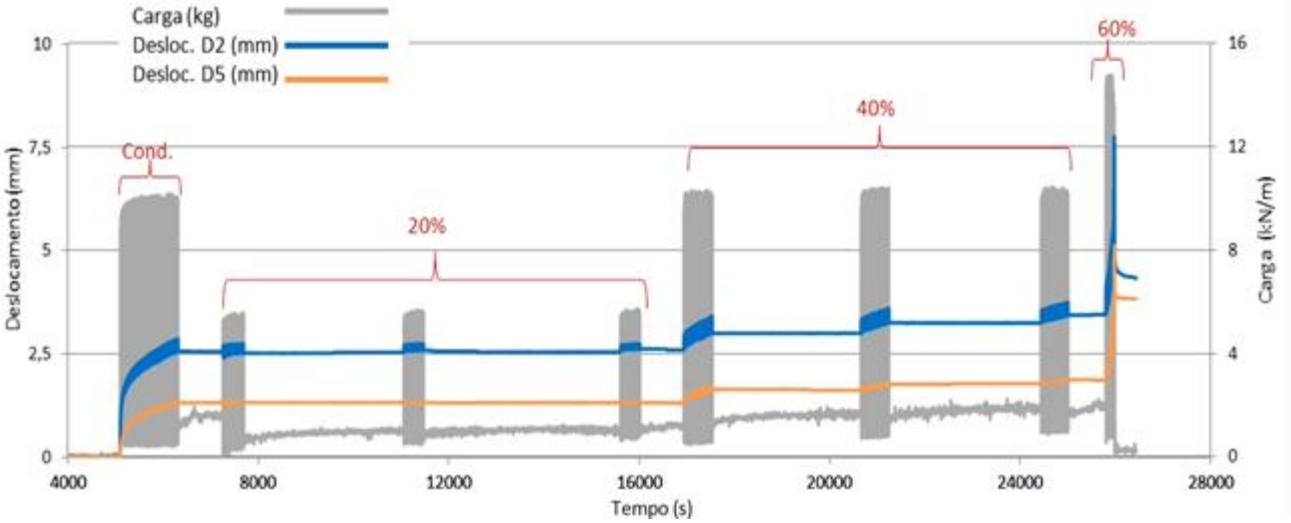


Figura 6. Níveis de carregamento e deslocamento da amostra em brita.

No gráfico pode-se notar que na ciclagem inicial de condicionamento (40% da carga máxima e 40kPa de confinante) ocorrem grande parte dos deslocamentos registrados na amostra.

Logo em seguida a confinante é diminuída e a carga vai a 20% da carga de arrancamento. Nesta série de ciclagem ocorre relativamente pouco acúmulo de deformações, e estes mostraram tendência de estabilização após cerca de 30% dos ciclos desta sequência. Com o aumento da carga para 40% da de arrancamento o acúmulo de deslocamentos se mostra aumentando constantemente, com um aumento relativamente menor a cada ciclagem, com comportamento semelhante à "continuidade" do gerado na etapa de condicionamento, já sem tendência à estabilização, mas sim a uma atenuação do acréscimo das deformações ao longo dos ciclos. Quando o carregamento sobe a 60% da carga máxima de arrancamento os deslocamentos registrados em ambos os sensores são extremamente pronunciados desde o início da ciclagem e logo o reforço se rompeu.

3.3 Módulo de resiliência

O parâmetro utilizado nos cálculos mecanísticos de fundações de vias é o módulo de resiliência de cisalhamento de interface (G_i). Este valor é obtido através do deslocamento elástico médio entre a parte frontal e traseira da amostra no decorrer do ciclo de carregamento e descarregamento, gerando sequências de curvas semielípticas como a apresentada na Figura 7 a seguir, referente aos 300 ciclos da ciclagem com 40% da Fmáx e Tensão de 40kPa.

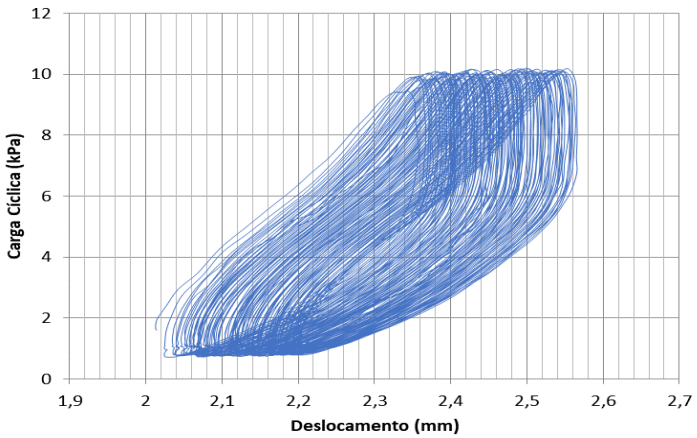


Figura 7. Ciclagem completa a 40 % da Fmáx e tensão, σ, de 40 kPa em brita.

Nesta sequência pode-se perceber que não há tendência de estabilização e o aumento de deslocamento médio acumulado ocorre a cada ciclagem.

Segundo a norma ASTM D 7499-09, deve-se utilizar os dez últimos ciclos de cada sequência para realizar os tratamentos e se obter o módulo de cisalhamento de interface. Tais tratamentos foram realizados e foram obtidos os módulos de G_i para cada tensão cisalhante, gerando a Figura 8 a seguir.

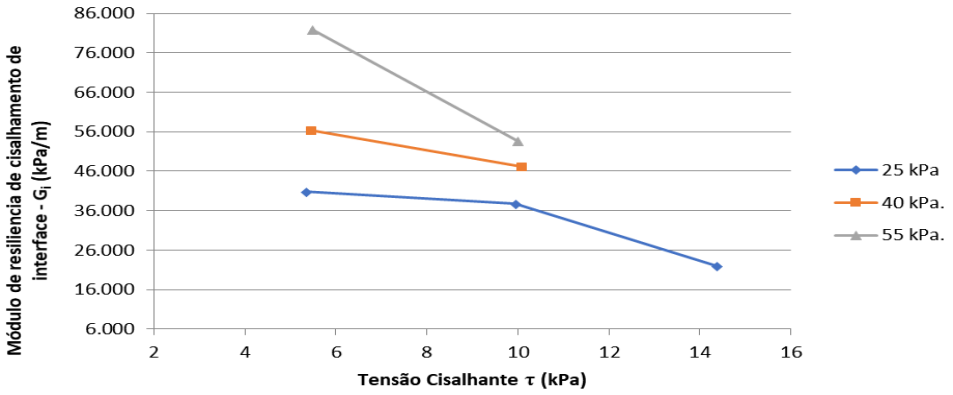


Figura 8. Modulo de resiliência (G_i) de interface versus tensão cisalhante (τ) na brita.

Os módulos obtidos nestes ensaios foram de cerca de metade da magnitude dos valores encontrados nas referências técnicas da área.

Acredita-se que tal fato ocorreu devido à maior deformabilidade do reforço utilizado nesta pesquisa, devido ao seu polímero base (PET) e aos maiores níveis de cargas aplicadas, possíveis graças ao maior comprimento embutido do reforço, gerando um comportamento distinto do esperado, fazendo com que o reforço se rompesse pouco após o início da quarta parte do ensaio.

3.4 Exumação do corpo de prova

Após a ruptura do corpo de prova foi realizado um desmonte cauteloso da caixa de ensaios até o nível da amostra com o intuito de verificar os motivos da ruptura desta.

Pôde-se observar que a ruptura foi causada pela abrasão dos elementos longitudinais (Figura 9 a seguir) com os grãos maiores de brita que ficaram próximos à entrada da manga (que existia para evitar que o reforço sofresse a influência da parede frontal da caixa) que era o local onde a amostra mais se deslocava durante a ciclagem devido à maior proximidade com a fonte de carregamento, conforme foi mostrado na Figura 5 anterior.

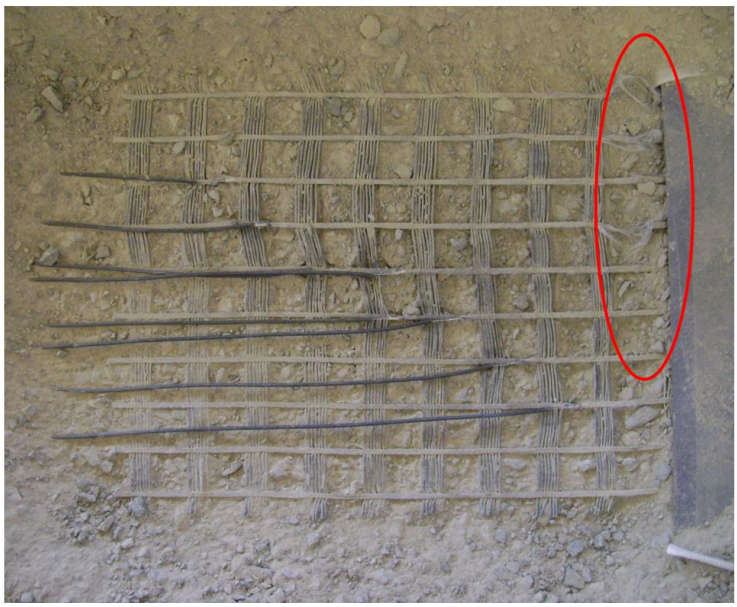


Figura 9. Reforço cisalhado em brita.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios de arrancamento não mostraram que o aumento da tensão confinante, nos níveis realizados nesta pesquisa resultaram em aumento da resistência ao arrancamento, porém, mostraram um comportamento de solicitação gradual do corpo de prova conforme era aumentado o carregamento, como esperado, e mostraram que as maiores perturbações no solo ocorrem próximo à abertura da manga, e mostraram que as dimensões da caixa são suficientes para não haver interferência das paredes da caixa nos ensaios.

Em relação aos ensaios cíclicos, os maiores níveis de deslocamentos foram obtidos na etapa de condicionamento, se mantiveram no carregamento de 20% e aumentaram constantemente durante o carregamento de 40%. Já no início da ciclagem de 60% o corpo de prova rompeu devido à abrasão com os grãos maiores com a "entrada" da geogrelha na caixa (manga), que era onde havia os maiores deslocamentos relativos entre o solo e o reforço.

Em relação ao valor dos módulos G_i obtidos, de cerca de metade do relatado na literatura, acredita-se que a diferença seja devido à deformabilidade maior do polímero base do reforço e devido ao maior comprimento do corpo de prova utilizado, que gerava uma maior carga de arrancamento e assim uma magnitude maior de carregamentos cíclicos gerados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 6706 (2001) - Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil

ASTM D 7499/D7499M (2009) - Standard test method for measuring geosynthetic-soil resilient interface shear stiffness

Campos, M.V.W. de; Vilar, O.M. (2015) Módulo de Cisalhamento de Interface de Geogrelha Obtido em Ensaios de Arrancamento Cíclico. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos - REGEO, Brasília, DF, Brasil, 6 p.

Campos, M.V.W. de; Vilar, O.M. (2016) Comportamento de Geogrelha Instalada em Solo de Baixa Resistência e Submetida ao Arrancamento Cíclico. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 8 p.

Correia, N. S (2014). Performance of flexible pavements enhanced using geogrid-reinforced asphalt overlays. (2014). Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 205 p.

Cuelho, E.V.; Perkins, S.W. (2005) - Resilient interface shear modulus from shortstrip, cyclic pullout tests. In: M.A. Gabr, J.J. Bowders, D. Elton and J.G. Zornberg (Editors). ASCE, Austin, Texas, USA, pp. 21-21.

DNIT-ME 134 (2010) – Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, 11p.

Perkins, S.W. et al. (2004) - Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA Report Reference Number DTFH61-01-X-00068, Washington D.C., USA.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/23

Avaliação da melhoria do módulo de elasticidade de camadas granulares com geocélulas: seções experimentais em escala real em uma rodovia

L. X. Feng
Mestre, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), São Paulo, SP, Brasil, linfeng@usp.br

J. O. Avesani Neto
Professor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), São Paulo, SP, Brasil, avesani@usp.br

J. G. Zornberg
Professor, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas at Austin, TX, EUA, zornberg@mail.utexas.edu

RESUMO: Este artigo apresenta resultados de retroanálise a partir de trechos experimentais em escala real envolvendo camadas reforçadas com geocélula preenchidas com material granular, submetidas ao ensaio de deflexão in situ com viga Benkelman (BBT). Os ensaios de campo foram realizados durante a construção de uma rodovia no sul do país. Dois tipos de materiais granulares foram utilizados em seções de pavimento com e sem reforço. As medições de deflexão foram obtidas nas diferentes camadas da estrutura do pavimento utilizando o BBT. Os principais objetivos do programa foram: (1) retrocalcular os módulos de elasticidade, tanto nas camadas sem reforço quanto nas reforçadas; (2) determinar a melhoria no módulo, quantificada pelo Fator de Melhoria do Módulo (Modulus Imoprovement factor - MIF), decorrente do reforço com geocélula; (3) comparar os valores de MIF medidos com valores reportados na literatura sob condições semelhantes; e (4) avaliar a precisão de um método analítico disponível para estimar o MIF. Os resultados demonstraram melhoria significativa no módulo elástico dos materiais granulares com o uso de geocélulas, com valores de MIF variando de 2,6 a 3,3, dependendo do material de enchimento. Um método analítico utilizado para calcular o MIF apresentou boa capacidade preditiva, confirmando seu potencial de aplicação no projeto de pavimentos com camadas reforçadas por geocélulas.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Fator de Melhoria do Módulo (MIF), reforço de solos, reforço de pavimentos, ensaio de deflexão.

ABSTRACT: This article presents results from back-analysis of full-scale experimental sections involving granular material layers reinforced with geocells, subjected to in-situ deflection tests using the Benkelman Beam Test (BBT). The field tests were conducted during the construction of a highway in the southern region of the country. Two types of granular materials were used in pavement sections with and without reinforcement. Deflection measurements were obtained in the different layers of the pavement structure using the BBT. The main objectives of the program were: (1) to back-calculate the elastic moduli in both unreinforced and reinforced layers; (2) to determine the modulus improvement, quantified by the Modulus Improvement Factor (MIF), resulting from geocell reinforcement; (3) to compare the measured MIF values with those reported in the literature under similar conditions; and (4) to evaluate the accuracy of an available analytical method for estimating the MIF. The results demonstrated a significant improvement in the elastic modulus of the granular materials with the use of geocells, with MIF values ranging from 2.6 to 3.3, depending on the fill material. An analytical method used to calculate the MIF showed good predictive capability, confirming its potential for application in the design of pavements with geocell-reinforced layers.

KEYWORDS: Geosynthetics; Modulus Improvement Factor (MIF); soil reinforcement; pavement reinforcement; deflection test

1 INTRODUÇÃO

Geocélulas são geossintéticos com aplicações em engenharia civil que vão desde proteção contra erosão até reforço de solos (Biswas et al., 2024; Ghazvinian and Karami, 2023; Krishnaraj et al., 2023; Sawada et al., 2023). Sua implementação tem aumentado nos últimos anos devido à eficácia em resolver diversos problemas de engenharia, sobretudo aqueles relacionados ao reforço de solos para infraestrutura de transportes (Luo et al., 2023; Minchala et al., 2024; Punetha and Nimbalkar, 2022).

A melhoria das propriedades mecânicas do agregado de enchimento pode ser atribuída ao maior confinamento proporcionado pela estrutura em colmeia das geocélulas. Em particular, tensões residuais ficam "encapsuladas" dentro das células, fazendo com que a camada reforçada com geocélulas se comporte como uma "placa" pré-tensionada (J. O. Avesani Neto, 2019; Garcia and Avesani Neto, 2021). Além do confinamento lateral, as geocélulas aumentam a rigidez (módulo elástico) da camada granular não ligada (UGM) e, assim, melhoram o desempenho em estruturas de pavimento (Zornberg, 2017). Um parâmetro que representa essa capacidade é o Fator de Melhoria do Módulo (MIF), definido como a razão entre o módulo na camada reforçada por geocélula e o módulo na camada sem reforço (MIF = Er/Eun).

O MIF pode ser determinado por várias técnicas experimentais, incluindo ensaios laboratoriais em pequena e grande escala; pistas de ensaios em escala real; retroanálises de dados de monitoramento de estradas e ferrovias; e simulações numéricas, como análises pelo método dos elementos finitos (MEF). Tipicamente, valores de MIF variam entre 1,5 e 5,0 em experimentos laboratoriais, e entre 2,0 e 3,5 em testes de campo em escala real e retroanálises de obras (Pokharel et al., 2017; Ruge et al., 2020; Saride et al., 2022). Em termos de projeto, o uso do MIF é adequado porque permite inserir diretamente o módulo da camada reforçada no método mecanicista-empírico. Um método analítico para estimar o MIF foi desenvolvido por Garcia e Avesani Neto (2021), facilitando a incorporação das geocélulas em análises mecanicistas e em softwares baseados na Teoria do Sistema de Camadas Elasticas (TSCE).

Apesar do sucesso do MIF em diversos projetos, a falta de dados de desempenho em campo de pavimentos flexíveis reforçados com geocélulas tem limitado sua adoção. Diretrizes específicas para projeto e construção ainda não são amplamente disponíveis, principalmente pela escassez de dados em condições reais de operação. Para suprir essa lacuna, este artigo apresenta um resumo da dissertação de Feng (2024) e do artigo Feng et al. (2024) com retroanálises de deflexões medidas por BBT em camadas de UGM sem reforço e reforçadas com geocélulas, construídas dentro de uma estrutura de pavimento de rodovia. Um programa em escala real foi conduzido para avaliar os ganhos de rigidez em camadas típicas de base e sub-base. Um software baseado em TSCE foi empregado para determinar os módulos das camadas reforçadas e não reforçadas, quantificando as melhorias via MIF, e comparando com método analítico e com valores reportados na literatura.

2 ENSAIO EXPERIMENTAL EM ESCALA REAL

Zonas de ensaio em escala real foram instaladas em uma rodovia em construção na região Sul do Brasil. A área total tinha 170 m de comprimento e 12 m de largura e foi dividida em quatro zonas com combinações de camadas de base e sub-base sem reforço e reforçadas com geocélulas. Cada zona tinha 50 m de comprimento, permitindo avaliação detalhada por ensaio de viga Benkelman (BBT), conforme mostrado na Figura 1A.

A Zona 1 atuou como controle, com sub-base de 250 mm de macadame (CSS) e base de 150 mm de brita graduada (GBM), conforme Figura 1. As Zonas 2, 3 e 4 foram reforçadas com geocélula (Figura 1). Na Zona 2, a geocélula foi posicionada na sub-base (CSSg). Nas Zonas 3 e 4, a geocélula foi posicionada na base (GBMg).

Ensaios BBT foram realizados em séries: Série A (sobre o subleito), Série B/C (sobre CSS/GBM sem reforço) e Séries Bg/Cg (sobre CSSg/GBMg reforçadas com geocélula), de acordo com a Figura 1.

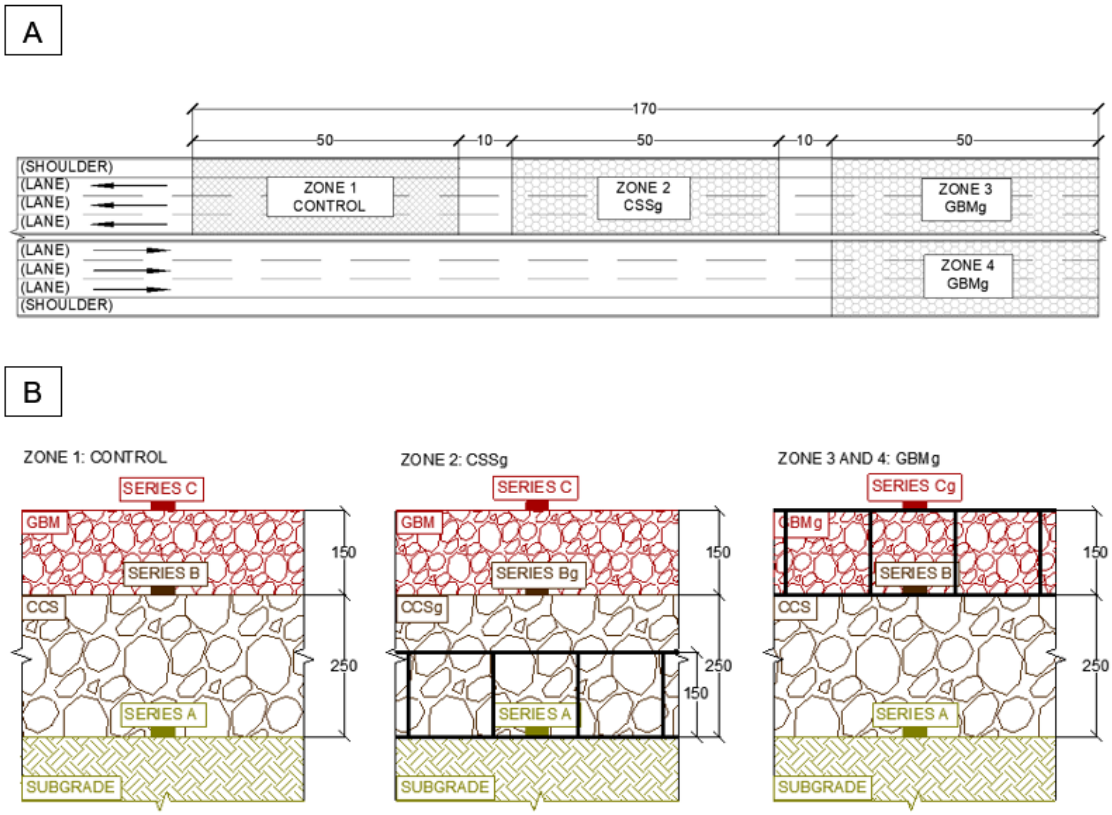


Figura 1. Trecho experimental. A) Vista em planta (medidas em metros). B) Seções transversais (medidas em milimetros) – Adaptado de Feng et al. (2024).

2.1 Subleito

O subleito corresponde ao material in situ do local: uma argila siltosa laterítica, com teor de umidade natural durante a construção de 1,55%, massa específica dos sólidos de 2,77 g/cm³, Limite de Liquidez (LL) de 77% e Índice de Plasticidade (IP) de 40%. O solo foi classificado como A-7-5 pela AASHTO e MH (silte de alta plasticidade) pela USCS. A sua curva granulométrica é mostrada na Figura 2.

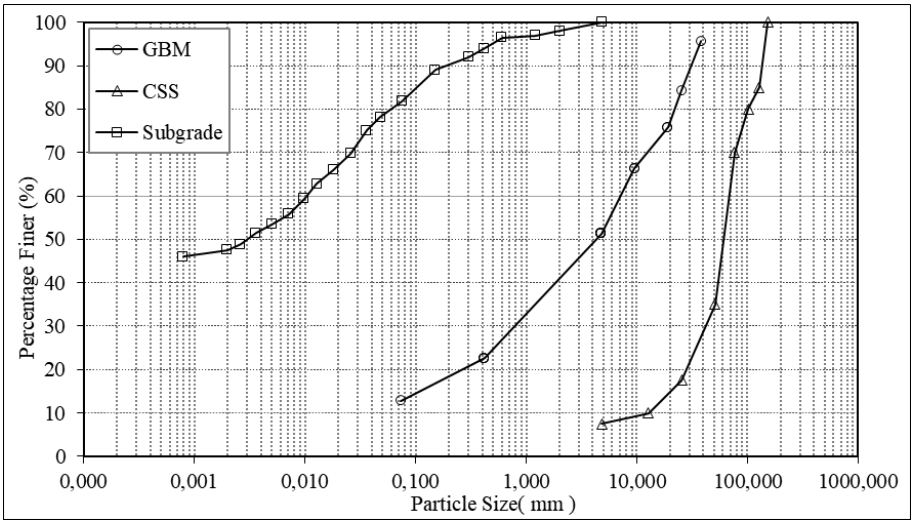


Figura 2. Curvas granulométricas dos solos utilizados neste estudo - adaptado de Feng et al. (2024).

2.2 Sub-base e base granular

A sub-base de macadame (CSS) era um agregado graúdo, comumente utilizado em rodovias brasileiras. Ela era composta por fragmentos angulares de brita de 12 a 85 mm, com boa durabilidade e caráter não reativo, classificada como A-1-a e GP, respectivamente pelos sistemas da AASHTO e USCS. Sua curva granulométrica é mostarda na Figura 2.

A base de brita graduada simples (GBM) foi classificada como A-1-a e GW, respectivamente pelos sistemas da AASHTO e USCS. A Figura 2 mostra sua curva granulométrica. Durante o processo de compactação, com alvo de 100% do Proctor Modificado, a massa específica seca máxima obtida foi 2,18 kg/cm³ e a umidade ótima 4,6%. O CBR no material, nessas condições, resultou em 102%..

2.3 Geocélula

A geocélula empregada, conforme especificação do fabricante, foi produzidas em PEAD (polietileno de alta densidade) com altura de 150 mm e abertura da celula com 224 mm de largura e 259 mm de comprimento quando totalmente abertas (área de 0,0289 m²). As paredes eram texturizadas e perfuradas (diâmetro máx. 10 mm), com área perfurada de cerca de 10%. O módulo de elasticidade do PEAD em pequenas deformações foi considertado como 700 Mpa. Um resumo das caracteristicas da geocélula é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características da geocélula.

Parâmetro	Valor
Material	PEAD
Altura da parede da célula (mm)	150
Dimensão expandida da célula (mm)	259 × 224
Área aberta da célula (m²)	0,0289
Diâmetro equivalente (mm)	192
Espessura da parede (mm)	1,65
Rigidez da geocélula (kN/m)	1155

2.4 Construção do trecho experimental e ensaios de viga Benkelman (BBT)

Todas as zonas foram projetadas com as mesmas camadas, materiais e espessuras, variando apenas o posicionamento da geocélula. Na Zona 1 (controle), executou-se os ensaios de BBT na Série A (subleito), depois sobre os 250 mm da CSS (Série B), e por fim sobre a GBM com 150 mm (Série C). Na Zona 2, a geocélula foi incorporada à CSS (Série Bg), mantendo Série A no subleito e Série C no GBM. Nas Zonas 3 e 4, a geocélula foi incorporada ao GBM (Série Cg), mantendo Série A (subleito) e Série B (CSS).

A compactação das camadas empregou rolo liso vibratório (2,1 m de largura), objetivando 100% de compactação relativa (Proctor Modificado), com 4 a 8 passadas e força centrífuga entre 133 e 234 kN. O controle de qualidade seguiu as espeficidações DNIT. O ensaio de BBT, amplamente usado no Brasil, foi conduzido com roda dupla de eixo simples, carga de 80 kN e pressão de 560 kPa, gerando duas cargas circulares equivalentes com espaçamento de 288 mm, de acordo com especificações rodoviárias brasileiras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Deflexões obtidas

Foram realizados um total de 219 BBT no trecho experimental, cerca de 55 em cada zona e 25 por Série. A Tabela 2 apresenta as faixas, valores médios e coeficientes de variação (COV) das deflexões por zona e camada (Série).

Tabela 2. Resultados de deflexão.

Série	Camada	Zonas	Faixa de deflexão (mm)	Deflexão média (mm)	COV
A	Subleito	1 a 4	1,15 a 6,29	3,05	36,3%
B	CSS	1, 3 e 4	0,83 a 2,12	1,51	22,3%
C	GBM	1 e 2	0,59 a 1,92	1,10	24,0%
Bg	CSSg (reforçado)	2	1,31 a 1,78	1,51	10,3%
Cg	GBMg (reforçado)	3 e 4	0,87 a 1,31	1,04	9,5%

As deflexões variaram de 0,59 a 6,29 mm, com COV entre 9,5% e 36,3%. Como esperado, maiores deflexões e desvios ocorreram no subleito, material de maior variabilidade conforme condições in situ. À medida que camadas mais rígidas eram adicionadas, as deflexões e o COV diminuíam. As camadas reforçadas com geocélula exibiram os menores COV, cerca de 55% inferiores aos das camadas sem reforço, indicando maior uniformidade.

Embora as médias de deflexão entre camadas sem e com reforço nem sempre mostrem diferenças marcantes (p.ex., B vs. Bg; C vs. Cg), a influência da deformabilidade do subleito limita inferências diretas a partir das deflexões superficiais. Assim, realiza-se a retroanálise em sistema elástico multicamadas para quantificar os módulos.

3.2 Retroanálise pelo sistema de multiplas camadas

As deflexões medidas estão diretamente correlacionadas aos deslocamentos obtidos pela Teoria do Sistema de Camadas Elasticas (TSCE), que relaciona tensões e deformações em função do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e espessura. No presente estudo, utilizou-se o software ELLEA1 (Levenberg, 2016), capaz de calcular deslocamentos, tensões e deformações em até cinco camadas sob duas cargas circulares de superfície, conforme metodologia de Avesani Neto e Rodrigues (2021) e Zipoli e Avesani Neto (2022).

Os parâmetros de entrada incluíram espessuras e coeficientes de Poisson (ν) por camada, além da posição, dimensões e magnitude da carga do BBT. Foram obtidos o módulo de superfície, ou equivalente (Esuf), relativo a todas as camadas, e o módulo de elasticidade de cada camada (E), conforme mostrado na Tabela 3. A análise iterativa avançou das camadas inferiores para as superiores: primeiro ajustou-se o subleito (Série A), depois CSS (Série B), e assim por diante. Valores de ν foram adotados da literatura, com cifra de 0,25 para a camada reforçada com geocélula (Yoder and Witczak, 1975, Gottumukkala et al., 2023).

Tabela 3. Parâmetros de entrada por camada e módulos retrocalculados a partir dos ensaios de BBT.

Série	Camada	Zonas	Espessura (mm)	ν	Esuf (MPa)	E (MPa)
A	Subleito	1 a 4	∞	0,45	23	23
B	CSS	1, 3 e 4	250	0,35	49	283
C	GBM	1 e 2	150	0,35	67	215
Bg	CSSg (reforçado)	2	250	0,25	52	723
Cg	GBMg (reforçado)	3 e 4	150	0,25	76	656

Os valores de Esuf variaram de 23 a 76 MPa, sendo o menor no subleito e o maior sobre a camada de base reforçada com geocélula. À medida que camadas mais rígidas eram adicionadas, o Esuf aumentou. A sub-base CSS sem reforço resultou em Esuf = 49 MPa (>100% acima do subleito). Para GBM sem reforço, Esuf = 67 MPa (190% acima do subleito, 36% acima do CSS). Com geocélulas, CSSg apresentou Esuf = 52 MPa (126% acima do subleito, 6% acima do CSS) e GBMg Esuf = 76 MPa (230% acima do subleito, 55% acima do CSS, 13% acima do GBM).

Como o Esuf é incremental durante a construção e as espessuras/camada sobreposta diferem, comparações entre CSS e GBM devem ser qualitativas, inclusive sem e com a presença do reforço, visto que o subleito influencia diretamente no Esuf.

Para avaliar individualmente cada camada, a TSCE foi utilizada de sorte a individualizar os módulos de cada uma (E). Para o subleito (Série A), o módulo da camada resultou em 23 MPa. Para a CSS sem reforço (Série B), E foi igual a 283 MPa (médias das Zonas 1, 3 e 4), com variações por zona de 279, 308 e 263 MPa (COV < 10%). Para a GBM sem reforço (Série C), E = 215 MPa (média das Zonas 1 e 2), com 206 e 223 MPa por zona (COV ~5%). Essas magnitudes estão consistentes com faixas recomendadas em manuais e obtidas em estudos e retraanlaises para os materiais granulares usados (Yoder and Witczak, 1975, Huang, 2004).

Para as camadas reforçadas com geocélula, os módulos aumentaram significativamente: CSSg = 723 MPa (Série Bg) e GBMg = 656 MPa (Série Cg; média de 593 e 719 MPa nas Zonas 3 e 4).

3.3 Fator de melhoria do módulo (MIF)

O MIF quantifica a melhoria do módulo decorrente das geocélulas e permite inserir diretamente o módulo reforçado em análises mecanicistas (Er = MIF × Eun). A Tabela 4 resume os valores de MIF obtidos por retroanálise no trecho experimental e por um método analítico (Garcia and Avesani Neto 2021).

Tabela 4. Valores de MIF a partir dos ensaios de campo e previsão pelo método analítico.

Material de enchimento	MIF obtidos nos experimentos	MIF estimado pelo método analítico
CSS	2,6	2,9
GBM	2,8	3,2
GBM	3,3	3,2

Pela Tabela 4, observa-se que os valores de MIF variaram entre 2,6 e 3,3 nas zonas reforçadas. Para a CSSg (Zona 2), o MIF obtido no campo foi de 2,6, e p ara a GBMg, respectivamente para as Zonas 3 e 4, o MIF foi de 2,8 e 3,3. Considerando as variações de módulo não reforçado por zona, o MIF para CSSg ficou entre 2,3 e 2,7 (diferença absoluta máxima de 0,4 e relativa <10%). Para a GBM, a faixa estimada foi 2,7 a 3,5. Os resultados mostram uma tendencia de maior MIF para GBM do que para a CSS, coerente com o índice relativo de rigidez solo-reforço Si (Garcia and Avesani Neto 2021), ou seja, quanto menor o módulo do solo e maior a rigidez da parede da célula J, maior o MIF esperado.

A Tabela 4 também apresenta o valor de MIF estimado teoricamente utilizando a formulação analítica proposta por Garcia e Avesani Neto (2021). Para calcular o MIF pelo método analítico, foram adotados os parâmetros hiperbólicos do CSS e do GBM com base em ensaios in situ e de laboratório, bem como em recomendações da literatura (Duncan et al., 1980), como segue: $\gamma = 20$ kN/m³, $c' = 0$, $\varphi' = 45°$, Rf = 0,8, k = 900 para CSS e 600 para GBM, ku/k = 1,2 e n = 0,4. Os parâmetros e características da geocélula foram utilizados conforme apresentados na Tabela 1. A tensão induzida pelo processo de compactação foi estimada utilizando a metodologia proposta por Ehrlich e Mitchell (1994), considerando os procedimentos e equipamentos previamente citados.

Os valores de MIF obtidos pelo método analítico de Garcia and Avesani Neto(2021), de 2,9 para CSS e 3,2 para GBM, mostraram boa concordância com os experimentais, com diferenças absolutas de 0,1 a 0,4 e

relativas de 3 a 13%, corroborando a boa aplicabilidade do método para estimativas de projeto e análises preliminares, conforme visualizado na Figura 3.

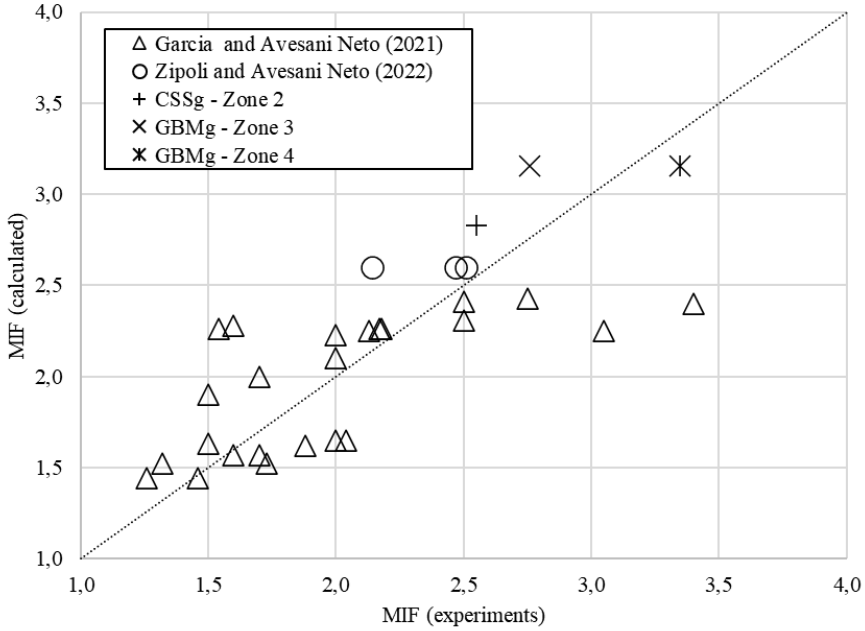


Figura 2. Comparação de valores de MIF estimados pelo método analítico com aqueles obtidos experimentalmente no campo - adaptado de Feng et al. (2024).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou retroanálises de um programa experimental em escala real com camadas sem reforço e reforçadas por geocélulas, submetidas a ensaios de viga Benkelman (BBT) durante a construção de uma rodovia. Empregaram-se como material granular macadame na camada de sub-base (CSS) e brita graduada simples (GBM) na base, sem e comreforços de geocélulas. Quatro zonas com 50 m foram construídas (uma de controle e três reforçadas). Ao todo, realizaram-se 219 BBT em três níveis (subleito, CSS/GBM sem reforço e CSSg/GBMg). As principais conclusões são:

- O uso de geocélulas reduziu significativamente o desvio-padrão das deflexões.
- O módulo de elasticidade de superfície (Esuf) aumentou consitentemente com o reforço.
- Os módulos de elasticidade das camadas (E) foram retroanalisados sendo obtidos valores coerentes como reportado naliteratura.
- Os valores de MIF obtidos dos experimentos foram de 2,6 para a CSS e 2,8 a 3,3 para a GBM.
- O método analítico para estimativa do MIF apresentou boa concordância com os resultados experimentais, indicando sua utilidade em projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avesani Neto, J. O. (2019). Application of the two-layer system theory to calculate the settlements and vertical stress propagation in soil reinforcement with geocell. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, n. 1, p. 32–41.

Avesani Neto, J. O.; Rodrigues, D. (2021). Instrumented load tests and layered elastic theory analysis of a large-scale EPS block embankment. *Transportation Geotechnics*, v. 26.

Biswas, S.; Hussain, M.; Singh, K. L. (2024). Behavior of bamboo and jute geocell overlaying soft subgrade under repeated wheel loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 2.

Duncan, J. M. et al. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*. California.

Ehrlich, M.; Mitchell, J. K. (1994). Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 120.

Feng, L. X.; Avesani Neto, J. O.; Zornberg, J. G. (2024). Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates: full-scale experimental sections on a highway. *Transportation Geotechnics*..

Feng, L. X. (2024). *Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates layers: full-scale experimental on a highway track*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Garcia, R. S.; Avesani Neto, J. O. (2021). Stress-dependent method for calculating the modulus improvement factor in geocell-reinforced soil layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, p. 146–158.

Ghazvinian, H.; Karami, H. (2023). Laboratory study of the effect of vegetation and gravel on runoff parameters under variable rainfall intensities. *Water Science & Technology*, v. 88, p. 2424.

Gottumukkala, B. et al. (2023). Laboratory and field evaluations of geocell reinforced bases for locally available material in the Himalayan region. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 9, n. 6.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design*. 2. ed. New Jersey: Pearson Education.

Krishnaraj, P. et al. (2023). Physical and numerical shaking table studies on geocell-reinforced retaining walls. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 9, n. 3, p. 62.

Levenberg, E. (2016). *ELLEA1: isotropic layered elasticity in Excel: pavement analysis tool for students and engineers*. Computer programme. Technical University of Denmark.

Luo, X. W. et al. (2023). *Study on performance of geocell-reinforced red clay subgrade*. Geosynthetics International, v. 31, n. 6, p. 968–980.

Minchala, D. et al. (2024). Laboratory evaluation of marginal and industrial waste material in geocell-reinforced pavements under cyclic loading. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 52, n. 1.

Pokharel, S. K. et al. (2017). Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 11, n. p. 2, p. 114-127.

Punetha, P.; Nimbalkar, S. (2022). Performance improvement of ballasted railway tracks using three-dimensional cellular geoinclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, p. 1061–1082.

Ruge, J. C.; Gomez, J. G.; Moreno, C. A. (2020). Analysis of the creep and the influence on the modulus improvement factor (MIF) in polyolefin geocells using the stepped isothermal method. *In: Geopolymers and Other Geosynthetics*. IntechOpen.

Saride, S. et al. (2022). Modulus improvement factor-based design coefficients for geogrid- and geocell-reinforced bases. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 148, n. 3.

Sawada, Y. et al. (2023). Lateral force–displacement relationships for shallowly buried pipe reinforced by geocells. *Geosynthetics International,* v. 31, n. 5, p. 638–651.

Yoder, E. J.; Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. London: Wiley.

Zipoli, L. L. R.; Avesani Neto, J. O. (2022). Evaluation of back-calculated elastic moduli of unreinforced and geocell-reinforced unbound granular material from full-scale field tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, n. 5, p. 910–921.

Zornberg, J. G. (2017). Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Transportation Geotechnics and Geoecology*, v. 189, p. 298–306.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/24

Avaliação da Resistência à Compressão Simples de um Solo Utilizando Geossintético Como Reforço

Carlos Eduardo de Lima Prado
Engenheiro Civil, Instituto Federal de Alagoas – IFAL, Maceió, Brasil, cadulima.maceio@hotmail.com

Isabelly Farias Gama
Engenheiro Civil, Instituto Federal de Alagoas – IFAL, Maceió, Brasil, isabellygamaf@gmail.com

Taise Monique de Oliveira Carvalho
Professora Doutora, Instituto Federal de Alagoas – IFAL, Maceió, Brasil, taise.carvalho@ifal.edu.br

Sheldon Cristiano Souza da Silva
Engenheiro Civil e Técnico do IFAL, Instituto Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, sheldon.cristiano@ifal.edu.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo investigar a resistência à compressão simples de um solo argiloso (SC) da região de Maceió-AL, Brasil, quando reforçado com geossintéticos, especificamente geogrelha unidirecional e geotêxtil do tipo MacGrid Net®. Para tanto, foi realizada a caracterização física do solo, a determinação da curva de compactação e a avaliação comparativa da resistência à compressão do solo não reforçado e reforçado. A metodologia compreendeu ensaios de limites de consistência (LL de 24,46% e LP de 13,76%), análise granulométrica e ensaios de compactação, tendo como resultado uma massa específica seca máxima de 1,84 g/cm³ e umidade ótima de 13,8%. A etapa principal envolveu ensaios de compressão simples com corpos de prova de solo não reforçado (CP-S), solo reforçado com geogrelha (CP-GGR) e solo reforçado com geotêxtil (CP-GTX), seguindo a ABNT (NBR 12770, 2022). Os resultados demonstraram que a geogrelha aumentou a resistência à compressão simples em aproximadamente 36,75%, enquanto o geotêxtil proporcionou um ganho de 8,54%. Para pequenas deformações (2% de deformação axial), a resistência aumentou cerca de 52% com a geogrelha e 64% com o geotêxtil, em comparação com o solo não reforçado. Perspectivas futuras incluem o estudo de diferentes tipos de geossintéticos, variações de layout, ensaios triaxiais, e estudos em escala de campo para validação técnica e econômica.

PALAVRAS-CHAVE: geossintéticos; resistência; solo reforçado; compressão; geogrelha.

ABSTRACT: This study investigated the unconfined compressive strength behavior of a clayey sand (SC) from the Maceió–AL region, Brazil, reinforced with geosynthetics, namely a unidirectional geogrid and a MACGRID NET® geotextile. Physical characterization and compaction tests were performed, followed by unconfined compression tests on unreinforced specimens and reinforced specimens, in accordance with ABNT NBR 12770 (2022). The soil presented a maximum dry unit weight of 1.84 g/cm³ and an optimum moisture content of 13.8%. The results showed that geogrid reinforcement increased the unconfined compressive strength by approximately 36.75%, while the geotextile provided an increase of 8.54%. At small axial deformations (2%), strength gains of about 52% and 64% were observed for geogrid- and geotextile-reinforced specimens, respectively, compared to unreinforced soil. Future studies may address different geosynthetic types, reinforcement layouts, triaxial testing, and field-scale applications to assess technical and economic feasibility

KEYWORDS: geosynthetics; strength; reinforced soil; compression; geogrid.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, diversas técnicas são empregadas cotidianamente para melhorar a resistência do solo em obras geotécnicas. Tais métodos consistem em promover uma melhora nas características mecânicas do maciço, possibilitando que o solo seja capaz de resistir aos esforços submetidos por diversos fatores e permitindo com que cada obra tenha suas necessidades atendidas.

Em algumas construções da antiga civilização, como os zigurates e a muralha da China, o método do reforço do solo, conforme Terzaghi, Peck e Mesri (1996), já era aplicado, visto que os zigurates, eram constituídos por camadas de solos argilosos fortalecidos com a utilização de galhos e juncos, e a muralha da China, utilizando-se de fibras naturais em suas parcelas de argila e cascalho.

No Brasil, a utilização de geossintéticos para reforço do solo seguiu o avanço internacional e ganhou notoriedade a partir da década de 1970, sendo utilizados inicialmente em obras rodoviárias (Carvalho; Pedrosa; Wolle, 1986). A ABNT (NBR 10318-1, 2021) define diversas funções para esses materiais, como drenagem, filtração, reforço, separação e proteção.

No cenário atual da engenharia civil, a busca por soluções inovadoras e economicamente viáveis para o reforço de solos é constante, especialmente em regiões com características geotécnicas desafiadoras, como as encontradas em Maceió, AL. A instabilidade de taludes e a baixa capacidade de suporte de solos são problemas comuns que demandam técnicas eficientes e de baixo custo. Nesse contexto, a utilização de geossintéticos, em particular as geogrelhas e geotêxteis, surge como uma alternativa promissora devido à sua capacidade de aumentar a resistência mecânica do solo e otimizar projetos geotécnicos. Essa abordagem é frequentemente destacada por autores como Palmeira (2009) e Koerner (2012) ao abordarem a evolução e as vantagens dos geossintéticos em obras geotécnicas.

Diante deste cenário, o presente trabalho consiste em avaliar o comportamento de um solo da região de Maceió com o uso de geogrelha e geotêxtil, aplicados separadamente, comparando os parâmetros de resistência à compressão simples do solo com e sem o uso dos materiais propostos, a fim de que se contribua para a aplicação eficiente de geossintéticos em obras geotécnicas locais e ampliar o conhecimento sobre o desempenho desses materiais em solos com características regionais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo e caracterização geotécnica

O solo utilizado foi coletado em Maceió–AL, nas proximidades da Rua Diégues Júnior, entre o Vale do Reginaldo e a ladeira Dr. Geraldo Melo dos Santos, em área representativa de encostas urbanas sujeitas a instabilidades. A amostragem foi realizada com ferramentas manuais, seguindo recomendações da ABNT NBR 9604:2016, com cuidado para evitar contaminação e preservar as características naturais do material até sua chegada ao laboratório.

O preparo das amostras obedeceu à ABNT NBR 6457:2016, incluindo secagem ao ar até umidade higroscópica, destorroamento, quarteamento e peneiramento para obtenção de frações representativas para os ensaios. A caracterização física compreendeu ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conduzidos segundo a ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016, respectivamente, além de análise granulométrica por peneiramento, conforme a ABNT NBR 7181:2025.

2.2 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram executados de acordo com a ABNT NBR 7182:2016, empregando energia Proctor normal em molde cilíndrico pequeno, com amostras previamente preparadas conforme a ABNT NBR 6457:2016. Foram moldados corpos de prova em três camadas, com 26 golpes por camada, variando-se o teor de umidade para construção da curva de compactação e determinação da massa específica seca máxima e umidade ótima.

2.3 Geossintéticos utilizados

Foram empregados dois geossintéticos distintos como elementos de reforço. O primeiro é um geotêxtil do tipo MacGrid Net®, classificado como tecido técnico, produzido com filamentos de poliéster de alta tenacidade revestidos com PVC, com gramatura da ordem de 300 g/m² e espessura aproximada de 0,6 mm, além de resistência à tração mínima de 45 kN/m nas direções longitudinal e transversal e alongamento máximo de 15% (Maccaferri, 2019).

O segundo reforço é uma geogrelha unidirecional de poliéster de alta tenacidade, com resistência característica à tração de 400 kN/m na direção principal e abertura de malha de 1,5 cm, desenvolvida para aplicações em que a solicitação predominante é uniaxial. Ambos os materiais foram cortados e posicionados entre camadas de solo durante a moldagem dos corpos de prova, conforme Figura 2.

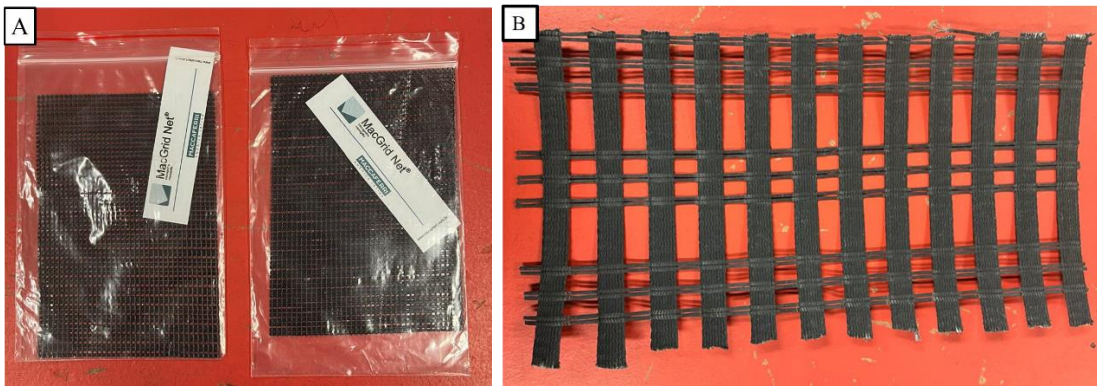


Figura 1: Geotêxtil MacGrid Net (A); Geogrelha unidirecional (B)

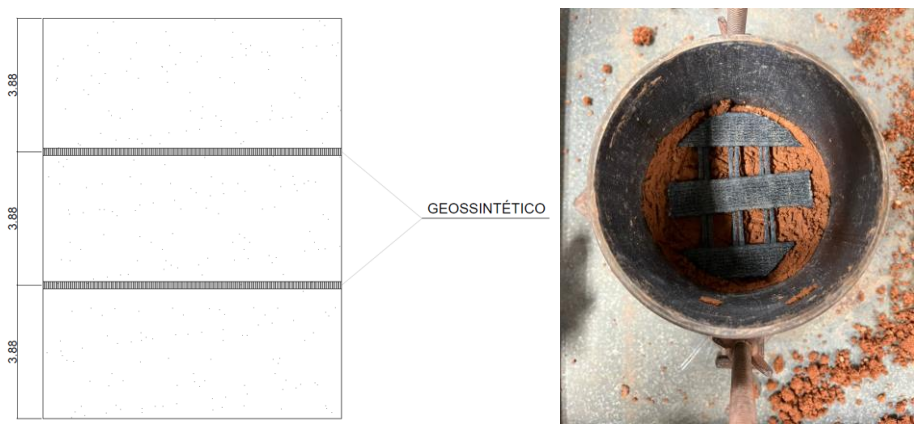


Figura 2: Disposição e possionamento dos geossintéticos entre as camadas

2.4 Ensaios de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados segundo a ABNT NBR 12770:2022, em corpos de prova cilíndricos moldados no molde pequeno, com diâmetro aproximado de 100 mm e altura de cerca de 110 mm, compactados em condições próximas à umidade ótima. Foram avaliados três tipos de amostras: solo não reforçado (CP-S), solo reforçado com geogrelha (CP-GGR) e solo reforçado com geotêxtil (CP-GTX).

Os reforços foram inseridos em camadas intermediárias durante a compactação, adotando arranjo de camadas alternadas de solo e geossintético. Dificuldades de aderência entre camadas levaram ao descarte de algumas amostras, em especial quando a malha da geogrelha mostrava-se maior que o diâmetro interno do molde e quando o geotêxtil ocupava toda a seção, exigindo posterior redução do diâmetro do geotêxtil para criar um “anel de contato” de solo na periferia do corpo de prova.

Após a moldagem, os corpos de prova foram posicionados em prensa com controle de deformação axial, adotando-se velocidade entre 0,5% H/min e 2% H/min, onde H é a altura da amostra, até a ruptura, registrando-

se continuamente carga e deslocamento para obtenção das curvas tensão–deformação. As umidades finais dos corpos de prova foram determinadas por amostras retiradas do centro após o ensaio.



Figura 3: Corpo de prova reforçado durante o ensaio de compressão simples

Quadro 1: Lista de corpos de provas para o ensaio de compressão simples.

Solo	Geogrelha	Geotêxtil
CP-S-01	CP-GGR-01	CP-GTX-01
CP-S-02	CP-GGR-02	CP-GTX-02*
CP-S-03	CP-GGR-03*	

Nota: *Amostras descartadas

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios de caracterização geotécnica do solo

Foram obtidos LL de 24,46% e LP de 13,76%, resultando em índice de plasticidade igual a 10,71%, o que caracteriza o solo como de plasticidade média. A curva granulométrica indicou composição aproximada de 9% de pedregulho, 49% de areias (grosseira, média e fina) e 42% de frações finas (silte + argila), permitindo sua classificação pelo SUCS como areia argilosa (SC).

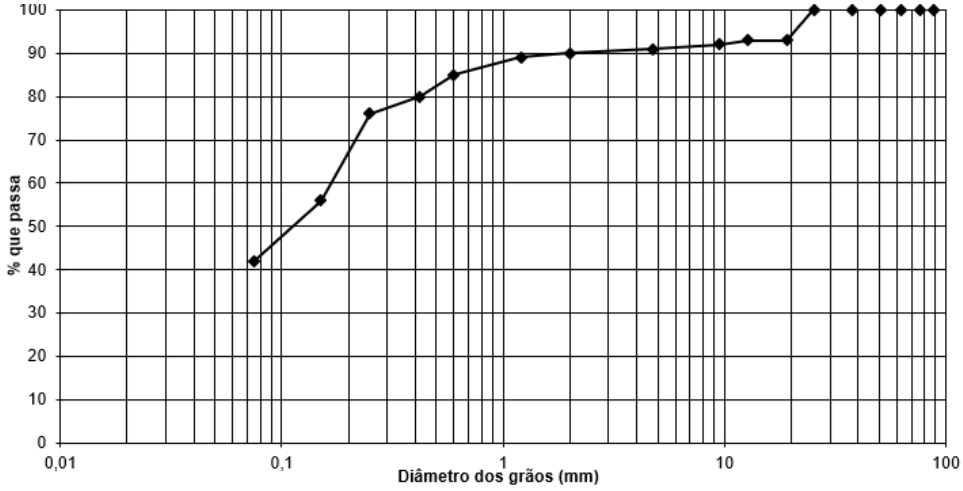


Figura 4:Curva granulométrica.

A curva de compactação obtida revelou massa específica seca máxima de 1,84 g/cm³ para um teor de umidade ótimo de 13,8%, valores adotados como referência para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples.

3.2 Corpos de prova de solo não reforçado (CP-S)

Foram ensaiados três corpos de prova de solo sem qualquer tipo de reforço (CP-S-01, CP-S-02 e CP-S-03). Os resultados individuais de resistência à compressão simples (Qu), deformação na ruptura e umidade para cada um desses corpos de prova são apresentados na Tabela 1. As curvas de tensão-deformação correspondentes são mostradas na Figura 5, ilustrando o comportamento mecânico do solo natural sob carregamento axial.

Tabela 1. Resultados dos Ensaios CP-S.

Amostras	Qu (kPa)	Deformação na ruptura (%)	y (g/cm³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-S-01	230	5,5	1,83	13,85	0,48	78,23
CP-S-02	227	5,8	1,80	14,10	0,50	76,68
CP-S-03	245	5,3	1,72	11,59	0,57	54,50

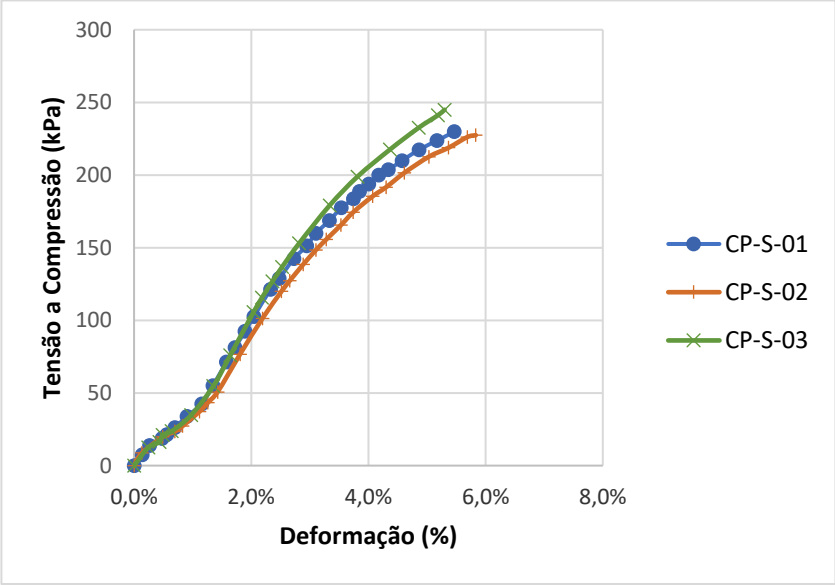


Figura 5: Curva Tensão x Deformação (CP-S).

3.3 Corpos de prova de solo reforçado com geogrelha (CP-GGR)

Para avaliar o efeito do reforço com geogrelha, foram ensaiados dois corpos de prova de solo incorporando com geogrelha do tipo unidirecional com resistência a tração de 400kn/m (CP-GGR-01 e CP-GGR-02). Os resultados detalhados são apresentados na Tabela 2, e suas respectivas curvas de tensão-deformação podem ser observadas na Figura 6.

Tabela 2: Resultados dos Ensaios (CP-GGR).

Amostras	Qu (kPa)	Deformação na ruptura (%)	y (g/cm³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-GGR-01	333	7,2	1,75	12,40	0,54	62,16
CP-GGR-02	308	4,6	1,82	12,23	0,49	68,03

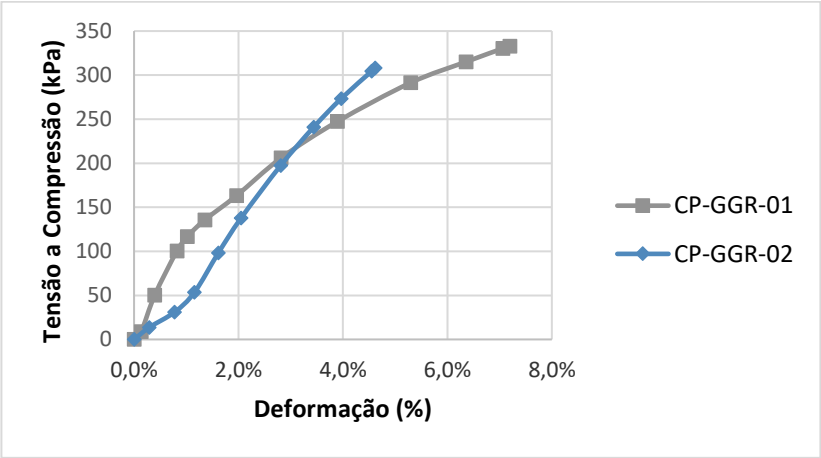


Figura 6: Curva Tensão x Deformação (CP-GGR).

3.4 Corpo de prova de solo reforçado com geotêxtil (CP-GTX).

Um corpo de prova de solo reforçado com geotêxtil tipo MACGRID NET (CP-GTX-01) também foi ensaiado para fins comparativos. A Tabela 3 apresenta seus resultados, e a Figura 7 ilustra a curva de tensão-deformação obtida.

Tabela 3: Resultado dos Ensaios (CP-GTX).

Amostras	Qu (kPa)	Deformação na ruptura (%)	y (g/cm³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-GTX-02	254	9,1	1,76	14,32	0,53	72,81

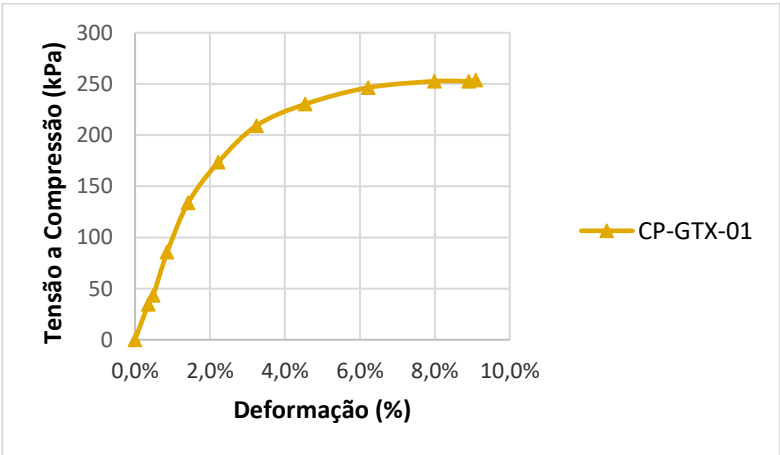


Figura 7: Curva Tensão x Deformação (CP-GTX).

3.5 Considerações e comparação dos resultados

Para uma análise comparativa mais abrangente, a Tabela 4 apresenta os valores de resistência à compressão simples em deformações de 2%, 4% e na ruptura para cada condição de ensaio. A Figura 8 condensa as curvas de tensão-deformação, permitindo uma visualização direta do impacto do reforço.

Tabela 4: Resultados dos ensaios.

Corpo de Prova	Qu (kPa)	Qu na deformação de 4% (kPa)	Qu na deformação de 2% (kPa)	Deformação na Ruptura (%)	Umidade (%)
CP-S-01	230	194	102	5,50	13,85

Corpo de Prova	Qu (kPa)	Qu na deformação de 4% (kPa)	Qu na deformação de 2% (kPa)	Deformação na Ruptura (%)	Umidade (%)
CP-S-02	227	182	89	5,80	14,1
CP-S-03	245	205	106	5,30	11,59
Média CP-S	234	194	99	5,50	13,18
CP-GGR-01	333	247	163	7,20	12,4
CP-GGR-02	308	273	138	4,60	12,23
Média CP-GGR	320	260	151	5,90	12,32
CP-GTX-01	254	222	163	9,10	14,32
Média CP-GTX	254	222	163	9,10	14,32

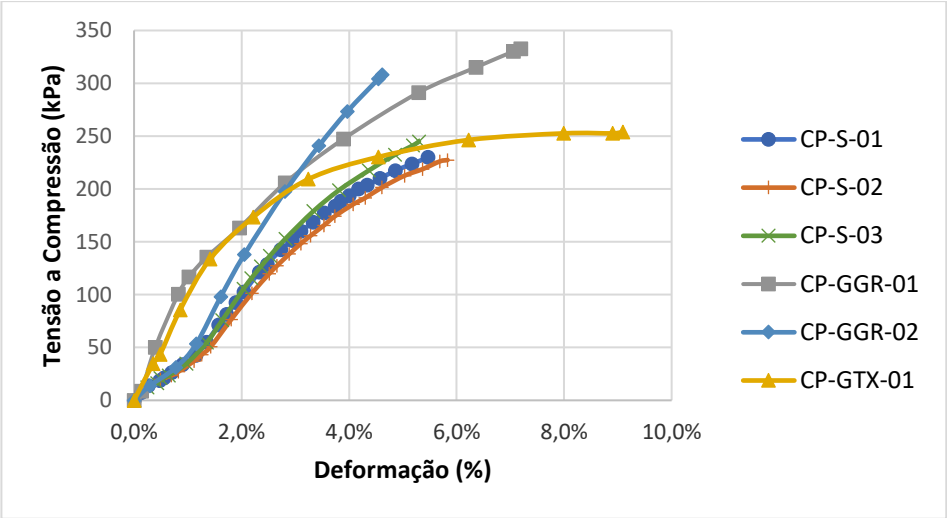


Figura 8: Curva Tensão x Deformação de todos os CPs ensaiados.

Observa-se que a introdução do reforço geossintético alterou o comportamento do solo em relação à sua resistência e deformação. A resistência à compressão simples média do solo não reforçado (CP-S) foi de aproximadamente 234 kPa. Para os corpos de prova reforçados com geogrelha (CP-GGR), a resistência média aumentou para 320 kPa, representando um incremento de cerca de 36,75% em relação ao solo não reforçado. Esse aumento demonstra a eficácia da geogrelha em absorver tensões de tração, elevando sua capacidade de carga.

Quanto ao corpo de prova reforçado com geotêxtil (CP-GTX), a resistência foi de 254 kPa, o que representa um aumento de aproximadamente 8,54% em comparação com o solo não reforçado. Embora o geotêxtil também promova um incremento na resistência, o desempenho da geogrelha foi superior neste estudo. Essa diferença pode ser atribuída à estrutura de malha aberta da geogrelha, que permite um melhor engajamento e interação solo-reforço através do intertravamento, enquanto o geotêxtil não tecido atua mais por fricção superficial.

Além do aumento da resistência máxima, a presença do geossintético também influenciou significativamente o comportamento do solo para pequenas deformações. Para uma deformação axial de 2%, a resistência média do solo não reforçado (CP-S) foi de aproximadamente 99 kPa. Em contraste, a resistência média do solo reforçado com geogrelha (CP-GGR) alcançou 151 kPa, e com geotêxtil (CP-GTX), 163 kPa, representando um aumento significativo de cerca de 52% para a geogrelha, e 64% para o geotêxtil. Esse ganho inicial deresistência e rigidez para pequenas deformações indica que o reforço geossintético começa a atuar efetivamente desde os estágios iniciais do carregamento, proporcionando maior estabilidade e menor deformabilidade sob condições de serviço.

4 CONCLUSÕES

O estudo permitiu avaliar a influência de geogrelha unidirecional e de geotêxtil tipo MacGrid Net® na resistência à compressão simples de um solo classificado como SC (areia argilosa) da região de Maceió–AL. Os ensaios de caracterização indicaram LL de 24,46%, LP de 13,76% e índice de plasticidade de 10,71%, além de composição granulométrica compatível com solos arenosos finos com fração argilosa significativa.

A curva de compactação Proctor normal resultou em massa específica seca máxima de 1,84 g/cm³ e umidade ótima de 13,8%, adotadas como referência para a moldagem dos corpos de prova submetidos à compressão simples. Tomando como base o solo não reforçado, com resistência média de 234 kPa, o reforço com geogrelha elevou a resistência à compressão simples em cerca de 36,75%, enquanto o geotêxtil proporcionou aumento aproximado de 8,54%.

Essa performance aprimorada, especialmente perceptível desde os estágios iniciais de deformação, valida o potencial dos geossintéticos para a estabilização de solos. Os resultados confirmam que tais reforços são capazes de conferir maior estabilidade e reduzir a deformabilidade do maciço sob carregamento axial, e demonstrando um impacto positivo na rigidez do solo em pequenas deformações, onde a resistência para 2% de deformação aumentou em aproximadamente 52% com a geogrelha e 64% com o geotêxtil em comparação com o solo não reforçado.

Os resultados deste estudo são de relevância para a engenharia geotécnica em Maceió e em regiões com solos de características similares, demonstrando que a utilização de geossintéticos, em particular a geogrelha, é uma solução eficaz para otimizar projetos geotécnicos e aumentar a capacidade de suporte de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (2016). NBR 7180. Solo – *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018). NBR 8044. *Projeto geotécnico - Procedimento*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). NBR ISO 10318-1. *Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições*. Rio de Janeiro.

CARVALHO, P A S e PEDROSA, J A B A e WOLLE, Claudio Michael. *Aterro eforçado com geotexteis: uma opção alternativa para a engenharia geotécnica*. 1986, Anais... São Paulo: Abms, 1986.

CASAGRANDE, A. *Research on the Atterberg Limits of Soils. Public Roads*, v. 13, n. 8, p. 121-130, 1932.

KOERNER, R. M. *Designing with Geosynthetics*. 6th ed. Xlibris Corporation, 2012.

MACCAFERRI. *E-8.2.2-605 – rev. 03: Especificação técnica – MacGrid NET*. Belo Horizonte: Maccaferri do Brasil, 2019. Disponível em: www.maccaferri.com.br . Acesso em: 20 abr. 2025.

Palmeira, E. M. (2009). *Uso de geossintéticos em obras geotécnicas: panorama atual e tendências*. 2ª edição. ABMS, 2009.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/25

Avaliação da Resistência de Interface Solo-Geomembrana e Multicamadas sob Altas Tensões Normais

Ana Laura Cassini Souza Bernardinelli
Engenheira de pesquisa de aplicação, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, laura.cassini@techground.com.br

André Coutinho Lima
Supervisor de Projetos, ALTA Geotecnia, Rio de Janeiro, Brasil, andre.lima@altageotecnia.com

Débora Toledo Vieira da Silva
Assistente de Engenharia, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, debora.toledo@techground.com.br

Daniel Moreno Meucci
Gerente de Engenharia, AzulPack TechGround, Jacutinga, Brasil, daniel.meucci@techground.com.br

RESUMO: A estabilidade de estruturas geotécnicas que incorporam sistemas de impermeabilização está diretamente relacionada ao comportamento mecânico das interfaces formadas entre geomembranas e os materiais adjacentes. A resistência ao cisalhamento mobilizada nessas interfaces resulta da interação entre as propriedades da geomembrana e as características do solo ou de outros geossintéticos em contato, sendo usualmente determinada por meio de ensaios laboratoriais específicos. Embora a literatura apresente diversos estudos sobre resistência de interface, muitos deles consideram faixas limitadas de tensões normais, o que pode reduzir a representatividade dos resultados frente às condições reais de campo. Em aplicações como aterros sanitários e pilhas de lixiviação, entretanto, as interfaces podem ser submetidas a níveis de tensão significativamente elevados, exigindo avaliações experimentais sob condições mais representativas. Neste contexto, este trabalho investigou a resistência de interface entre uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) bitexturizada, com espessura de 2,0 mm, solo compactado e geotêxtil não tecido. Ensaios de cisalhamento direto foram realizados em caixa de grandes dimensões (300 mm × 300 mm), conforme a ASTM D5321, considerando tensões normais entre 200 kPa e 800 kPa, em condições seca e saturada. Os resultados evidenciaram diferenças relevantes nos parâmetros de resistência definidos pelo critério de Mohr–Coulomb.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência de interface, Cisalhamento direto, Geomembrana PEAD Texturizada, Altas Tensões Normais.

ABSTRACT: The stability of geotechnical structures incorporating lining systems is strongly influenced by the mechanical behavior of interfaces formed between geomembranes and adjacent materials. The shear strength mobilized at these interfaces results from the interaction between the geomembrane properties and the characteristics of the soil or other geosynthetics in contact and is commonly determined through laboratory testing. Although numerous studies addressing interface shear strength are available in the literature, many investigations consider relatively limited ranges of normal stresses, which may reduce the representativeness of the results when compared to field loading conditions. In applications such as landfill liner systems and heap leach pads, however, interfaces may be subjected to significantly higher stress levels, requiring experimental evaluation under more representative loading conditions. In this context, this study investigated the interface shear strength between a double-sided textured high-density polyethylene (HDPE) geomembrane, 2.0 mm thick, compacted soil, and a nonwoven geotextile. Large-scale direct shear tests were conducted using a shear box measuring 300 mm × 300 mm in accordance with ASTM D5321, under normal stresses ranging from 200 kPa to 800 kPa and under both dry and saturated conditions. The results indicated significant differences in the shear strength parameters defined by the Mohr–Coulomb criterion.

KEYWORDS: Interface friction, Direct shear test, Textured HDPE geomembrane, High normal stresses.

1 INTRODUÇÃO

Geomembranas são comumente empregadas em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, atuando como barreiras destinadas a impedir a percolação do lixiviado para o solo de fundação. No Brasil, os aterros sanitários representam a principal forma de destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU), recebendo cerca de 61% do total gerado em 2022 (ABREMA, 2023). Esse panorama difere daquele observado em países com políticas mais consolidadas de gestão de resíduos. Na União Europeia, por exemplo, a disposição em aterros foi reduzida de 64% para 26% entre 1995 e 2015, acompanhada pelo aumento da reciclagem, compostagem e incineração (Scarlat et al., 2019). A elevada dependência de aterros sanitários no Brasil reforça a necessidade de projetos geotécnicos que garantam não apenas desempenho ambiental, mas também estabilidade estrutural adequada.

Nos sistemas de base do aterro, as geomembranas são frequentemente associadas a solos compactados e a outros geossintéticos, formando interfaces críticas do ponto de vista mecânico. A estabilidade global do maciço pode ser governada pelo comportamento dessas superfícies de contato, especialmente sob elevadas tensões normais. Assim, a resistência de interface constitui um dos parâmetros mais relevantes no dimensionamento de aterros sanitários e estruturas correlatas.

A resistência mobilizada na interface depende do deslocamento relativo entre os materiais em contato (Sánchez, 2018) e é influenciada tanto pelas características superficiais da geomembrana — como textura e processo de fabricação — quanto pelas propriedades do solo, incluindo granulometria, teor de umidade e grau de compactação (Costa Junior et al., 2023). Trata-se, portanto, de um parâmetro de natureza complexa e específico para cada combinação de materiais, não podendo ser definido exclusivamente com base em propriedades individuais.

Estudos internacionais evidenciam a importância dessa temática. Zhang et al. (2020), ao analisarem 62 deslizamentos em aterros sanitários em 22 países, identificaram que rupturas ao longo de interfaces associadas aos sistemas de impermeabilização representaram 11,28% dos casos avaliados. Esses dados demonstram que o comportamento das interfaces pode desempenhar papel determinante nos mecanismos de instabilidade.

Apesar da ampla utilização de ensaios de cisalhamento direto para determinação da resistência de interface, grande parte das pesquisas disponíveis concentra-se em tensões normais relativamente baixas, geralmente inferiores a 400 kPa. Entretanto, estruturas modernas, como células de grande altura e pilhas de lixiviação, estão sujeitas a níveis de carregamento significativamente superiores, demandando investigações experimentais sob condições mais representativas de campo.

Diante da escassez de estudos na literatura que abordem parâmetros de resistência de interface entre geomembranas e solos residuais argilosos do Vale do Paraíba Fluminense (RJ), o presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência de interface entre uma geomembrana texturizada e diferentes configurações de contato, considerando tensões normais variando entre 200 kPa e 800 kPa. Foram realizados três programas experimentais conforme a ASTM D5321, utilizando caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões (300 mm × 300 mm), além de ensaios de caracterização de uma argila residual da região. A adoção de elevadas tensões normais associada ao uso de amostras de grandes dimensões permite a obtenção de parâmetros mais representativos das condições de campo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Condições dos ensaios do programa experimental

2.1.1 Geomembrana

Para a campanha de ensaios, foi empregada a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura nominal de 2,0 mm, obtida por meio do processo de extrusão com matriz balão com todos os parâmetros atendendo à GRI-GM13 (2025). O material apresenta superfície texturizada em ambas as faces e os valores de altura de aspereza referentes aos três programas experimentais (GMB1, GMB2 e GMB3) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Altura de aspereza da Geomembrana (mm) - ASTM D7466.

Amostra	GMB 1	GMB 2	GMB 3
1	0,850	0,825	0,775
2	0,850	0,850	0,800
3	0,850	0,825	0,825
4	0,875	0,825	0,800

2.1.2 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma jazida associada a um aterro sanitário localizado no estado do Rio de Janeiro, na região Sul Fluminense, mais especificamente na microrregião do Vale do Paraíba Fluminense. Após a coleta, o material foi devidamente homogeneizado para garantir maior uniformidade nas amostras empregadas no programa experimental. A Figura 1 apresenta o solo após o processo de homogeneização, pronto para o início da execução dos ensaios, enquanto a Tabela 2 fornece a caracterização do solo segundo Lima (2025).



Figura 1. Solo proveniente da jazida do aterro sanitário após homogeneização, preparado para a execução dos ensaios (Lima, 2025).

Tabela 2. Características dos solos residuais argilosos.

Propriedades	Normativa	Solo
Distribuição de tamanho de partícula	NBR-7181	Argila inorgânica de alta plasticidade
Peso específico aparente seco máximo – $\gamma d,max$	NBR-7182	1,515 g/cm³
Umidade ótima – ωot	NBR-7182	25,4%
Limite de plasticidade – LP	NBR 7180	19%
Limite de liquidez – LL	NBR 6459	51%
Índice de plasticidade (IP)	NBR 7180/6459	32%

As tensões normais aplicadas nos ensaios de cisalhamento direto solo–solo foram de 50 kPa, 150 kPa, 225 kPa e 300 kPa. Os resultados dos ensaios também foram apresentados por Lima (2025). A partir de amostras compactadas na umidade ótima e na massa específica seca máxima, os corpos de prova foram extraídos diretamente do cilindro do ensaio de compactação Proctor Normal e posicionados na caixa de cisalhamento. Foram analisadas duas condições de contorno: (1) solo compactado na umidade ótima e (2) solo compactado na umidade ótima submetido à inundação por 24 horas, com o objetivo de simular uma possível condição de saturação.

A relação tensão cisalhante–tensão normal, os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto solo–solo são, para a resistência do solo compactado na umidade ótima, ângulo de atrito de interface de 25,4° e uma adesão de 28,4 kPa e para o solo compactado na umidade ótima submetido à inundação por 24 horas, ângulo de atrito de interface de 27,7° e uma adesão de 13,5 kPa. Maiores detalhes e informações são apresentados em Lima (2025).

2.1.3 Geotêxtil

Em relação ao geotêxtil utilizado em uma das combinações de interface, o mesmo é um geotêxtil não tecido de poliéster, com gramatura igual ou superior a 700 g/m². O material foi fornecido por um fabricante e

utilizado com o objetivo de representar uma condição usual em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, nos quais o geotêxtil atua como camada de proteção da geomembrana.

2.2 Condições dos ensaios do programa experimental

Para a realização dos ensaios de cisalhamento de interface entre solo e geomembrana e de múltiplas camadas (solo, geomembrana e geotêxtil) foi utilizada uma caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões, especialmente projetada para investigações envolvendo interfaces solo–geossintético, conforme a norma ASTM D5321. O equipamento apresenta área efetiva de cisalhamento de 300 mm × 300 mm e é equipado com atuadores de alta capacidade, capazes de aplicar e controlar tensões normais elevadas, compatíveis com aquelas verificadas em obras geotécnicas de grande porte, como pilhas de lixiviação, células de aterros sanitários e estruturas de contenção.

Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios do TRI, localizados na Califórnia (EUA). O sistema da caixa de cisalhamento direto conta com controle automatizado de carregamento, o que possibilita maior estabilidade das condições experimentais, elevada repetibilidade e maior confiabilidade dos resultados. Adicionalmente, o equipamento permite a realização de ensaios sob diferentes condições de contorno, ampliando a representatividade dos parâmetros de resistência de interface obtidos. Foram realizados três programas experimentais de cisalhamento de interface, considerando tensões normais de 200, 400 e 800 kPa, cujas configurações são apresentadas a seguir.

(1) Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição seca:

- Velocidade de cisalhamento: 1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com grau de compactação correspondente a 95% do Proctor padrão;
- Condicionamento: ensaio realizado em condição seca, com aplicação da tensão normal por 1 hora antes do início do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

(2) Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

- Velocidade de cisalhamento: 0,1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com 95% de compactação Proctor padrão;
- Condicionamento: após a aplicação da tensão normal, a interface permaneceu inundada por 24 horas antes da realização do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

(3) Solo compactado – geotêxtil não tecido (fixado) vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada

- Velocidade de cisalhamento: 0,1 mm/min;
- Solo compactado na umidade ótima, com grau de compactação de 80% do Proctor padrão;
- Condicionamento: após a aplicação da tensão normal, a interface foi mantida inundada por um período de 24 horas antes do cisalhamento;
- Deslocamento máximo do ensaio: 76,2 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada condição dos ensaios do programa experimental são apresentados e discutidos os resultados.

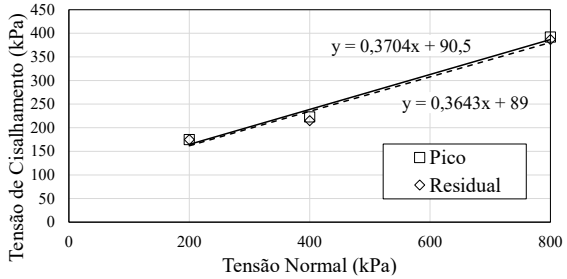
3.1 Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição seca:

Para este ensaio, foi utilizada a interface composta por solo local compactado e geomembrana de PEAD texturizada com espessura de 2,0 mm, em condição seca. O condicionamento consistiu na aplicação da carga normal por um período de 1 hora antes do início do cisalhamento. O ensaio foi conduzido com velocidade de cisalhamento de 1,0 mm/min, adotada com base nas características do solo e nas condições do ensaio, buscando-se um comportamento predominantemente drenado.

A adoção de 95% do grau de compactação do Proctor Normal teve como objetivo assegurar a representatividade das condições reais de obra, uma vez que compactações mais elevadas tendem a não ser

alcançadas de forma homogênea em campo e podem resultar em parâmetros de resistência de interface artificialmente elevados.

A Figura 2a. apresenta a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 20,3° e uma adesão de 90,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 20° e uma adesão de 89 kPa. Os parâmetros de resistência de pico e residual apresentaram valores próximos, reduzindo a sensibilidade das análises à escolha do critério resistente. A Figura 2b. apresenta individualmente cada tensão normal a resistência de interface e a secante do ângulo.



(a)

	Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico	Tensão de Cisalhamento (kPa)	175	223	392
	Angulo Secante (deg.)	41,1	29,1	26,1
Residual	Tensão de Cisalhamento (kPa)	175	215	387
	Angulo Secante (deg.)	41,1	28,3	25,8

(b)

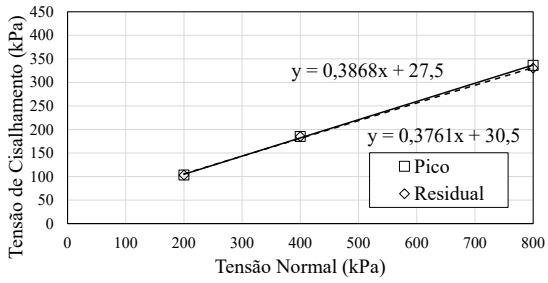
Figura 2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (1): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Conforme esperado, o aumento da tensão normal resultou em incremento da resistência ao cisalhamento na interface. Observou-se, entretanto, uma redução progressiva do ângulo de atrito secante com o aumento da tensão normal, evidenciando o efeito da adesão, que implica em comportamento não linear típico de interfaces solo–geomembranas texturizadas sob elevados níveis de carregamento. Tomando como referência a condição de 200 kPa, verificaram-se reduções relativas do ângulo de atrito secante da ordem de 30% e 35% para tensões normais de 400 kPa e 800 kPa, respectivamente. Ainda que a tensão normal tenha sido aumentada em aproximadamente 100% e 300% em relação à condição de referência, a redução do ângulo de atrito secante mostrou-se relativamente moderada, indicando que a capacidade resistente da interface permanece elevada mesmo sob níveis de carregamento significativamente superiores.

3.2 Solo compactado vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

No programa experimental (2), avaliou-se a interface entre solo local compactado e geomembrana de PEAD texturizada, com espessura de 2,0 mm, sob condição inundada. Antes do início do cisalhamento, a carga normal foi aplicada e mantida por um período de 24 horas, com a interface completamente inundada, de modo a permitir a acomodação do sistema e a dissipação de pressões neutras. O cisalhamento foi realizado a uma taxa de deslocamento de 0,01 mm/min, definida em função das propriedades do solo e das condições do ensaio, visando a obtenção de um comportamento predominantemente drenado.

O grau de compactação adotado, correspondente a 95% do Proctor Normal, assim como no programa experimental anterior, foi selecionado com o propósito de reproduzir condições típicas de campo, uma vez que níveis mais elevados de compactação dificilmente são alcançados de forma uniforme durante a execução das obras e podem conduzir à superestimação dos parâmetros de resistência de interface. A Figura 3a. ilustra a variação da tensão cisalhante em função da tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 21,1° e uma adesão de 27,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 20,6° e uma adesão de 30,5 kPa. Assim como realizado para o ensaio (1), a Figura 3b. apresenta, de forma individualizada, os valores de resistência de interface e da secante do ângulo de atrito correspondentes a cada nível de tensão normal analisado.



(a)

		Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico		Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	336
		Angulo Secante (deg.)	27,3	24,8	22,4
Residual		Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	330
		Angulo Secante (deg.)	27,2	24,8	22,4

(b)

Figura 3. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (2): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Para as condições de ensaio (1) e (2), observou-se que, embora no ensaio (1) o solo tenha sido disposto na caixa superior em condição seca, com aplicação da carga normal por apenas 1 hora antes do cisalhamento, e no ensaio (2) a interface tenha sido mantida inundada por 24 horas, com adoção de uma velocidade de cisalhamento significativamente menor, os valores dos ângulos de atrito de pico e residual apresentaram magnitudes semelhantes em ambas as condições.

Por outro lado, verificou-se uma redução significativa da adesão na condição (2), inundada e conduzida com baixa velocidade de cisalhamento, sendo o valor aproximadamente 65% inferior àquele obtido na condição (1). Do ponto de vista físico, a inundação promove a eliminação da sucção matricial e reduz os mecanismos de engrenamento mecânico inicial entre o solo e a geomembrana, resultando em menores valores de adesão, enquanto o atrito de interface permanece como o principal mecanismo resistente.

Sob a ótica da estabilidade de taludes, esses resultados indicam que, mesmo em condição inundada e sob parâmetros de ensaio mais conservadores, o comportamento resistente da interface solo–geomembrana permanece predominantemente governado pelo atrito, com valores de ângulo de atrito relativamente estáveis entre as condições analisadas. Apesar da redução observada na adesão na condição inundada, o valor segue significativo, isto é, próximo a 46 kPa. Além disso, para tensões normais mais elevadas, onde a parcela de resistência mobilizada pelo ângulo de atrito passa a ser preponderante, os resultados encontrados são próximos ao verificado em (1). Nesse contexto, a proximidade entre os parâmetros de resistência de pico e residual aliada à predominância do atrito de interface, reduz a sensibilidade das análises de estabilidade à escolha do critério resistente, resultando em avaliações mais robustas e seguras para o dimensionamento de taludes em obras geotécnicas que incorporam sistemas de impermeabilização.

Para o ensaio (2), tomando como referência a condição de 200 kPa, observou-se que o ângulo de atrito secante manteve aproximadamente 90% e 80% do valor de referência para tensões normais de 400 e 800 kPa, respectivamente. Ainda que a tensão normal tenha sido aumentada em aproximadamente 100% e 300% em relação à condição de referência, a redução do ângulo de atrito secante mostrou-se relativamente pequena, indicando que a capacidade resistente da interface permanece elevada, mesmo sob níveis de carregamento significativamente superiores.

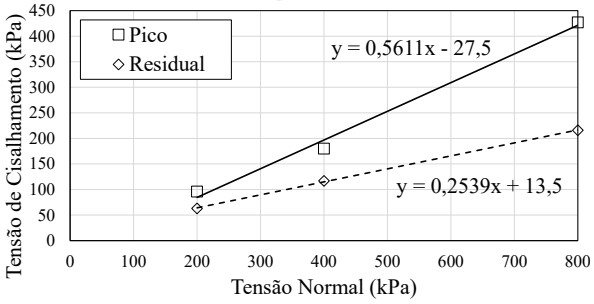
3.3 Solo compactado – geotêxtil não tecido (fixado) vs. geomembrana de PEAD Texturizada 2 faces – condição saturada:

No programa experimental (3), avaliou-se a interface composta por solo local compactado, geotêxtil não tecido de PET com gramatura de 700 g/m² e geomembrana de PEAD texturizada, com espessura de 2,0 mm, sob condição inundada. O ensaio foi montado com o solo local e o geotêxtil não tecido fixado ao solo na caixa superior do equipamento de cisalhamento direto, enquanto a geomembrana foi posicionada na caixa inferior.

Antes do início do cisalhamento, a carga normal foi aplicada e mantida por um período de 24 horas, com a interface completamente inundada, de modo a permitir a acomodação do sistema e a dissipação de pressões neutras. O cisalhamento foi realizado a uma taxa de deslocamento de 1,0 mm/min, definida em função das propriedades do solo e das condições do ensaio, visando a obtenção de um comportamento predominantemente drenado.

O grau de compactação de 80% do Proctor Normal foi adotado por representar condições de campo menos controladas, as quais podem resultar na superestimação da resistência de interface.

A Figura 4a. ilustra a variação da tensão cisalhante em função da tensão normal obtida nos ensaios realizados, incluindo envoltórias para a resistência de pico com um ângulo de atrito de interface de 29,3° e uma adesão de 27,5 kPa e residual com um ângulo de atrito de interface de 14,2° e uma adesão de 13,5 kPa para a condição de ensaio (3). A Figura 4b. apresenta individualmente cada tensão normal a resistência de interface e a secante do ângulo.



(a)

	Tensão Normal (kPa)	200	400	800
Pico	Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	336
	Angulo Secante (deg.)	27,3	24,8	22,4
Residual	Tensão de Cisalhamento (kPa)	103	185	330
	Angulo Secante (deg.)	27,2	24,8	22,4

(b)

Figura 4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do programa experimental (3): (a) Relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal; (b) Resistência de interface e ângulo de atrito secante determinados para diferentes níveis de tensão normal.

Na condição de ensaio (3), observou-se um comportamento distinto em relação às condições (1) e (2). Os resultados indicaram que o ângulo de atrito de pico foi aproximadamente 45% superior àquele obtido na condição (1) e 40% superior ao obtido na condição (2). Esse aumento é atribuído ao efeito de intertravamento mecânico (“efeito velcro”) entre o geotêxtil não tecido e a geomembrana texturizada.

Em contrapartida, o ângulo de atrito residual apresentou valores cerca de 30% inferiores aos observados nas condições (1) e (2). Esse comportamento pode ser associado à migração de água e partículas finas do solo para a interface geotêxtil–geomembrana, formando uma camada de material fino (lama) que reduz progressivamente o atrito mobilizado durante o cisalhamento contínuo.

Os valores de adesão, tanto no pico quanto residual, mostraram-se baixos. No pico, foram semelhantes aos da condição (2), enquanto no residual foram aproximadamente 55% inferiores. Esse comportamento pode ser atribuído à menor compacidade do solo, ao condicionamento sob carga normal com inundação e, adicionalmente, pelo efeito da migração de água e solo fino para a interface geotêxtil–geomembrana.

Ressalta-se um aumento considerável da adesão do pico para a condição residual, provavelmente em função do incremento da carga normal, que favoreceu o aumento do atrito mobilizado na interface geotêxtil–geomembrana.

Para o programa experimental (3), o aumento da tensão normal resultou em incremento da resistência ao cisalhamento da interface, especialmente para 800 kPa. Em relação ao ângulo de atrito secante de pico, não se observou uma tendência decrescente com o aumento de σ_n. Tomando como referência 200 kPa (φsec,pico = 25,6°), os valores obtidos foram 24,3° em 400 kPa (aproximadamente 95% do valor de referência), e 28,1° em 800 kPa (cerca de 110% do valor de referência). Esse comportamento sugere influência de efeitos de adensamento e rearranjo do sistema multicamada sob diferentes níveis de confinamento, associados ao menor grau de compactação adotado (80% do Proctor Normal).

Por outro lado, para a condição residual, observou-se uma redução progressiva do ângulo de atrito secante com o aumento da tensão normal. Em relação à condição de 200 kPa, os valores corresponderam a aproximadamente 94% em 400 kPa e 87% em 800 kPa. Essa tendência é compatível com a degradação do intertravamento mecânico e/ou com a migração de água e partículas finas para a interface geotêxtil–geomembrana ao longo do cisalhamento, o que tende a reduzir o atrito mobilizado em grandes deslocamentos.

4 CONCLUSÕES

De forma geral, os resultados evidenciam que o comportamento resistente das interfaces avaliadas é fortemente influenciado pela configuração do sistema e pelas condições de ensaio. Para as condições (1) e (2),

a ruptura por cisalhamento ocorreu consistentemente na interface solo–geomembrana, indicando que essa interface controla o mecanismo de instabilidade sob as condições analisadas. Já na condição (3), a presença do geotêxtil não tecido alterou o plano de ruptura, que passou a ocorrer sistematicamente na interface geomembrana–geotêxtil, independentemente do nível de tensão normal aplicado, caracterizando essa interface como o plano crítico de deslizamento do sistema multicamada.

Os resultados dos ensaios (1) e (2) apresentaram boa concordância, tanto para os valores de pico quanto para os valores residuais. O ensaio (3), por outro lado, apresentou ao mesmo tempo os menores e maiores valores entre as interfaces estudadas, respectivamente para residual e pico.

Esses resultados demonstram que a introdução de geotêxteis pode aumentar a resistência inicial da interface por efeito de engrenamento mecânico, porém o comportamento residual e a identificação da interface crítica permanecem fundamentais para análises de estabilidade e dimensionamento seguro de sistemas de impermeabilização em obras geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão à AzulPack Techground e à Alta Geotecnia pelo fornecimento dos materiais utilizados neste estudo. Agradecem, ainda, ao laboratório TRI Ambiental pela elaboração dos relatórios de ensaio e pelo suporte técnico prestado ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solos - Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solos - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solos - Ensaio de compactação (método Proctor)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*. São Paulo.

ASTM International (2021). ASTM D5321: *Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method*.

ASTM International (2023). ASTM D7466: *Standard test method for measuring the large-scale direct shear interface shear strength between geomembranes and geosynthetic clay liners*.

Costa Junior, S. L., Ardila, M. A. A., Palomino, C. F., Silva, J. L. (2023) Analysis of textured geomembrane–soil interface strength to mining applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (3).

Geosynthetic Research Institute (2025). GRI - GM13: *Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*.

Lima, A. C. (2025) *Resistência de Interface Geomembrana Texturizada-Argila em Aterro Sanitário no Sul Fluminense, RJ*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

Sánchez, N. P. (2018) *Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília (UnB), Brasília.

Scarlat, N., Fahl, F., Dallemand, J. F. (2019) Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe. *Waste Biomass Valorization*, 10, p. 2425-2444.

Zhang, Z., Wang, Y., Fang, Y., Pan, X., Zhang, J., Xu, H. (2020) Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. *Waste Management & Research*, 38, p. 1389-1404.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/26

Caracterização Sazonal das Variáveis Climáticas para Avaliação da Degradação de Geotêxteis Tecidos em Barreiras na Bahia

Eduarda Calado Da Silva
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, eduarda.s0909@ufob.edu.br

Sofia Oliveira Carvalho Bulhões
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sofia.b0972@ufob.edu.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: Os geossintéticos quando aplicados no campo estão sujeitos à ação das variáveis climáticas que atuam como agentes degradantes e podem comprometer suas propriedades físicas e mecânicas. Por isso, é fundamental compreender os impactos dos efeitos do clima na degradação do material, a fim de garantir sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo. O objetivo deste artigo é caracterizar e estimar, de forma isolada, o impacto das variáveis na degradação durante as quatro estações do ano na cidade de Barreiras, Bahia. Para isso, foram coletados dados de temperatura, radiação solar e pluviometria do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) durante um ano, além de medições de temperaturas em amostras de geotêxteis expostas em painéis inclinados em campo, coletadas durante 24 horas nos dias de transição das estações. Os resultados obtidos demonstraram elevado índice de radiação durante todo o ano, maior pluviosidade durante a primavera e mínima durante o inverno, além de temperaturas médias mais elevadas durante o inverno. A análise mostrou que o principal agente degradante do geotêxtil na região será a radiação ultravioleta, sendo os períodos mais críticos durante a primavera e o inverno, quando é combinada com os fatores de maior precipitação e maiores temperaturas, respectivamente. Sendo assim, a caracterização sazonal das variáveis climáticas na cidade de Barreiras permite, durante o dimensionamento dos projetos de clima de savana, a escolha do material geotêxtil adequado que melhor se adapte às condições mais intensas identificadas.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxteis, Degradação, Radiação UV, Caracterização.

ABSTRACT: Geosynthetics, when applied in the field, are subject to the action of climatic variables that act as degrading agents and can compromise their physical and mechanical properties. Therefore, it is essential to understand the impacts of climate effects on material degradation in order to guarantee its durability and performance over time. The objective of this article is to characterize and estimate, in isolation, the impact of variables on degradation during the four seasons of the year in the city of Barreiras, Bahia. To this end, temperature, solar radiation, and rainfall data were collected from the website of the National Institute of Meteorology (INMET) for one year, in addition to temperature measurements on geotextile samples exposed on inclined panels in the field, collected over 24 hours on the days of seasonal transition. The results obtained showed a high radiation index throughout the year, higher rainfall during the summer and minimum rainfall during the spring, as well as higher average temperatures during the winter. The analysis showed that the main degrading agent of geotextiles in the region is ultraviolet radiation, with the most critical periods being spring and winter, when combined with higher rainfall and higher temperatures, respectively. Therefore, the seasonal characterization of climatic variables in the city of Barreiras allows, during the design of savanna climate projects, the selection of the appropriate geotextile material that best adapts to the most intense conditions identified.

KEYWORDS: Geotextiles, Degradation, UV Radiation, Characterization.

1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos são materiais poliméricos que têm sido empregados em larga escala na engenharia civil, em especial na engenharia geotécnica, apresentando grande variedade de tipos, espessuras e texturas que possibilita sua aplicação em diferentes contextos de engenharia. De modo geral, apresentam custo relativamente acessível e que garantem a estabilidade e a integridade dos solos, sendo utilizados em sistemas de contenção, reforço, entre outros.

Dentre os diversos tipos de geossintéticos existentes, destacam-se os geotêxteis, que podem ser classificados como tecidos, não tecidos ou tricotados, sendo fabricados principalmente a partir de polímeros como polipropileno (PP) e poliéster (PET). Esses materiais podem receber a adição de estabilizantes e aditivos específicos que visam melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, bem como retardar os processos de degradação, os quais ocorrem, principalmente, devido a reações químicas com o meio no qual estão inseridos (GREENWOOD *et al.*, 2016).

A intensidade e os mecanismos de degradação, aos quais os geotêxteis estão sujeitos, dependem diretamente do ambiente de aplicação. Em muitas situações, esses materiais permanecem enterrados e em contato apenas com o solo, condição na qual a degradação tende a ocorrer de forma mais lenta. No entanto, em aplicações em que os geossintéticos permanecem permanentemente expostos aos agentes climáticos — como em reservatórios de irrigação e canais — observa-se um aumento significativo na taxa de degradação. Sob essas condições, a incidência direta de radiação solar, aliada à ação da chuva e às variações térmicas, há o aceleramento de reações químicas associadas ao envelhecimento e desgaste dos polímeros, como a foto-oxidação (DIAS FILHO *et al.*,2024).

A radiação ultravioleta (UV) é um dos principais agentes de agressividade aos geossintéticos, uma vez que causa a foto-oxidação dos polímeros, especialmente na camada superficial, ocasionando redução significativa das propriedades mecânicas até mesmo de materiais com aditivos estabilizantes contra radiação UV (CARNEIRO e LOPES, 2022). Além disso, a absorção da radiação solar provoca a elevação da temperatura no local. A presença de umidade combinada com essas temperaturas elevadas pode ainda intensificar outros mecanismos de degradação, como reações de hidrólise e processos oxidativos.

O principal desafio da exposição de geotêxteis às intempéries é a dificuldade de prever a vida útil do material em condições reais de campo. Embora estes materiais sejam projetados para suportar a exposição ambiental no curto período de tempo da instalação, a expectativa de desempenho ao longo de vários anos envolvem fatores complexos que podem influenciar esta durabilidade. Cada localidade está sujeita à características climáticas típicas — como níveis de radiação solar, regimes de precipitação, variações de temperatura e umidade — que quando combinadas, podem promover ataques de diferentes intensidades aos materiais, os quais respondem de maneira distinta em função de suas características próprias de composição, estrutura e a presença de aditivos estabilizantes (DIAS FILHO e SILVA, 2025).

A cidade de Barreiras, localizada no Oeste da Bahia é conhecido pelo clima ensolarado na maior parte do ano, além de contar com diversos períodos de chuvas intercalados com estações de baixa umidade relativa do ar, condições que favorecem a exposição contínua dos geossintéticos aos agentes climáticos.

Dessa forma, as características climáticas da região tornam-se propícias para o aceleramento da degradação dos materiais poliméricos utilizados, os quais permanecem em sua maioria, expostos de maneira permanente às condições climáticas. Cenário esse que, pode comprometer o desempenho das obras em que estão aplicados. Dessa maneira, o objetivo deste artigo é caracterizar sazonalmente o comportamento climático da região ao longo do ano, identificando os períodos mais agressivos à durabilidade dos geotêxteis, de modo a fornecer materiais técnicos para dimensionamentos de projetos e para a escolha dos materiais geotêxteis que mais se adequem às condições climáticas locais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a execução do experimento foram utilizados quatro tipos de geotêxteis não tecidos, com variações quanto ao tipo de polímero, à cor e à gramatura (massa por unidade de área). A Tabela 1 sintetiza as principais características dos materiais utilizados, cujos números correspondem à gramatura nominal em g/m².

Tabela 1. Descrição dos tipos de geotêxtil

Tipo	Cor	Espessura (mm)
PET 340	Preto	0,51±0,02
PET 740	Preto	1,53±0,04
PP 500	Branco	1,17±0,01
PP 925	Branco	2,62±0,06

Para fixação das amostras foi utilizado como base de apoio painéis de compensado de madeira de 1,95 m x 1,24 m sobre uma estrutura de metal para apoio. E, para realização das medições de temperatura das amostras, da superfície do painel e da temperatura ambiente, utilizou-se um termômetro de laser infravermelho digital com precisão de ±0.1ºC e faixa de temperatura de -50ºC a 400ºC.

2.2 Métodos

O ensaio foi realizado nas imediações do campus da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) localizado na cidade de Barreiras, no estado da Bahia, com latitude de 12º09'10" ao Sul e longitude de 44º59'24" a Oeste. Inicialmente, as amostras foram cortadas nas dimensões de 20 cm X 20 cm e fixadas no painel de madeira com grampos de metal como ilustrado na Figura 1.



Figura 1. Painel de exposição dos geotêxteis.

O painel foi posicionado de acordo com as instruções das normas ISO 677-1 e ISO 677-2, que especificam os métodos para exposição à radiação solar de amostras de geossintéticos. Dessa maneira, foi executada uma exposição usando o Método A, com o painel inclinado à mesma latitude da cidade (12º09'10") e de frente para a linha do equador, a fim de que, as amostras recebessem máxima radiação solar anual total.

Os testes foram realizados durante o período de um ano de 21/12/2024 a 20/12/2025. Durante os dias das mudanças de estações foram realizadas leituras da temperatura dos geotêxteis, da mesa do painel de degradação e do ambiente ao longo de 24 horas. Foram realizadas três aferições de cada um dos quatro tipos de geotêxteis e do painel para obter a média das temperaturas, além de verificação de ocorrência de nuvens e precipitação no momento da aferição.

Para obtenção dos dados de pluviometria, radiação solar total e temperatura ao longo de todos os dias do o ano, foram utilizados os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais serviram de base para determinação do perfil climático sazonal no decorrer do ano na localidade estudada. Cada dia contempla 24 dados para cada variável climática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das temperaturas

As temperaturas tomadas durante as medições de cada começo de estação foram plotadas juntamente com a temperatura média local do ambiente durante o período de experimento para comparação, conforme ilustrada nas Figuras 2 a 5.

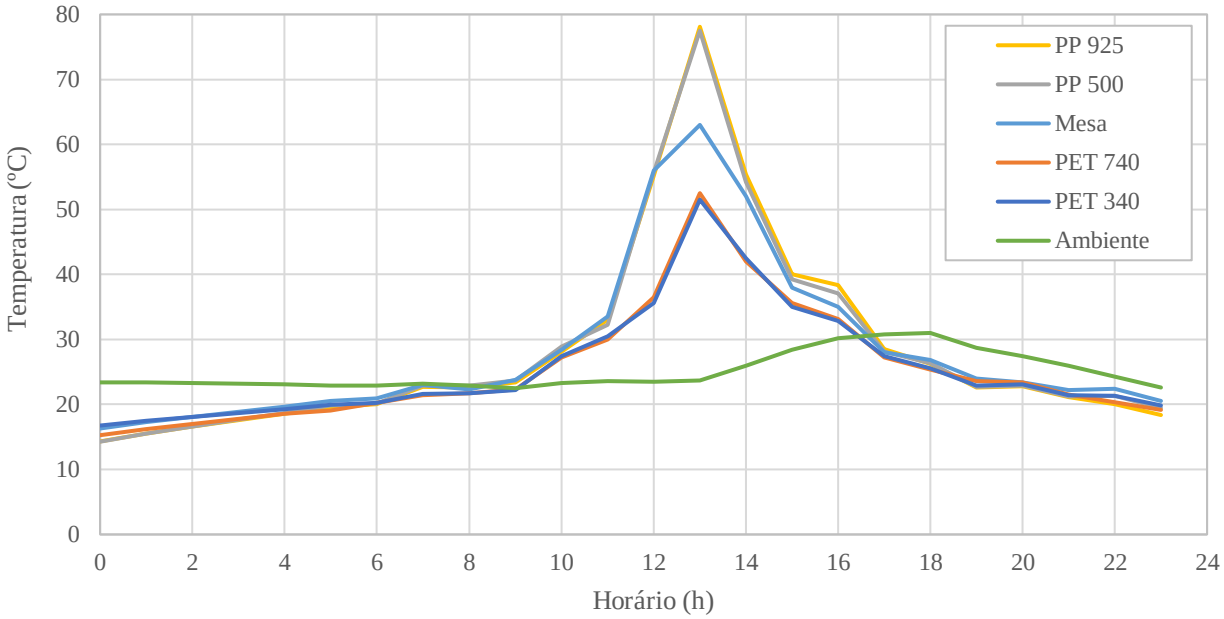


Figura 2. Temperaturas da mudança de estação Verão/Outono em 20/03/2025

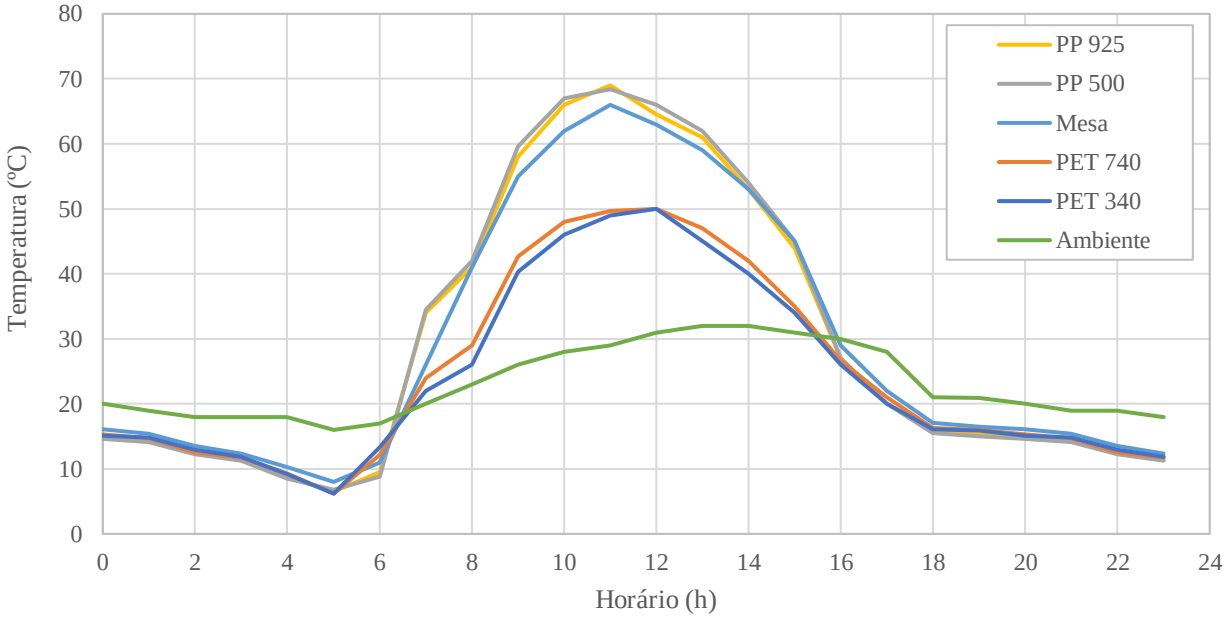


Figura 3. Temperaturas da mudança de estação Outono/Inverno em 20/06/2025

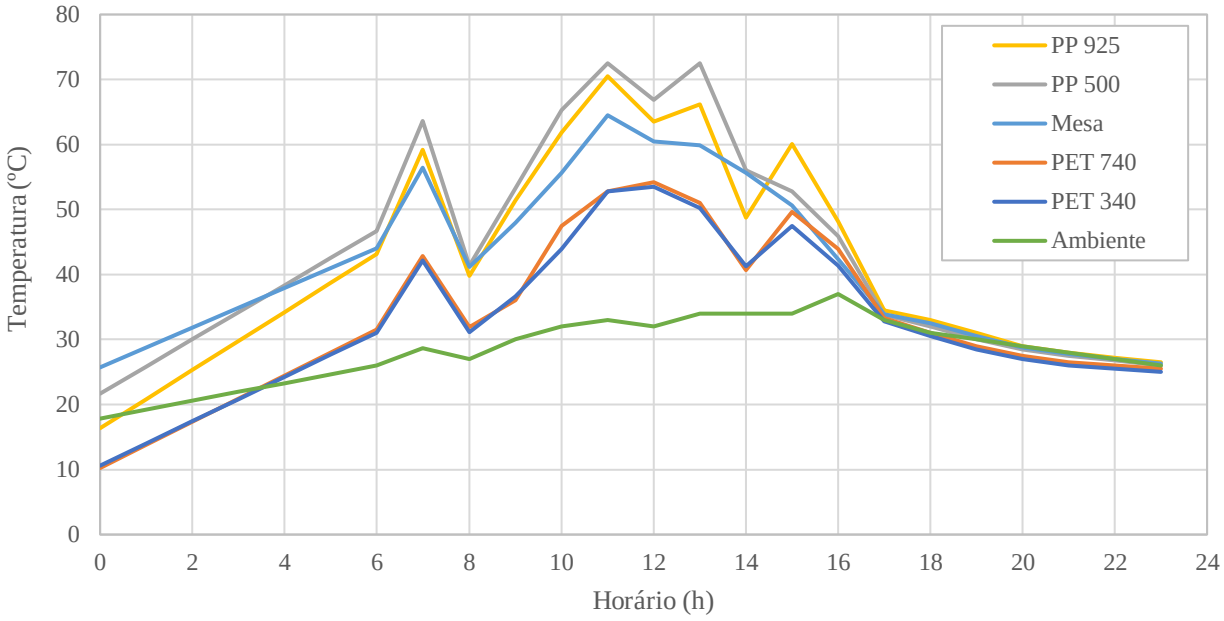


Figura 4. Temperaturas da mudança de estação Inverno/Primavera em 22/09/2025

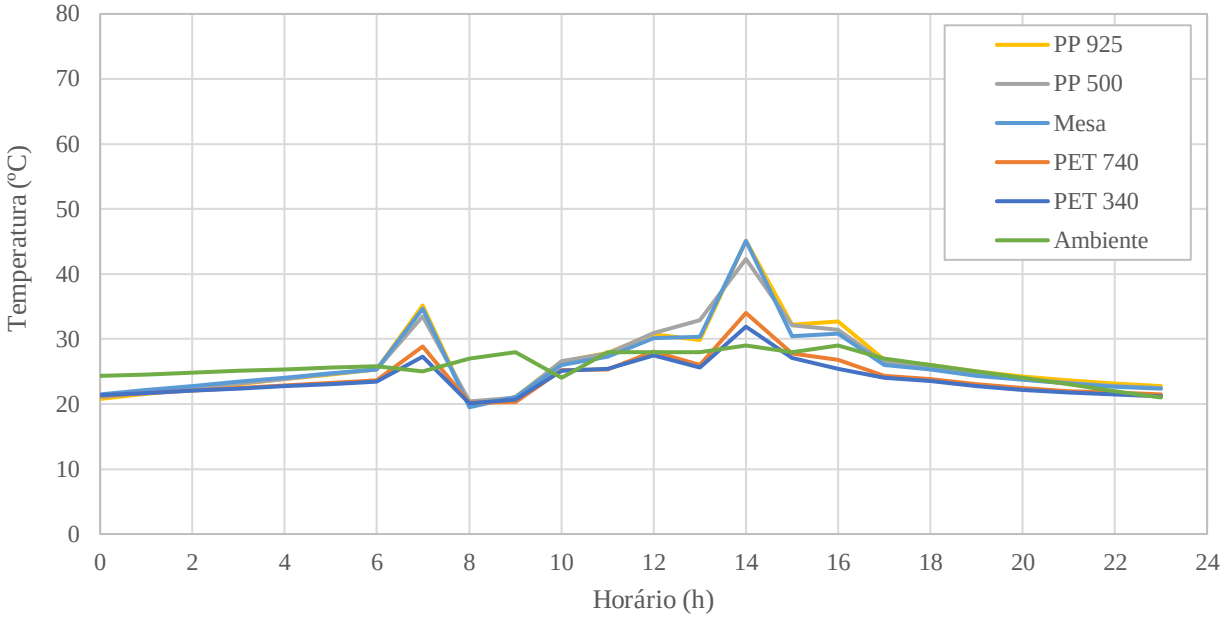


Figura 5. Temperaturas da mudança de estação Primavera/Verão em 21/12/2025

No início das estações outono e verão, respectivamente nos dias 20/03 e 21/12, houve ocorrência de precipitação, o que pode ser observado pelas quedas bruscas de temperatura apresentadas nos gráficos. No dia 20/03, registrou-se chuva nos períodos das 8h às 10h e 14h às 17h, enquanto no dia 21/12 a precipitação ocorreu entre 8h e 10h.

No dia 20/06/2025, correspondente ao início do inverno, não houve registro de precipitação, fato evidenciado pelo formato contínuo da curva de temperatura. Já no dia 22/09/2025, primeiro dia da primavera, observou-se condição de céu nublado por volta das 14h, o que justifica a queda brusca de temperatura registrada nesse horário.

As temperaturas mais altas são frequentemente observadas entre as 12h e as 13h da tarde, enquanto que, as mais baixas ocorrem durante o período da madrugada por volta da 00h. Devido a esse comportamento, as amplitudes térmicas nos geotêxteis durante os dias 20/03 e 20/06 chegam a quase 70ºC. Já nos dias 22/09 e 21/12 as amplitudes térmicas foram menores, até 50ºC.

Entre as amostras utilizadas é evidente que, as de mesmo material possuem absorção de energia similar apesar das diferentes espessuras utilizadas. Esse resultado evidencia que a espessura do material não influencia na temperatura de superfície que estes podem alcançar, e sim a coloração, uma vez que, a cor preta absorve mais calor do que a cor branca, como é notório pelas diferenças de temperatura entre os PPs e os PETs ao longo do dia e como evidenciado também por Bernardinelli, Meucci e Abdalla (2025).

3.2 Caracterização sazonal das variáveis climáticas

A partir dos dados gerais retirados do INMET, foi possível determinar uma média dos parâmetros de cada estação para análise individual e para formação do perfil geral das condições climáticas da cidade no decorrer do ano. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo variáveis climáticas por estação do ano

Estação	Precipitação Acumulada (mm)	Dias de precipitação (un)	Radiação mensal máxima (MJ/m²)	Radiação acumulada total (GJ/m²)	Umidade média (%)	Temperatura média (ºC)
Verão	349,4	40,0	668,5	0,15	66,2	23,9
Outono	134,6	24,0	587,4	0,13	68,9	24,6
Inverno	0,0	0,0	651,1	0,14	44,5	26,1
Primavera	560,2	40,0	675,7	0,14	65,2	21,7

A radiação acumulada total se trata da radiação ultravioleta, que corresponde a 7,5% da radiação solar que incide sobre a superfície terrestre segundo as recomendações da ISO/TS 13434. A análise das informações da Tabela 2 demonstram um índice de radiação UV praticamente contínua e elevada durante todo o ano na cidade, mesmo durante os períodos com maior precipitação ou de temperaturas mais frias.

Com relação à precipitação, o inverno demonstrou ser a estação mais seca do ano sem nenhuma ocorrência de chuvas, além de apresentar a menor umidade entre as quatro estações. Para além disso, surpreendentemente, foi a estação com a maior média de temperatura, alcançando os 26,1ºC, e superando estações tipicamente mais quentes como o verão.

Já o verão e a primavera foram as estações com maior precipitação e, além de apresentarem a mesma quantidade de dias com chuva, possuem valores aproximados para as demais variáveis sendo períodos majoritariamente quentes com muitos dias chuvosos o que resulta nas maiores amplitudes térmicas médias.

4 CONCLUSÕES

A caracterização sazonal da cidade evidencia que a elevada incidência de radiação solar ao longo de todo o ano constitui o principal agente de agressividade da região, principalmente durante o período do inverno por ser uma estação seca. Observa-se que a ausência de precipitação e a maior temperatura média, em associação com a elevada radiação ultravioleta incidente, constrói o cenário mais propício para a degradação por foto-oxidação.

Alternativamente, na primavera e no verão, devido à combinação entre elevada radiação, ciclos térmicos e alta umidade, há o favorecimento de mecanismos que ocasionam a formação de um ambiente de degradação multifatorial. Este tipo de ambiente favorece a ocorrência de processos de molhagem e secagem, ciclos térmicos e sistemas oxidativos combinados que enfraquecem e prejudicam o desempenho mecânico adequado do material.

Com a integração dos dados da caracterização sazonal e das medições térmicas dos geotêxteis avaliados, fica claro que colorações mais escuras para os materiais absorvem mais calor e alcançam maiores temperaturas em sua superfície, favorecendo os maiores gradientes térmicos e, consequentemente, sujeitos a degradação

mais intensa. Entretanto, não é possível chegar a respostas conclusivas quanto a comparação de degradação dos diferentes materiais (PET e PP) sem que se realize um ensaio de resistência mecânica que será desenvolvido em outro artigo.

Em suma, os resultados encontrados indicam que a região apresenta condições climáticas propícias ao envelhecimento acelerado de materiais poliméricos, reforçando a necessidade de seleção criteriosa de geotêxteis com adequada estabilização frente às condições locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP e à UFOB pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardinelli, A. L. C. S.; Meucci, D. M.; Abdalla, V.P.F. (2025). Analysis of surface temperatures and expansion behavior in HDPE and LLDPEgeomembranes with different surfaces in field applications. *GEOASIA8*. 2026.

Carneiro, J. R., Morais, M. & Lopes, M. L. (2022). *Weathering of a nonwoven polypropylene geotextile: field vs. laboratory exposure*. Materials, 15, No. 22, 8216, https://doi.org/10.3390/ma15228216.

Dias Filho, J. L. E.; Silva, J. L. (2025). Estudo da durabilidade de geossintéticos. *Avanços recentes em Ciências da Engenharia*. São Carlos: v. 1. 255p, p. 80-102. http://dx.doi.org/10.11606/9786586954524.

Dias Filho, J. L. E., Silva, J. L., Valentin, C. A., Fleury, M. P., Aparicio-Ardila, M. A., Vidal, D. M. and Costa, C. M. L. (2024). *Natural weathering effects of nonwoven geotextile exposed to different climate conditions*. Geosynthetics International. [https://doi.org/10.1680/jgein.23.00156]

Greenwood, J.H.; Schroeder, H.F.; Voskamp, V. *Durability of Geosynthetics*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (2026). Disponível em: http://www. inmet.gov.br (Acesso em 5 de Fevereiro de 2026)

ISO (International Organization for Standardization) (2009a). *ISO 877-1:2009: Plastics – Methods of Exposure to Solar Radiation – Part 1: General Guidance*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO (2009b). *ISO 877-2:2009: Plastics – Methods of Exposure to Solar Radiation – Part 2: Direct Weathering and Exposure Behind Window Glass*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO (2020).*ISO/TS 13434:2020: Geosynthetics – Guidelines for Assessment of Durability*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/27

Comportamento ao arrancamento de uma geogrelha embutida em areia de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP)

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Saurav S. Kar
Professor, COEP Technological University (COEP Tech), Pune, India, karsauravshekhar2008@gmail.com

Fernando H. M Portelinha
Professor Titular, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, fernando.portelinha@ufscar.br

RESUMO: Este estudo avalia o desempenho ao arrancamento de uma geogrelha biaxial embutida em resíduo de pavimento asfáltico fresado (RAP) e em areia natural, com o objetivo de analisar a viabilidade do uso do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Ensaios de arrancamento em caixa de grande escala foram realizados sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa. A resistência ao arrancamento, o deslocamento axial e a distribuição de deformações ao longo da geogrelha foram monitorados por meio de instrumentação externa e interna. Os resultados indicam que, embora a resistência ao arrancamento aumente com a tensão normal para ambos os materiais, a interface areia–geogrelha apresentou maior sensibilidade ao confinamento. Em contrapartida, o RAP mobilizou maiores resistências últimas ao arrancamento, exigindo maiores deslocamentos axiais e desenvolvendo maiores deformações internas na geogrelha. A interpretação dos parâmetros de interface segundo o critério de Mohr–Coulomb revelou comportamento predominantemente friccional para a areia, enquanto o RAP apresentou significativa adesão aparente, associada ao ligante asfáltico residual e ao maior intertravamento entre partículas. Os resultados demonstram que o RAP pode proporcionar condições favoráveis de interação solo–geogrelha em aplicações de solo reforçado, contribuindo para o desenvolvimento de infraestruturas geotécnicas mais sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento ao Arrancamento, Geogrelha de PEAD, Fresado de Pavimento Asfáltico, Interação Solo–Geogrelha, Resistência de Interface, Estruturas de Solo Reforçado

ABSTRACT: This study evaluates the pull-out performance of biaxial geogrid embedded in reclaimed asphalt pavement (RAP) and natural sand, with the objective of assessing the suitability of RAP as a backfill material in geosynthetic-reinforced soil structures. Large-scale laboratory pull-out tests were performed under normal stresses of 25, 50 and 100 kPa. Pull-out resistance, axial displacement and strain distribution along the geogrid were monitored using external and internal instrumentation. The results indicate that, although pull-out resistance increased with normal stress for both materials, the sand–geogrid interface exhibited greater sensitivity to confinement. In contrast, RAP mobilised higher ultimate pull-out resistance, requiring larger axial displacements and developing greater internal geogrid strains. Interpretation of the interface parameters using a Mohr–Coulomb envelope revealed a predominantly frictional response for sand, whereas RAP exhibited significant apparent adhesion associated with residual asphalt binder and enhanced particle interlocking. The findings demonstrate that RAP can provide favourable interface conditions in reinforced soil applications, supporting its use as an alternative backfill in sustainable geotechnical infrastructure.

KEYWORDS: Pull-out Behaviour, HDPE Geogrid, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Soil–geogrid Interaction, Interface Shear Strength, Reinforced Soil Structures.

1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos têm sido amplamente utilizados em todo o mundo como soluções técnicas e economicamente eficientes em aplicações da engenharia geotécnica, incluindo reforço de solos, estabilização de fundações, obras de contenção, infraestrutura ferroviária e rodoviária e controle de erosão (Wu et al., 1992; Ashmawy e Bourdeau, 1995; Lee e Wu, 2004; Ravi et al., 2014; Ferreira et al., 2016; Indraratna et al., 2018). Entre os diferentes geossintéticos, as geogrelhas destacam-se em estruturas de solo reforçado devido à elevada rigidez, resistência à tração e capacidade de intertravamento com o material de preenchimento.

No projeto de estruturas de solo reforçado, um dos aspectos mais relevantes é o mecanismo de interação entre o solo e o elemento de reforço. O desempenho global dessas estruturas depende diretamente da mobilização adequada da resistência de interface, a qual pode ser influenciada pelas propriedades físicas e mecânicas do solo, pelas características geométricas e mecânicas da geogrelha, bem como pelas condições de confinamento (Ferreira et al., 2015). A interação solo–geossintético pode ser avaliada por diferentes métodos experimentais, sendo os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento os mais empregados (Mendes et al., 2007; Lopes et al., 2014; Ferreira et al., 2016). Dentre esses, o ensaio de arrancamento em laboratório tem sido amplamente adotado para a determinação da resistência ao arrancamento de geogrelhas em estruturas de solo reforçado.

Diversos estudos investigaram o comportamento ao arrancamento de geossintéticos sob diferentes condições de confinamento e tipos de solo, demonstrando a relevância da mobilização de mecanismos atritivos e de resistência passiva associados às fibras transversais das geogrelhas (Palmeira, 2004; Hatami e Esmaili, 2015). Entretanto, a maior parte das investigações foram conduzidas com agregados naturais ou solos granulares convencionais.

Paralelamente, a engenharia civil tem sido desafiada a propor soluções mais sustentáveis frente ao elevado volume de resíduos gerados em obras de infraestrutura. No Brasil, as recentes obras de ampliação e manutenção da malha rodoviária conduzidas por concessionárias têm resultado na geração expressiva de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP). Embora parte desse material seja reincorporada em novas misturas asfálticas, uma parcela significativa ainda não é integralmente reaproveitada, demandando alternativas tecnicamente viáveis para sua utilização na construção civil.

Estudos recentes têm investigado o emprego do RAP em aplicações geotécnicas, incluindo sua interação com geossintéticos (Rathje et al., 2006; Soleimanbeigi et al. 2022; Arulrajah et al., 2013; Liu et al., 2023). No entanto, ainda são limitadas as investigações que avaliam o comportamento ao arrancamento de geogrelhas quando embutidas em RAP, especialmente no que se refere à determinação de parâmetros de resistência de interface sob diferentes níveis de tensão normal.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento ao arrancamento de uma geogrelha de polietileno de alta densidade (PEAD) embutida em areia natural e em RAP, por meio de ensaios de arrancamento em caixa de grande escala. A investigação busca comparar a evolução da resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial, bem como os parâmetros de resistência de interface obtidos, contribuindo para viabilizar o uso do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais avaliados compreenderam uma geogrelha biaxial de polietileno de alta densidade (PEAD) e dois materiais de preenchimento: areia natural e RAP. A geogrelha de PEAD é um produto comercial disponível internacionalmente, com resistência nominal de 68,4 kN/m, espessura das nervuras de 3 mm e aberturas de 35 mm em ambas as direções.

A areia natural (Figura 1a), de origem quartzosa e caráter comercial, foi utilizada como material de referência e previamente caracterizada (granulometria, limites de consistência e umidade ótima). O RAP (Figura 1b) foi proveniente de fresagem de pavimento asfáltico, fornecido por concessionária rodoviária, e utilizado sem processamento adicional. O teor de ligante asfáltico do RAP é de, aproximadamente, 8% (informação do fornecedor). Os resultados da caracterização dos materiais (granulometria, compactação Proctor normal e cisalhamento direto) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 2. Propriedades da areia natural e do RAP.

Propriedade	Areia	RAP
D_{10}	0.15	0.18
D_{30}	0.42	0.50
D_{60}	0.90	1.00
Classificação (SUCS)	SP	SP
Coeficiente de uniformidade (c_u)	6.00	5.56
Coeficiente de curvatura (c_c)	1.31	1.39
Densidade das partículas (g/cm³)	2.64	2.57
Índice de vazios		
Máximo (e_{max})	0.64	0.93
Mínimo (e_{min})	0.42	0.63
Teor de umidade ótimo (%)	6.90	7.20
Ângulo de atrito (°)	30	28
Coesão (kPa)	0	32



Figura 1. Caracterização granulométrica da (a) areia natural e do (b) RAP.

2.2 Métodos

2.2.1 Equipamento de arrancamento

Os ensaios de arrancamento foram realizados em caixa de grande escala, com dimensões de 0,86 m × 0,55 m × 0,41 m, conforme os procedimentos da ASTM D6706 (2013). O equipamento permite a aplicação de tensão normal controlada sobre o material de preenchimento e o arrancamento da geogrelha a taxa constante de deslocamento. A tensão normal foi aplicada por sistema pneumático com bolsa de ar, garantindo distribuição uniforme da carga vertical, sendo o nível estabelecido aplicado antes do início do ensaio e mantido constante durante todo o teste. O sistema de fixação da geogrelha consiste em garra cilíndrica oca, com 6 cm de diâmetro e 32 cm de comprimento, equipada com revestimento interno antiderrapante e três parafusos superiores para assegurar o aperto e a transferência adequada da força de arrancamento.

2.2.2 Preparação do corpo de prova

Os corpos de prova da geogrelha ensaiados apresentaram dimensões embutidas de 200 mm de largura por 400 mm de comprimento. A geogrelha foi posicionada horizontalmente no interior da caixa, sendo o arrancamento realizado na direção longitudinal (direção de fabricação). O preenchimento da caixa de arrancamento foi realizado por meio de procedimento de compactação em camadas sucessivas, totalizando nove camadas, cada uma com espessura aproximada de 40 mm. A compactação foi executada manualmente com soquete, adotando-se o mesmo procedimento para todos os ensaios, a fim de garantir a uniformidade e a reprodutibilidade dos corpos de prova.

Os materiais de preenchimento foram ensaiados sob condição de umidade controlada, com teor de umidade próximo à umidade ótima de cada material, conforme determinado nos ensaios de compactação Proctor (energia normal). O controle de densidade foi realizado por consistência operacional, mediante a aplicação do mesmo esforço de compactação, número de golpes e procedimento de moldagem para todos os corpos de prova. Essa abordagem assegurou condições comparáveis entre os ensaios conduzidos com areia natural e RAP.

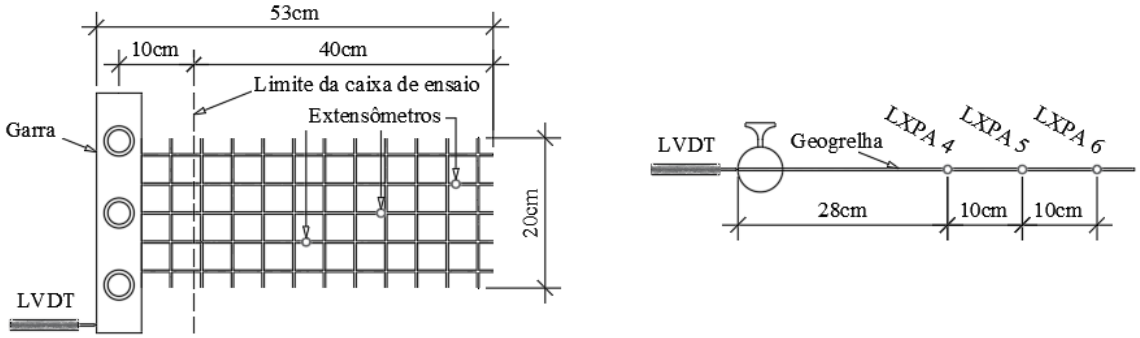
2.2.3 Procedimento de ensaio

Os ensaios foram conduzidos em conformidade com os princípios gerais e recomendações da ASTM D6706, assegurando consistência com os procedimentos laboratoriais padronizados para avaliação da interação solo–geossintético sob carregamento monotônico. A geogrelha foi tracionada a uma taxa constante de deslocamento de 10 mm/min, aplicada por meio de sistema de carregamento motorizado. Foi executado um único ensaio de arrancamento para cada combinação de material de preenchimento e nível de tensão normal

(25, 50 e 100 kPa). Cada ensaio foi conduzido até que fosse atingido o deslocamento máximo de arrancamento de 15 mm, medido pelo Transdutor Linear Variável de Deslocamento (LVDT) externo (maiores detalhes sobre a instrumentação empregada são apresentados na Seção 2.2.4).

2.2.4 Instrumentação e aquisição de dados

A força de arrancamento foi medida por meio de célula de carga instalada em linha com o sistema de tração. O deslocamento axial da geogrelha foi monitorado por um LVDT posicionado externamente, em contato direto com o sistema de fixação utilizado para prender o corpo de prova da geogrelha (Figura 2). Para avaliar o alongamento ao longo do comprimento confinado da geogrelha, três extensômetros do tipo tell-tale foram fixados ao longo de seu comprimento, nas posições indicadas na Figura 2. O espaçamento entre os pontos de medição de deslocamento é apresentado esquematicamente na Figura 2b. Esse arranjo de instrumentação permitiu a avaliação da distribuição de deformações ao longo da geogrelha durante o processo de arrancamento.



(a) (b)

Figura 2. Dimensões e arranjo dos extensômetros ao longo dos corpos de prova de geogrelha ensaiados: (a) vista superior; (b) vista lateral esquemática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Desenvolvimento da resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial

A Figura 3 apresenta a resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial para a geogrelha de PEAD embutida em areia natural e em RAP, sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, com deslocamentos externos (LVDT) e internos (LXPA). Em ambos os materiais, a resistência aumentou com a tensão normal, conforme esperado para interfaces solo–geogrelha. Contudo, a resposta foi distinta: o RAP mobilizou resistências superiores às da areia, associadas ao efeito de ligação do ligante asfáltico residual.

Na areia, o aumento de 25 para 50 kPa elevou a resistência ao arrancamento em ~74%, enquanto no RAP o incremento foi de ~11%. De 50 para 100 kPa, os aumentos foram de ~98% (areia) e ~13% (RAP), evidenciando maior dependência da areia em relação ao confinamento e menor sensibilidade do RAP à tensão normal, devido ao papel predominante da adesão na interface.

O deslocamento axial para mobilizar a resistência última também depende do material. Na areia, a resistência estabilizou em deslocamentos reduzidos (≈ 2–4 mm; Figuras. 3a, 3c e 3e). No RAP, a mobilização ocorreu em deslocamentos maiores (geralmente > 4 mm e, com frequência, > 6 mm; Figuras. 3b, 3d e 3f), indicando maior deformação da geogrelha durante o arrancamento. Esses níveis distintos de deslocamento sugerem mecanismos dominantes diferentes: comportamento predominantemente de atrito na areia e contribuição adicional no RAP (intertravamento nas aberturas e efeitos de ligação associados ao ligante residual).

A partir da Figura 3 e do arranjo dos extensômetros (Figura 2b), observa-se mobilização progressiva da resistência ao longo do reforço: o LXPA 4 (próximo à garra) requer maiores deslocamentos, enquanto LXPA

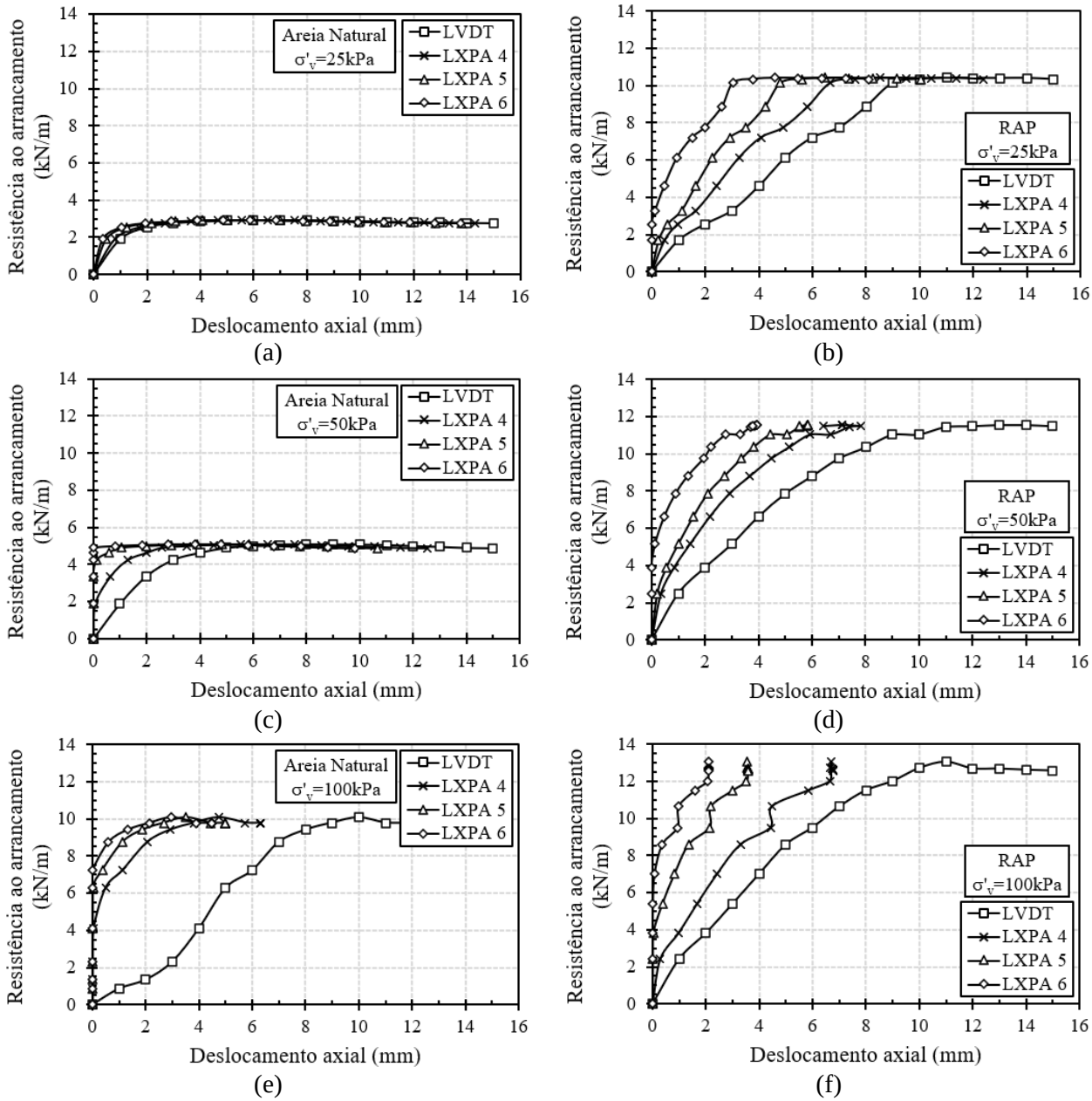


Figura 3. Resistência ao arrancamento em função do deslocamento axial obtida a partir de medições externas (LVDT) e internas (LXPA) para ensaios realizados com areia (a, c e e) e RAP (b, d e f) sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa.

5 e LXPA 6 mobilizam resistência com deslocamentos progressivamente menores, refletindo distribuição não uniforme de deformações e transferência gradual de carga da extremidade carregada para a extremidade livre.

3.2 Desenvolvimento das deformações na geogrelha durante o arrancamento

A Figura 4 apresenta o deslocamento axial e a distribuição de deformações internas ao longo da geogrelha de PEAD em dois níveis de mobilização (50% da resistência última e na resistência última), para ensaios com areia natural e RAP sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa. Em todas as condições, o deslocamento axial diminui ao longo do comprimento confinado, indicando transferência progressiva de carga da extremidade tracionada para a extremidade livre do reforço.

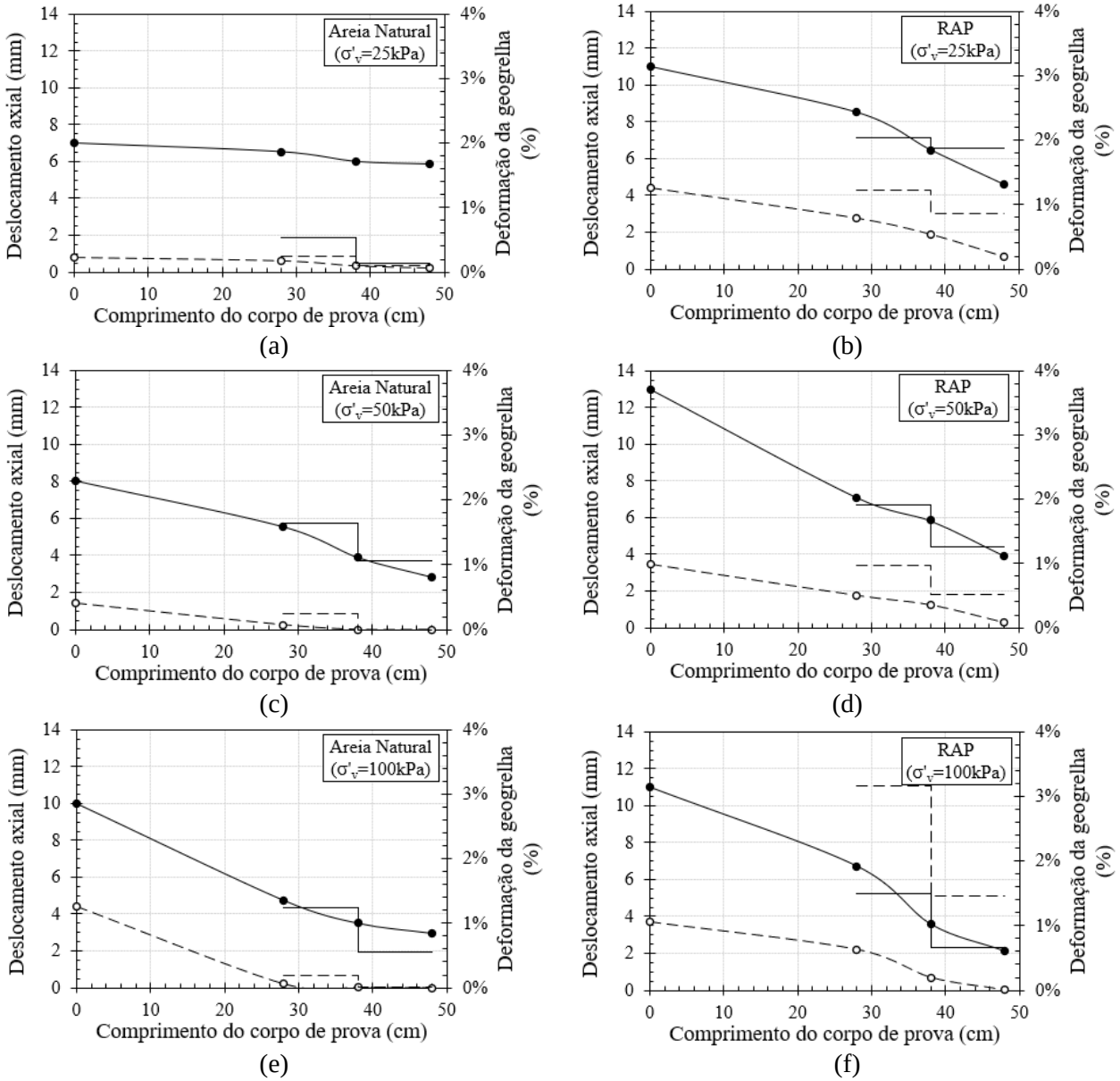


Figura 4. Deslocamento axial e deformação da geogrelha ao longo do comprimento dos corpos de prova ensaiados com areia (a, c e e) e RAP (b, d e f) sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa.

As deformações internas foram obtidas pelos extensômetros entre LXPA 4–LXPA 5 e LXPA 5–LXPA 6, desconsiderando-se o trecho entre a garra e o LXPA 4 por não estar totalmente confinado pelo material de preenchimento. Em todos os ensaios, as maiores deformações concentraram-se próximo ao carregamento (LXPA 4–LXPA 5), enquanto valores menores foram observados no trecho mais distante (LXPA 5–LXPA 6), evidenciando mobilização inicial da interação junto à garra.

Comparativamente, a interface areia–geogrelha mobilizou menores deformações (0%–1,6%), compatíveis com menor interação e resposta predominantemente friccional. Já a interface RAP–geogrelha mobilizou deformações maiores (0,6%–3,2%), sobretudo no trecho próximo à garra, indicando interação mais intensa entre o RAP e a geogrelha e explicando as maiores resistências ao arrancamento observadas.

3.3 Coeficiente de interação material de preenchimento–geogrelha

Os parâmetros de resistência de interface material de preenchimento–geogrelha foram interpretados pelo critério de Mohr–Coulomb, a partir da relação entre a tensão de arrancamento de pico e a tensão normal

aplicada. Regressões lineares com as tensões de pico permitiram estimar o ângulo de atrito de interface (δ) e o intercepto da envoltória, denominado adesão (a). Os resultados (Figura 5) apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2), indicando ajuste linear adequado no intervalo de tensões normais investigado.

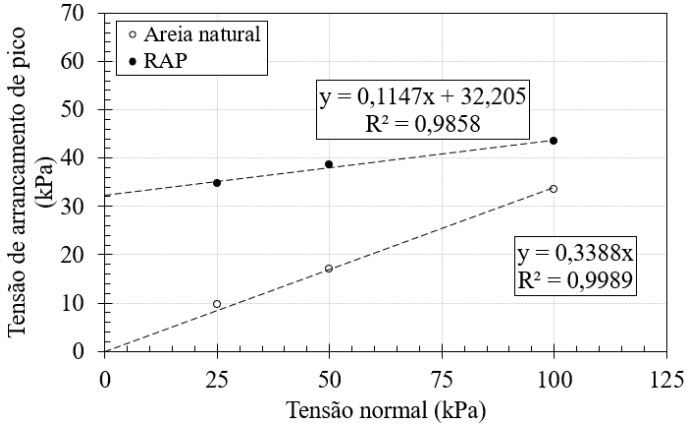


Figura 5. Relação entre a tensão de arrancamento de pico e a tensão normal vertical para geogrelha de PEAD embutida em areia natural e RAP.

Para a areia natural, a resposta foi predominantemente friccional ($\delta \approx 19°$), sem adesão aparente, com clara dependência da resistência ao arrancamento em relação à tensão normal. Para o RAP, observou-se comportamento distinto: o ângulo de atrito de interface foi menor ($\delta \approx 7°$), porém com adesão aparente significativa ($a \approx 32$ kPa), reduzindo a sensibilidade da resistência de pico ao aumento da tensão normal. Esse resultado é coerente com a presença de mecanismos adicionais na interface RAP–geogrelha, em especial intertravamento nas aberturas e efeitos associados ao ligante asfáltico residual; ressalta-se que a adesão aparente não representa coesão verdadeira, mas um parâmetro macroscópico das condições ensaiadas.

Para fins de dimensionamento, a Tabela 3 apresenta os coeficientes de interação calculados por:

$$c_f = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (1)$$

$$c_a = \frac{c}{a} \quad (2)$$

$$c_i = c_f + c_a \quad (3)$$

em que: c_f é o coeficiente de interface atritivo; δ é o ângulo de atrito de interface, ϕ, o ângulo de atrito do solo; c_a, o coeficiente de interface de adesão; c, a coesão do solo; a, a adesão aparente de interface; e c_i, o coeficiente de interface.

Tabela 3. Coeficientes de atrito, adesão e interação com base nos resultados apresentados.

Coeficiente	Areia Natural	RAP
c_f	0,59	0,22
c_a	0,00	0,99
c_i	0,59	1,21

O valor de c_i obtido para a areia é compatível com a literatura. Para o RAP, os valores indicam condição não convencional, associada: i) ao ligante residual do RAP, ii) ao contato efetivo entre partículas e aberturas da geogrelha e iii) à contribuição passiva das fibras transversais da geogrelha. Do ponto de vista prático, o RAP pode apresentar condições favoráveis de interação em estruturas de solo reforçado; entretanto, recomenda-se adotar hipóteses conservadoras quanto à mobilização da adesão aparente.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento ao arrancamento de uma geogrelha de polietileno de alta densidade (PEAD) confinada por areia natural e por RAP, visando analisar a viabilidade do RAP como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado. Ensaios de arrancamento em caixa de grande escala foram executados sob tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, com monitoramento da resistência mobilizada, do deslocamento axial e das deformações internas ao longo da geogrelha.

Os resultados indicaram que a interface RAP–geogrelha mobilizou resistências ao arrancamento superiores às obtidas com areia nas mesmas tensões normais. Esse desempenho é atribuído ao ligante asfáltico residual, que favorece o intertravamento e mecanismos de adesão na interface. Em termos de interação, a areia apresentou maior contribuição de atrito (c_f = 0,59), enquanto o RAP evidenciou predominância do componente adesivo (c_a = 0,99), controlando a resposta de interface. Do ponto de vista geotécnico, o RAP mostra potencial como preenchimento em solos reforçados, reduzindo o consumo de agregados naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arulrajah R, Shear I. Interface Shear Strength Testing of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials. 2013; 2: 189–200.

Ashmawy G, Bourdeau AK. Geosynthetic-Reinforced Soils Under Repeated Loading: A Review and Comparative Design Study. 1995.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D 6706-01: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. 2013; 8 p.

Ferreira FB, Topa Gomes A, Vieira CS, et al. Reliability analysis of geosynthetic-reinforced steep slopes. Geosynth Int 2016; 23: 301–315.

Ferreira FB, Vieira CS, Lopes ML. Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. Geosynth Int 2015; 22: 257–272.

Hatami K, Esmaili D. Unsaturated soil-woven geotextile interface strength properties from small-scale pullout and interface tests. Geosynth Int 2015; 22: 161–172.

Indraratna B, Ferreira FB, Qi Y, et al. Application of geoinclusions for sustainable rail infrastructure under increased axle loads and higher speeds. Innovative Infrastructure Solutions; 3. Epub ahead of print 1 December 2018.

Lee KZZ, Wu JTH. A synthesis of case histories on GRS bridge-supporting structures with flexible facing. Geotextiles and Geomembranes 2004; 22: 181–204.

Liu L, Zhang Z, Zhang L, et al. Effect of Temperature on Interface Characteristics between Compacted Recycled Asphalt Pavement and Geogrid. Advances in Civil Engineering 2023; 2023: 1–10.

Lopes ML, Ferreira F, Carneiro JR, et al. Soil - Geosynthetic inclined plane shear behavior: Influence of soil moisture content and geosynthetic type. International Journal of Geotechnical Engineering 2014; 8: 335–342.

Mendes MJA, Palmeira EM, Matheus E. Some factors affecting the in-soil load - Strain behaviour of virgin and damaged nonwoven geotextiles. Geosynth Int 2007; 14: 39–50.

Palmeira EM. Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. Geotextiles and Geomembranes 2004; 22: 481–509.

Rathje EM, Rauch AF, Trejo D, et al. Evaluation of Crushed Concrete and Recycled Asphalt Pavement as Backfill for Mechanically Stabilized Earth Walls. Austin, Texas, 2006.

Ravi K, Dash SK, Vogt S, et al. Behaviour of Geosynthetic Reinforced Unpaved Roads Under Cyclic Loading. Indian Geotechnical Journal 2014; 44: 77–85.

Soleimanbeigi A, Ozocak A, Li B, et al. Mechanical and hydraulic compatibility of RAP with geosynthetics used in MSE walls. Geosynth Int 2022; 29: 1–18.

Wu JTH, Siel BD, Chou NNS, et al. The Effectiveness of Geosynthetic Reinforced Embankments Constructed over Weak Foundations. 1992.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/28

Comportamento Geomecânico a Longo Prazo de Lastro Reforçado com Geogrelha sob Carregamento Cíclico

Lucas Machado de Souza
Doutorando, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, lmchsouza@hotmail.com

Paulo César de Almeida Maia
Professor, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Maria Cecília Martins Gomes Rangel
Graduanda, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, mariaceciliamartins05@gmail.com

RESUMO: O desgaste das partículas de lastro é um problema das ferrovias que gera custos de manutenção que comprometem a competitividade a longo prazo, especialmente devido ao custo de paralisação dos trens. Nesse contexto, novas técnicas vêm sendo avaliadas para aumentar a durabilidade das partículas e reduzir o impacto financeiro das intervenções na via. Este estudo tem como objetivo investigar o comportamento geomecânico a longo prazo de um lastro reforçado com geogrelha, considerando o impacto do reforço na deformabilidade dos grãos e no enrijecimento dos agregados por meio de ensaios triaxiais de carga repetida. Para isolar os efeitos do geossintético, foram produzidas partículas cúbicas de alta resistência com fator de escala igual a 3,5. As geogrelhas em escala reduzida foram confeccionadas por impressão 3D, utilizando os polímeros PETG e PLA, para reproduzir as propriedades mecânicas das geogrelhas PET40 e PET65, respectivamente. Com base nos resultados, observa-se que materiais granulares tendem a estabilizar as deformações ao longo do tempo, mesmo na ausência de reforço. O PLA apresentou desempenho superior ao PETG devido à maior rigidez do polímero, promovendo um enrijecimento dos grãos para todos as leituras. Contudo, os elevados níveis de confinamento podem ter reduzido os efeitos promovidos pelas geogrelhas.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação Plástica, Partícula Cúbica, Rigidez da Geogrelha, Reforço com Geossintéticos, Triaxial cíclico.

ABSTRACT: The wear of ballast particles is an issue in railways which leads to maintenance costs that compromise long-term competitiveness, especially due to the expenses associated with train downtime. In this context, new techniques have been evaluated to increase the durability of particles and to mitigate the financial impact of track interventions. This study aims to investigate the long-term geomechanical behavior of geogrid-reinforced ballast, considering the influence of reinforcement on grain deformability and aggregate stiffening through repeated load triaxial tests. To isolate the effect of the geosynthetic, high-strength cubic particles were manufactured with a scaling factor of 3.5. Scaled geogrids were produced by 3D printing using PETG and PLA polymers, to reproduce the mechanical properties of the commercial geogrids PET40 and PET65, respectively. Based on the results, it was observed that granular materials tend to stabilize deformations over time, even in the absence of reinforcement. The PLA exhibited superior performance compared to PETG due to the higher stiffness of the polymer, promoting aggregate stiffening under all readings. However, the high confinement levels may have reduced the effects provided by the geogrids.

KEYWORDS: Plastic deformation, Cubic Particle, Geogrid Stiffness, Geosynthetics Reinforcement, Cyclic Triaxial.

1 INTRODUÇÃO

Nas ferrovias, os carregamentos dinâmicos atuantes na via permamente provocam o desgaste progressivo das partículas de lastro, gerando materiais finos que preenchem os vazios entre os agregados e comprometem o desempenho da subestrutura ferroviária a longo prazo (Sun et al., 2016). Por consequência, o

lastro passa por um processo de contaminação, exigindo intervenções periódicas realizadas a partir de técnicas de manutenção, tais como socaria, desguarnecimento e estabilização.

Tendo em vista que o custo de paralisação dos trens pode representar mais de 70% dos custos totais de manutenção das ferrovias (Sgavioli et al., 2015), a busca por métodos e técnicas mais eficientes a longo prazo tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores mundialmente. No Brasil, o governo federal propôs, em 2021, o novo PNL (Plano Nacional de Logística 2035), com o objetivo de aumentar o percentual de participação das ferrovias em até 30% na matriz de transporte e promover um crescimento da malha acima de 60% nos próximos anos. Logo, o entendimento do complexo comportamento geomecânico de materiais granulares sob carregamento cíclico e dinâmico, especialmente a longo prazo, é fundamental para buscar soluções mais eficientes e reestabelecer a competitividade do modal ferroviário em relação a outros meios de transporte.

Entre as técnicas alternativas aos procedimentos convecionais, destaca-se o uso de geogrelhas como elemento de reforço na camada de lastro. As geogrelhas são geossintéticos compostos por filamentos entrelaçados, formando uma malha com alta resistência à tração. A ideia do reforço consiste em reduzir o fluxo lateral das partículas durante os carregamentos do material rodante, aumentando assim o confinamento entre os agregados. Esse processo ocorre por meio do mecanismo de imbricamento devido à elevada flexibilidade de interação da geogrelha com as partículas de lastro (Shukla et al., 2009; Tutumluer et al., 2009; Sweta e Hussaini, 2020; Desbrousses et al., 2023).

Brown et al. (2007) explicam que a abertura da malha, a largura dos filamentos e o módulo de rigidez secante são os parâmetros da geogrelha que mais influenciam na deformabilidade do lastro. Em relação aos benefícios da inclusão de geogrelha na camada de lastro, Abu-Farsakh et al. (2012) e Chen et al. (2013) notaram uma redução nos incrementos de deformação plástica. Indraratna et al. (2013) observaram uma diminuição na deformabilidade e no nível de desgaste do lastro. Além disso, Conceição et al. (2022) também conseguiram melhorar o confinamento dos grãos em comparação ao ensaio realizado sem reforço.

De acordo com Lekarp et al. (2000) e Suiker et al. (2005), quando submetido ao carregamento cíclico, o comportamento geomecânico da camada de lastro é elastoplástico, com deformações elásticas e plásticas nos agregados a cada ciclo de carga. Na bibliografia, existem vários conceitos utilizados para avaliar o comportamento geomecânico a longo prazo, com destaque especial para a teoria de shakedown, em que a deformabilidade de materiais não coesivos pode ser estável ou instável conforme o nível de tensões aplicado (Lees e Tutumluer, 2025). Nesse sentido, Werkmeister et al. (2001) explicam que o comportamento dos grãos é dividido em três limites: shakedown elástico, quando ocorre estabilização das deformações plásticas após o período de acomodação dos grãos (condição favorável), shakedown plástico, quando não ocorre estabilização das deformações e o comportamento dos materiais granulares se mantém elastoplástico, e ruptura, quando o material alcança a condição crítica (condição desfavorável).

Apesar dos inúmeros estudos recentes associados à investigação do comportamento geomecânico de materiais granulares, a reprodução em laboratório do carregamento cíclico e dinâmico aplicado pelo material rodante é complexa, sendo comumente realizada a partir de ensaios triaxiais de carga repetida ou *Repeated Load Triaxial Test* (RLTT). Nesse ensaio, pode-se simular os pulsos de carga aplicados sobre a via permanente, submetendo o corpo de prova a um par de tensões confinante e desviadora, ainda que o estudo seja limitado pelo estado de tensões axissimétrico (tensões principais intermediária e menor idênticas). A carga axial é produzida por uma onda em formato senoidal, composta por um período de carregamento seguido por um período de repouso. Tal carga atua conjuntamente com a tensão de confinamento, fornecida por ar comprimido, produzindo a tensão desviadora que simula a carga aplicada pelo material rodante sobre as partículas.

Existem inúmeros fatores que influenciam a complexa interação entre a camada de lastro e a geogrelha, incluindo aspectos intrínsecos, como forma, tamanho e resistência das partículas, e extrínsecos, como o estado de tensões, a trajetória de tensões, bem como as condições de contorno (Indraratna et al., 2013; Sun et al., 2016; Delgado et al., 2019). Portanto, a avaliação laboratorial requer o isolamento das variáveis de interesse para eliminar efeitos de segunda ordem, tornando os resultados mais representativos. Nesse contexto, o trabalho tem como objetivo analisar o comportamento geomecânico de um lastro reforçado com geogrelha, avaliando a influência da rigidez da geogrelha sobre o confinamento dos agregados e na deformabilidade a longo prazo. Para isso, foram utilizadas partículas cimentícias de forma controlada (cúbicas) em ensaios de longa duração (Deformação Permanente – DP), permitindo isolar os efeitos promovidos pela geogrelha em comparação ao lastro sem adição de reforço.

2 METODOLOGIA

2.1 Produção e caracterização das partículas cimentícias

Inicialmente, foi feita a moldagem as partículas conforme a dosagem de 130 MPa proposta por Conceição et al. (2022) (Tabela 1). Esse material é classificado com um concreto de ultra alto desempenho (CUAD), possuindo uma matriz densa composta por agregados finos que lhe confere excelente resistência, além de permitir o controle de forma dos agregados, que foram todos produzidos na forma cúbica por apresentar o menor nível de desgaste.

Tabela 1 – Dosagem do concreto para 1 m³ (Conceição et al. 2022).

Material	Massa (kg)	Densidade (g/cm³)
Cimento	1013,00	3,10
Cinza da casca do arroz	53,82	2,09
Pó de quartzo (Sílica #325)	81,26	2,65
Areia (150 µm)	61,00	2,65
Areia (425 µm)	832,00	2,65
Microfibra de volastonita	76,70	2,90
Superplastificante	51,13	1,21
Água	196,10	1,00

Como apresentado na Figura 1, a produção das partículas foi feita conduzida em três etapas: mistura, cura e polimento. Na primeira etapa, a mistura foi preparada por meio de uma haste presa a uma furadeira de coluna até atingir uma boa trabalhabilidade do concreto. Posteriormente, a mistura foi transferida para moldes de silicone, produzidos a partir do preenchimento de fôrmas confeccionadas com impressão 3D, e desmoldada após 48 horas, permanecendo no processo de cura em água saturada de cal durante 28 dias. Após a cura, as partículas permaneceram no Micro-Deval durante 20 minutos para polimento e arredondamento das arestas, visando reduzir o desgaste dos grãos durante a realização dos ensaios.

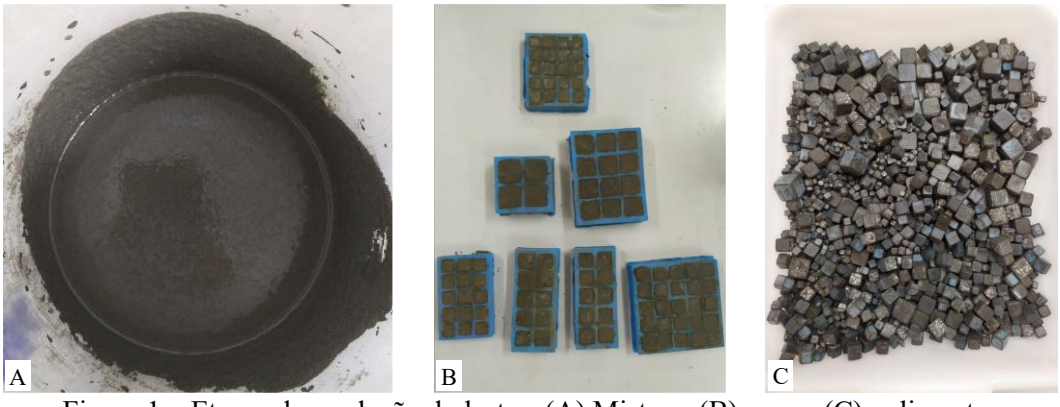


Figura 1 – Etapas de produção do lastro: (A) Mistura, (B) cura e (C) polimento.

A graduação n.º 24 (AREMA, 2015) foi adotada como referência para a definição dos limites inferior (LI) e superior (LS) da curva granulométrica (Figura 2), por ser amplamente utilizada em estudos realizados em ferrovias do tipo *heavy haul*, linhas destinadas ao transporte de grandes cargas como carvão e minério de ferro. Essa graduação foi selecionada por proporcionar um bom grau de imbricamento entre os grãos (Delgado et al., 2019). Adicionalmente, conforme as recomendações de Indraratna et al. (2006), a curva granulométrica (Figura 1) foi redistribuída para que o coeficiente de uniformidade permanecesse próximo a 2,0, reduzindo o grau de fragmentação das partículas.

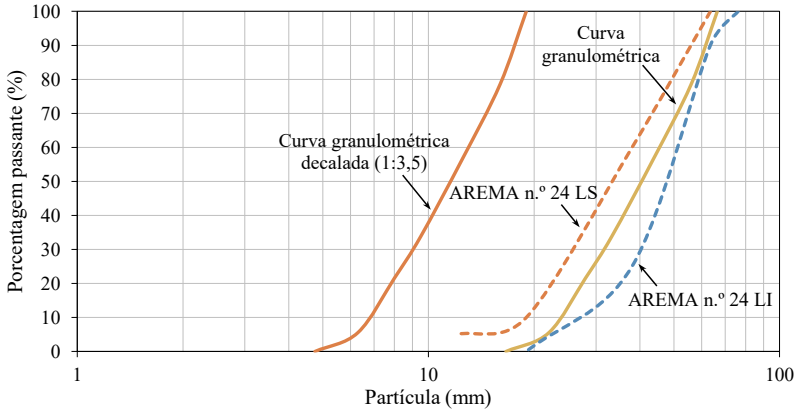


Figura 2 – Curva granulométrica do lastro.

As partículas cimentícias, com tamanhos entre 19,0 mm e 4,76 mm (Figura 3), apresentam forma cúbica para destacar o efeito promovido pelas geogrelhas. Para efeito de comparação, foram utilizadas partículas de gnaisse, extraídas do município vizinho de Itaperuna, como referência para o lastro natural.



Figura 3 – Partículas de lastro (19,0 mm a 4,76 mm).

Seis agregados de 19,0 mm foram produzidos para os ensaios de caracterização física (absorção, massa específica e porosidade aparente). Além disso, também foram produzidas partículas de 50,0 mm para o ensaio de resistência à compressão uniaxial na prensa universal e partículas com tamanhos entre 6,2 mm e 12,0 mm para o ensaio de resistência à abrasão no Micro-Deval.

2.2 Confecção e caracterização das geogrelhas modelo

Observa-se na Figura 4A que as geogrelhas biaxiais Basetrac Grid PET40, com resistência à tração nominal de 40 kN/m, e PET65, com resistência à tração nominal de 65 kN/m, foram utilizadas como referência (protótipo) para a confeccção das geogrelhas em escala reduzida (modelo) por serem amplamente empregadas como elemento de reforço em pavimentos. Fabricadas a partir de filamentos de polietileno tereftalato (PET), tais geogrelhas possuem abertura de malha de 25,0 mm, largura de filamento de 6,0 mm e espessura de 1,0 mm. Tendo como base a caracterização das geogrelhas protótipo nos ensaios de tração uniaxial na direção longitudinal, conduzidos a uma taxa de 20 mm/min, foram confeccionadas duas geogrelhas modelo com um fator de escala de 3,5, sendo uma flexível (simulando a PET40) e outra mais rígida (simulando a PET65).

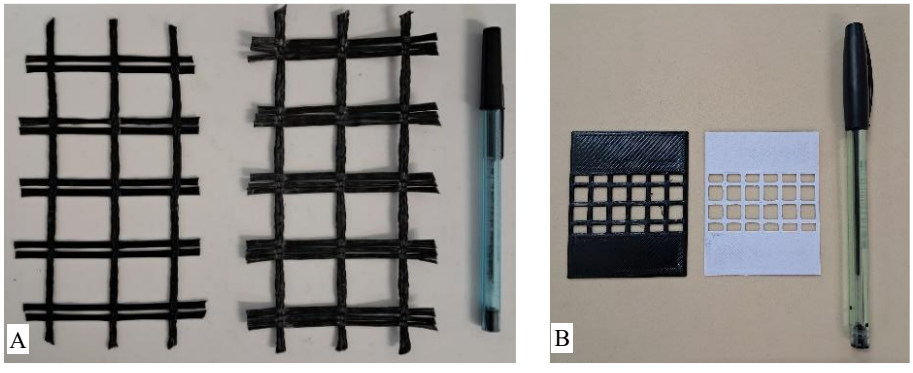


Figura 4 – Geogrelhas: (A) PET40 (à esquerda) e PET65 (à direita) e (B) PETG e PLA.

Desenvolvidas no software *SketchUp*, as geogrelhas modelo apresentam 7,0 mm de abertura da malha, 1,7 mm de largura do filamento e 0,3 mm de espessura do filamento. Essas geogrelhas foram confeccionadas com impressão 3D, em substituição ao método convencional de corte de filamentos, considerando os critérios propostos por Viswanadham e König (2004) para modelos 1g. Como apresentado na Figura 4B, o polímero termoplástico PETG (polietileno tereftalato com adição de glicol), na cor preta, foi utilizado na confecção da geogrelha mais flexível (modelo X), enquanto o PLA (ácido polilático), na cor branca, foi empregado para representar a geogrelha mais rígida (modelo Y).

2.3 Preparação da amostra e programa de ensaios triaxiais

O corpo de prova, com densidade de 1,0 g/cm³, possui 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura (Figura 5). Além das partículas de lastro, a amostra também é composta por fitas de PVC de baixa resistência circunferencial, membranas de látex e *o-rings* de vedação. O uso das fitas de PVC permite prevenir furos pelo contato da membrana de látex com os agregados durante a preparação da amostra. De acordo com as prescrições da norma EN 13286-7 (CEN, 2004), foram utilizadas membranas com espessura inferior a 0,8% do diâmetro do corpo de prova. Os ensaios conduzidos na membrana de látex, com espessura de 0,4 mm, demonstraram que, para uma tensão de 1,0 kPa, a correção do efeito membrana deve ser igual a 12%.



Figura 5 – Amostra cilíndrica para ensaio triaxial de carga repetida em escala reduzida.

A montagem foi iniciada a partir do encaixe das fitas de PVC no cap inferior e vedação na primeira membrana, com os agregados adicionados e compactados em três camadas de 6,6 cm. Nos ensaios com reforço, a geogrelha foi adicionada após a primeira camada de agregados, tendo em vista que as geogrelhas são posicionadas na via permanente nas camadas inferiores com o objetivo de evitar danos ao geossintético. Na sequência, foi feita a fixação do cap superior e adição da segunda membrana foi adicionada. Posteriormente, um cabeçote de PVC foi fixado no cap superior e os dois transdutores de deslocamento (*Linear Variable Differential Transducers* – LVDTs), responsáveis pelas medições nas deformações axiais, foram calibrados individualmente antes de cada ensaio.

Todo o carregamento foi realizado por um sistema composto por pistão, célula de carga de 5 kN, regulador de pressão, válvula solenoide de três vias e cilindro pneumático. Para aplicar o confinamento à amostra, foi utilizado um compressor de ar comprimido. Conforme as recomendações da norma EN 13286-7 (CEN, 2004), os ensaios DP foram conduzidos pelo método de estágio único (EU), sendo aplicado somente um nível de tensão sobre a amostra (tensão confinante de 70 kPa e tensão desviadora de 280 kPa). Esse nível foi estabelecido a partir das formulações empíricas de Delgado et al. (2019), considerando uma ferrovia *heavy haul* com carga axial de 32,5 toneladas por eixo e velocidade média de operação de 80 km/h. Para tal, foi aplicado um pulso senoidal, a uma frequência de 2 Hz, com 100 ms de carga e 400 ms de repouso.

Utilizando o sistema de aquisição de dados, foi possível monitorar as principais configurações do ensaio, incluindo tensões, leituras dos transdutores, número de ciclos, ciclo atual, além dos tempos de carga e repouso em cada pulso. Contudo, devido às limitações do equipamento, não foi possível registrar o incremento de deformação correspondente a cada ciclo, sendo possível apenas a obtenção dos valores acumulados após o total de ciclos. Sendo assim, as deformações foram lidas a cada 50 mil ciclos até o total de 250 mil ciclos. Posteriormente, as medições foram realizadas nos ciclos de 350 mil, 450 mil, 550 mil, 700 mil e 1 milhão.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização física e mecânica do lastro

As partículas apresentaram uma resistência à compressão média de 120 MPa, se aproximando da rocha natural. No entanto, os agregados apresentam algumas diferenças nas propriedades físicas e mecânicas em comparação com os agregados de Conceição et al. (2022). Como ilustrado na Tabela 2, a resistência à compressão foi 3,71% inferior enquanto o desgaste por abrasão foi 62,3% superior. É notável que as partículas são mais porosas devido aos efeitos de uma reação adversa causada pelo aditivo superplastificante.

Tabela 2 – Propriedades do lastro.

Propriedade	Resultado desse estudo	UHPC*	Gnaisse*
Massa específica (kg/m³)	2330,03	2673,98	2634,86
Porosidade (%)	7,30	4,60	0,40
Teor de absorção de água (%)	3,10	1,90	0,20
Desgaste por abrasão (%)	20,50	12,63	10,93
Resistência à compressão (MPa)	119,66	132,30	124,27

* Dados de Conceição et al. (2022)

3.2 Caracterização das geogrelhas modelo

Após a realização dos ensaios de tração nas geogrelhas PET40 e PET65, foram definidos os critérios para a confecção das geogrelhas modelo. Dada a textura lisa presentenos polímeros PETG e PLA, foram observados escorregamentos das amostras nas garras de aperto frontal nos primeiros testes, influenciando as medições de deslocamento. Assim, nos próximos ensaios, foram aplicadas lixas de baixa gramatura nas superfícies de contato das garras. Os filamentos dessas geogrelhas também rompiam durante a execução dos ensaios. portanto, a espessura dos filamentos foi aumentada de 0,3 mm para 0,6 mm.

Conforme a Tabela 3, as geogrelhas modelo X (PETG) e modelo Y (PLA) apresentaram rigidez 64,7% e 84,0% superior às geogrelhas PET40 (33,5 kN/m) e PET65 (50,5 kN/m), respectivamente, considerando o fator escala de $1/\lambda^2$ proposto por Viswanadham & König (2004). Por outro lado, deve-se considerar que as resistências das geogrelhas prótotipo foram inferiores aos valores comerciais especificados pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades das geogrelhas.

Parâmetro	PET40	PET65	PETG	PLA
Abertura da malha (mm)	25,00	25,00	7,00	7,00
Largura dos filamentos (mm)	6,00	6,00	1,70	1,70
Espessura dos filamentos (mm)	1,00	1,00	0,60	0,60
Resistência à tração (kN/m)	29,23 (±0,95)	40,10 (±1,20)	2,86 (±0,01)	4,11 (±0,01)
Deformação (%)	7,12 (±0,43)	6,47 (±0,23)	2,37 (±0,03)	2,02 (±0,09)
Rigidez secante (kN/m)	410,35 (±29,56)	619,80 (±29,47)	120,69 (±1,63)	203,66 (±1,36)

3.3 Ensaios triaxiais de carga repetida

Como relatado por Qian et al. (2018), pode-se observar que os incrementos de deformação plástica foram superiores nos primeiros 350 mil ciclos até atingir uma tendência de estabilização, ainda que a condição de shakedown elástico não tenha sido alcançada. Tendo em vista que os ensaios DP foram realizados apenas

com um único nível de tensão, com interrupções a cada 50 mil ciclos até o total de 250 mil ciclos, é importante destacar que o condicionamento das amostras entre as leituras pode ter influenciado os resultados obtidos.

Em comparação ao ensaio sem reforço (DP-I), a geogrelha PETG apresentou uma redução de até 40,8% nas deformações (DP-II), enquanto a PLA reduziu em até 52,5% (DP-III) (Figura 6), demonstrando que os efeitos promovidos pelas geogrelhas foi positivo.

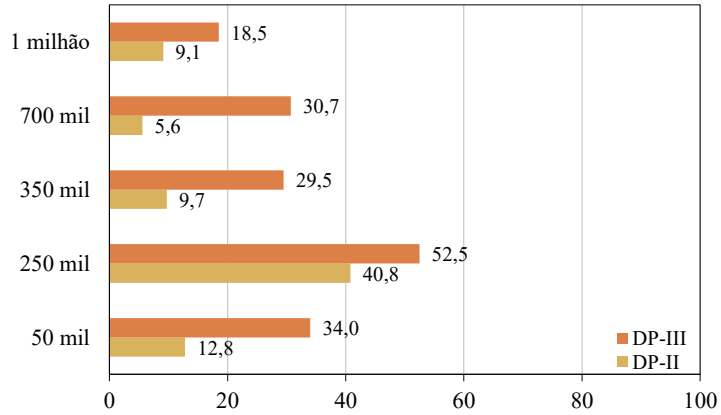


Figura 6 – Percentual de redução dos incrementos de deformação plástica por número de ciclos

A razão entre a abertura da malha (7 mm) e o diâmetro médio dos agregados (11,7 mm) igual a 0,6 corresponde a uma faixa de mobilização fraca em relação ao mecanismo de imbricamento. McDowell et al. (2006) recomendam valores entre 1,1 e 1,4 enquanto Indraratna et al. (2013) sugerem valores entre 0,95 e 1,2. Sendo assim, a abertura da malha pode ter impactado na interação entre o lastro e a geogrelha, evidenciando a influência desse parâmetro na deformabilidade do lastro como observado por Brown et al. (2007). Contudo, vale ressaltar que a elevada rigidez das geogrelhas modelo (Figura 7), aliada ao alto nível de confinamento (70 kPa), pode ter influenciado nos resultados obtidos. Portanto, novos estudos devem ser conduzidos utilizando um confinamento mais baixo para simular com maior fidelidade as condições do lastro na via. Além disso, recomenda-se também o uso de geogrelhas mais flexíveis e com uma faixa de mobilização superior.

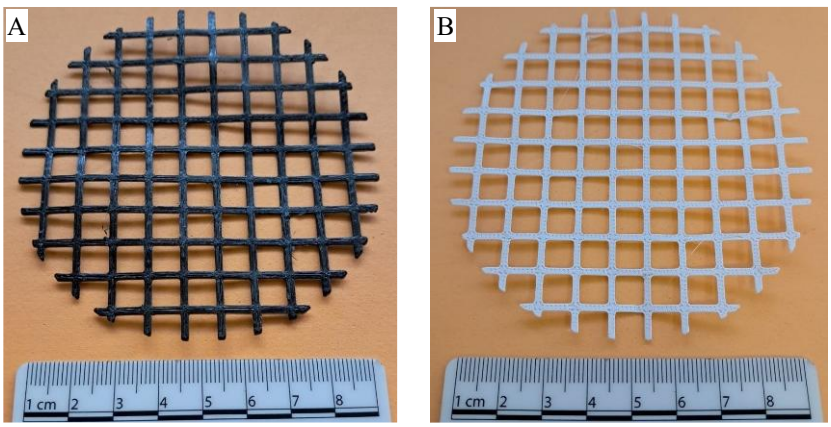


Figura 7 – Condição das geogrelhas após os ensaios de longa duração: (A) PETG e (B) PLA

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que os benefícios promovidos pelas geogrelhas foram mais evidentes nos primeiros ciclos de carga devido ao período de reacomodação dos grãos. Entretanto, os efeitos da interação lastro-geogrelha podem ter sido reduzidos pelos altos níveis de confinamento.

Em comparação com o PETG, o polímero PLA promoveu um maior enrijecimento do lastro em todas as leituras. Contudo, a elevada rigidez e a textura lisa das geogrelhas modelo inibiram o grau de adaptabilidade com os agregados, enquanto a abertura da malha influenciou a mobilização do efeito de imbricamento, resultando em uma flexibilidade de interação parcial com os grãos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERJ, pelo apoio financeiro, a HUESKER, pelo fornecimento das geogrelhas Basetrac Grid, a BLITZAR, pela confecção das geogrelhas modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREMA (2015). Manual for Railway Engineering: Vol. I – IV. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, Lanham, United States.

Brown, S. F.; Kwan, J.; Thom, N. H. (2007) Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (6), p. 326-335.

Conceição, K. S.; Maia, P. C. A.; Cordeiro, G. C. (2022) Use of ultra-high-performance concrete to produce standard coarse aggregates. *Journal of Testing and Evaluation*, 50 (2), p. 1224-1235.

CEN (2004). EN 13286-7: *Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*. Brussels, Belgium.

Delgado, B. G.; Fonseca, A. V.; Fortunato, E.; Maia, P. (2019) Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation. *Transportation Geotechnics*, 20.

Desbrousses, R. L. E.; Meguid, M. A.; Bhat, S. (2023) Experimental investigation of the effects of subgrade strength and geogrid location on the cyclic response of geogrid-reinforced ballast. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (67).

Indraratna, B., Ionescu, D., & Christie, H.D. (1998) Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (5), p. 439-449.

Indraratna, B.; Khabbaz, H.; Salim, W.; Christie, D. (2006) Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. *Ground improvement*, 10 (3), p. 91-101.

Indraratna, B.; Hussaini, S. K. K.; Vinod, J. S. (2013) The lateral displacement response of geogrid reinforced ballast under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 39 (3), p. 20-29.

Indraratna, B.; Ngo, N. T.; Rujikiatkamjorn, C.; Vinod, J. S. (2014) Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: Discrete element simulation. *International Journal of Geomechanics*, 14 (1), p. 34-44.

Lackenby, J.; Indraratna, B.; McDowell, G.; Christie, D. (2007) Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 57 (6), p. 527-536.

McDowell, G. R.; Harireche, O.; Konietzky, H.; Brown, S. F.; Thom, N. H. (2006) Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. *Geotechnical Engineering*, 159 (1), p. 35-48.

Qian, Y.; Tutumluer, E.; Mishra, D.; Kazmee, H. (2018) Triaxial testing and discrete element modelling of geogrid-stabilised rail ballast. *Ground Improvement*, 171 (4), p. 223-231.

Sgavioli, F.; Bernucci, L.; Costa, R.; Motta, R.; Moura, E. (2015) Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas. *Transportes*, 23 (2), p. 5-12.

Sun, Q. D.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S. (2016) Deformation and degradation mechanisms of railway ballast under high frequency cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (1).

Sweta, K.; Hussaini, S. K. K. (2020) Effect of geogrid on deformation response and resilient modulus of railroad ballast under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 264.

Viswanadham, B.V.S., & König, D. (2004) Studies on scaling and instrumentation of a geogrid. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5), p. 307-328.

Werkmeister, S.; Dawson, A. R.; Wellner, F. (2001) Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, 1757 (1), p. 75-81.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/29

Comportamento tensão-deformação de geocélulas preenchidas por resíduos da construção e demolição (RCD-R)

Bruna de Carvalho Sebastião
Graduanda, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, brunasebastiao03@gmail.com

Juliana Keiko Tsugawa
Professora Doutora, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, juliana.tsugawa@mackenzie.br

RESUMO: Geocélulas são estruturas poliméricas tridimensionais utilizadas em obras geotécnicas por suas funções de reforço, confinamento, estabilidade e distribuição de tensões. Usualmente, são preenchidas por materiais granulares convencionais. Em contrapartida, a disposição incorreta dos resíduos da construção e demolição (RCD) pode causar impactos ambientais relevantes, reforçando a importância de buscar alternativas sustentáveis para o seu reaproveitamento. Assim, visando a sustentabilidade em obras geotécnicas, foi estudado o comportamento tensão-deformação de geocélulas preenchidas com RCD reciclados (RCD-R), por meio de ensaios de compressão axial. Foram utilizados agregados reciclados (brita e pedrisco) e solo-brita reciclado (SB-1 e SB-2), e materiais convencionais (brita 1 e pedrisco). As tensões suportadas, considerando o critério de ruptura de 15% de deformação, pela brita e pedrisco convencionais, pedrisco reciclado, brita reciclada, SB-1 e SB-2 foram de aproximadamente 650 kN/m^2, 550 kN/m^2, 520 kN/m^2, 430 kN/m^2, 335 kN/m^2 e 130 kN/m^2, e os valores de rigidez foram de 1,73 kN/mm, 1,42 kN/mm, 1,28 kN/mm, 1,14 kN/mm, 0,82 kN/mm e 0,32 kN/mm, respectivamente. Os resultados indicam que, embora os agregados convencionais tenham apresentado melhor desempenho em termos de resistência e rigidez, a utilização de materiais reciclados mostra-se tecnicamente viável, desde que sejam consideradas as tensões atuantes em cada aplicação geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos da construção e demolição; geocélulas; ensaios de compressão axial; comportamento tensão-deformação; agregados.

ABSTRACT: Geocells are three-dimensional polymeric structures used in geotechnical works for reinforcement, confinement, stabilization, and stress distribution. They are usually filled with conventional granular materials. In contrast, the improper disposal of construction and demolition waste (CDW) may cause significant environmental impacts, highlighting the need for sustainable reuse alternatives. Thus, aiming to promote sustainability in geotechnical works, the stress–strain behavior of geocells filled with recycled CDW (RCD-R) was investigated through axial compression tests. Recycled aggregates (coarse crushed stone and stone chips), recycled soil–crushed stone mixtures (SB-1 and SB-2), and conventional materials (coarse crushed stone and stone chips) were used. Considering a failure criterion of 15% strain, the stresses sustained by conventional coarse crushed stone and stone chips, recycled stone chips, recycled coarse crushed stone, SB-1, and SB-2 were approximately 650, 550, 520, 430, 335, and 130 kN/m², respectively, while the corresponding stiffness values were 1.73, 1.42, 1.28, 1.14, 0.82, and 0.32 kN/mm. The results indicate that, although conventional aggregates performed better in terms of strength and stiffness, the use of recycled materials is technically feasible, provided that the stress levels involved in each geotechnical application are properly considered.

KEYWORDS: Construction and demolition waste; geocells; unconfined compression tests; stress-strain behavior; aggregates.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel fundamental no desenvolvimento urbano, representando aproximadamente 10% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (ABRECON, 2020). No entanto, esse setor também é responsável por grande parte da geração de resíduos sólidos no país. De acordo com a Associação

Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2021 foram coletadas pelos municípios mais de 48 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD), o que equivale a cerca de 227 kg por habitante/ano, evidenciando a relevância desse tipo de resíduo no contexto urbano e a necessidade de sua gestão adequada (ABRELPE, 2022). A gestão inadequada desses resíduos acarreta uma degradação ambiental, manifestada pelo assoreamento de cursos d'água, pela contaminação do solo e das águas subterrâneas, pelo entupimento de sistemas de drenagem, além da poluição visual e da proliferação de vetores de doenças. Nesse contexto, destacam-se legislações como a Resolução CONAMA n° 307/2002, a qual estabelece as diretrizes para a gestão dos RCD, e a Lei n° 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Tais legislações visam minimizar esses impactos e estimular o gerenciamento adequado (BRASIL, 2002; BRASIL, 2010). Dessa forma, a reciclagem surge como alternativa sustentável para mitigar esses impactos gerados pelo setor da construção civil e diminuir a extração de recursos naturais, contribuindo para a valorização desses resíduos. Porém, para aumentar o consumo dos resíduos da construção e demolição reciclados (RCD-R) são necessárias alternativas tecnicamente seguras e viáveis de reaproveitamento. Uma possibilidade de reaproveitamento consiste na utilização dos RCD-R como material preenchedor de geocélulas em substituição aos agregados naturais para obras de contenção e estabilização do solo.

As geocélulas são estruturas tridimensionais que promovem o confinamento lateral do material de preenchimento (normalmente solos granulares ou agregados naturais), melhorando sua resistência ao cisalhamento e à deformação (AVESANI NETO, 2013; ZHOU; CHEN; ZHU, 2009). Poucos estudos abordam o comportamento mecânico de geocélulas e os trabalhos identificados concentram-se no estudo do desempenho de geocélulas associadas a areias e outros tipos de solos em outras aplicações (BATHURST; KARPURAPU, 1993; ZHOU; CHEN; ZHU, 2009; LEI *et al*., 2024) ou ao estudo do RCD-R (CHEN; HUANG; HUANG, 2010). Avesani Neto (2013) desenvolveu um novo método de previsão da capacidade de carga de solos reforçados com geocélulas, considerando os mecanismos de desenvolvimento da resistência do solo de fundação e da geocélula. Seus resultados indicaram que o modelo se adequou de forma satisfatória para diferentes características da geocélula (geometria e material de constituição), do solo de fundação e de preenchimento (diferentes tipos de areia e argila) e da geometria do carregamento (placas circular, retangular e corrida). Garcia (2021) desenvolveu um equacionamento analítico capaz de modelar o comportamento tensão-deformação das células e seu material de preenchimento, considerando o aumento de confinamento gerado pelas paredes da geocélula, a não linearidade do comportamento do solo, os esforços de compactação do solo, a contribuição da rigidez e da geometria da geocélula e a compatibilidade de deformações, com satisfatória capacidade de previsão dos resultados. Estudos recentes têm demonstrado o potencial dos RCD-R em aplicações geotécnicas devido às suas características de resistência com ângulo de atrito entre 30° e 45° (BORDOLOI; AFOLAYAN; NG, 2022) e estabilidade. De acordo com Santos (2007) e Dutta; Kumar; Singh (2021), que analisaram o RCD-R como preenchedor de muros de solo reforçado com geogrelhas, os materiais reciclados apresentaram resultados satisfatórios e alguns até mesmo superiores, em comparação aos tradicionais, quando avaliadas a capacidade de suporte e deformabilidade. Além dessas propriedades, os ensaios de arrancamento e tração também obtiveram resultados favoráveis para a combinação dos reciclados com os geossintéticos. Apesar dos resultados apresentados por estes autores, a utilização dos RCD-R associados a geossintéticos para aplicações geotécnicas permanece pouco investigada, especialmente no que se refere ao uso de RCD-R como material de preenchimento de geocélulas, configurando uma lacuna relevante na literatura geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais convencionais e reciclados

Os materiais utilizados foram os resíduos da construção e demolição reciclados (RCD-R), agregados convencionais para fins comparativos, e geocélulas. Os RCD-R foram obtidos em duas usinas de reciclagem: ECO-X, localizada em Guarulhos-SP (Figura 1a), que forneceu brita 1 reciclada, brita 2 reciclada e pedrisco reciclado; e a Usina Verde de Paulínia-SP (Figura 1b), de onde foi coletado solo-brita de coloração alaranjada, com predomínio de fração areia e presença de argila.

Os materiais reciclados apresentaram elevada heterogeneidade, com ocorrência de fragmentos de cerâmica, vidro, concreto e britas naturais. Após a coleta, foram ensacados, identificados e armazenados em paletes no laboratório de solos da universidade.

Os agregados convencionais (brita 1 e pedrisco) são provenientes de rochas basálticas e foram fornecidos pela empresa Quibrita (Figura 1c), localizada em Campinas-SP.

A geocélula empregada foi o modelo MACWEB 1812.8, em polietileno de alta densidade, fornecido pela Maccaferri. As dimensões consideradas na moldagem dos corpos de prova corresponderam à abertura nominal de instalação de 245 mm x 210 mm, conforme especificação do fabricante.



(a) (b) (c)

Figura 1. (a) Pilha de brita 1 e pedrisco da Usina ECO-X; (b) Pilha de solo-brita da Usina Verde; (c) Brita 1 fornecida pela Quibrita.

2.2 Preparação dos corpos de prova

A brita reciclada proveniente da usina Eco-X foi peneirada na malha de 19 mm para separação da brita 1 e remoção da brita 2, considerada excessivamente graúda para o preenchimento das geocélulas. O solo-brita também foi peneirado na mesma abertura de malha para a retirada de partículas grossas, enquanto o pedrisco foi utilizado conforme coletado.

Os corpos de prova foram moldados em geocélulas unitárias, recortadas com folga de aproximadamente 2 cm após a solda. Foram moldados sete corpos de prova compostos por geocélula unitária e material de preenchimento: brita 1 convencional (B1C), brita 1 reciclada (B1R), pedrisco convencional (PC), dois com pedrisco reciclado (PR1 e PR2) e dois com solo-brita na umidade ótima (SB-1: moldado cinco dias antes do ensaio e SB-2: moldado e ensaiado imediatamente). Os CPs de solo-brita foram preparados para avaliar a influência da perda de umidade no comportamento tensão-deformação. Todos os CPs foram moldados sobre chapa metálica de 5 mm. Durante a moldagem foi realizado o controle da massa específica dos materiais por meio de pesagem. O preenchimento da geocélula foi feito manualmente por camadas, aplicando-se agitação para a redução de vazios e garantindo a abertura nominal da geocélula indicada pelo fabricante.

Devido ao formato irregular da célula, a área de carregamento foi determinada no software AutoCAD a partir do traçado, em escala, do polígono correspondente ao topo da geocélula preenchida de acordo com a abertura especificada pelo fabricante.

2.3 Ensaios de umidade higroscópica e compactação do solo-brita

Determinou-se a umidade higroscópica dos materiais granulares (B1C, B1R, PC, PR1 e PR2, SB-1 e SB-2) em triplicatas para os agregados e em quadruplicata para o solo-brita. O ensaio de compactação foi realizado exclusivamente para o solo-brita, conforme a ABNT NBR 7182, na energia Proctor Normal com reuso de material, cujo objetivo foi determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima. O material, previamente peneirado (#19 e #4,8), foi ensaiado em cilindro grande (2085 cm^3), utilizando soquete de 4536 g e altura de queda de 457 mm, em cinco camadas com 12 golpes cada. A curva de compactação foi obtida através do ajuste de duas retas aos pontos situados, respectivamente, no ramo seco e no ramo úmido.

2.4 Ensaio de compressão axial

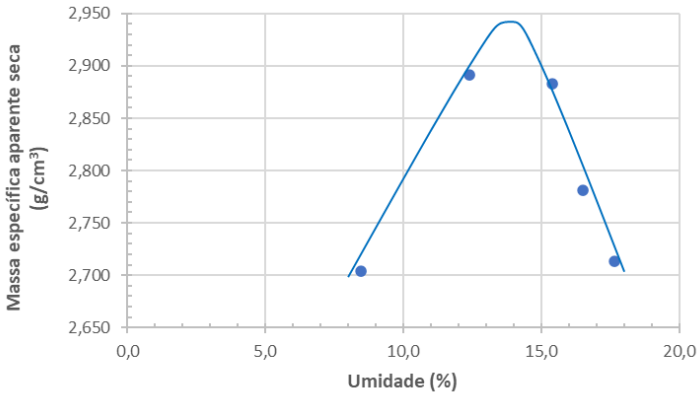
Os ensaios de compressão axial foram realizados em equipamento Instron 1000DX do laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Os corpos de prova (CP) foram centralizados na base de carregamento e alinhados com o pistão, de modo a evitar concentrações pontuais de tensão. A velocidade de deformação adotada foi de 0,02 mm/s (1,2 mm/min), correspondente a 1%H/min (H: altura inicial do CP), conforme NBR 12770:2022. Cada ensaio foi conduzido até a ruptura ou até aproximadamente 70 mm de deslocamento axial, equivalente a cerca de 58% de deformação específica, valor superior ao limite normativo de 15%.

Com os registros de carga e deslocamento fornecidos pelo equipamento, foram calculadas as curvas tensão-deformação de cada corpo de prova, permitindo a comparação do comportamento mecânico entre os diferentes materiais utilizados como preenchimento das geocélulas. Porém, os resultados foram apresentados considerando deformação máxima de 15%. A rigidez foi determinada como o coeficiente angular de uma regressão linear ajustada à curva carga–deslocamento entre 0 e 15% de deformação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curva de compactação do solo-brita

A partir do ajuste da curva de compactação aos pontos experimentais, determinou-se a umidade ótima de 14% e massa específica aparente seca máxima de 2,94 g/cm³, conforme Figura 2a. Em um dos pontos da curva de compactação, a medição de umidade foi influenciada pela presença de um fragmento graúdo isolado de RCD-R na amostra coletada, não refletindo adequadamente a umidade correspondente ao material compactado. Assim, o comportamento do conjunto foi interpretado com base na tendência definida pelos demais pontos experimentais. Este fato ressalta a heterogeneidade do material.





(a) (b)

Figura 2. (a) Curva de compactação do solo-brita e (b) Fragmento grosso encontrado na cápsula para medida de umidade.

3.2 Ensaios de compressão axial

A partir dos ensaios de compressão axial e controles realizados, foi elaborada a Tabela 1 que apresenta os valores de umidade higroscópica e um resumo dos parâmetros obtidos para cada CP (controle da geometria e da massa específica) antes e após os ensaios de compressão axial (Figura 3).

De modo geral, após a compressão, observou-se redução da altura (Hcp) e aumento das dimensões laterais, comprimento e largura (Ccp e Lcp), indicando expansão lateral do conjunto geocélula-material. A massa específica dos CPs moldados, calculada a partir da massa do material e do volume padronizado de 5412 cm³, variou entre 0,961 g/cm³ e 1,210 g/cm³, sendo os maiores valores observados para os CPs SB-1 e SB-2, preenchidos com solo-brita.

Tabela 1. Propriedades e características geométricas dos corpos de prova preenchidos

Parâmetros		B1R	B1C	PR1	PR2	PC	SB-1	SB-2
Antes do ensaio	Hcp (cm)	13,38	12,45	12,35	12,45	12,45	12,3	12,3
	Ccp (cm)	24,5	24,2	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
	Lcp (cm)	21	20,5	21	21	20	20	20
Após o ensaio	Hcp (cm)	8,1	7,6	9,55	7,65	5,8	5,8	7,2
	Ccp (cm)	25,5	26	-	24	24	27	25
	Lcp (cm)	26	28,7	25	27,6	29	29	29,4
Umidades Higroscópicas (%)		1,14	0,97	-	2,04	0,15	5,96	5,96
massa (kg)		5,328	5,9	5,36	5,2	5,4	6,55	6,26
Volume padronizado (cm³)		5412	5412	5412	5412	5412	5412	5412
Massa específica (g/cm³)		0,984	1,09	0,99	0,961	0,998	1,210	1,157
Rigidez (kN/mm)		1,14	1,73	-	1,28	1,42	0,82	0,32



(a) (b)

Figura 3. Geocélula única preenchida por brita 1 reciclada (B1R): (a) antes do ensaio de compressão e (b) após o ensaio de compressão.

No primeiro CP com pedrisco reciclado (PR1) ocorreu ruptura da solda da geocélula durante o ensaio (Figura 4), assim, foi moldado um novo CP (PR2), com o objetivo de investigar se o descolamento da solda estava relacionado ao material reciclado ou à geocélula. No novo ensaio, para o PR2 a ruptura da solda não ocorreu. Além disso, o gráfico tensão-deformação dos PR1 e PR2 (Figura 5) demonstra que a ruptura ocorreu para deformações muito baixas, o que representa um comportamento distinto do esperado para esse material, sugerindo que a ruptura foi consequência apenas de problemas na solda.

Considerando o critério de ruptura correspondente a 15% da altura do corpo de prova, os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial em geocélulas preenchidas com diferentes materiais indicaram que as tensões suportadas foram aproximadamente de 650 kN/m² para B1C, 550 kN/m² para PC, 520 kN/m² para PR2, 430 kN/m² para B1R, 335 kN/m² para SB-1 e 130 kN/m² para SB-2 (Figura 6). De forma geral, os resultados indicaram que os materiais naturais suportam maiores tensões quando comparados aos reciclados, considerando deformações até 15%, ou seja, o conjunto geocélula-material convencional comporta-se de forma mais rígida quando comparado com os materiais reciclados. O cálculo da rigidez corroborou esta

observação. Para B1C, PC, PR2, B1R, SB-1 e SB-2 os valores de rigidez foram de 1,73 kN/mm, 1,42 kN/mm, 1,28 kN/mm, 1,14 kN/mm, 0,82 kN/mm e 0,32 kN/mm, respectivamente



(a) (b)

Figura 4. (a) Corpo de prova na Instron durante ensaio; (b) Ruptura da solda da geocélula preenchida com pedrisco reciclado (PR1).

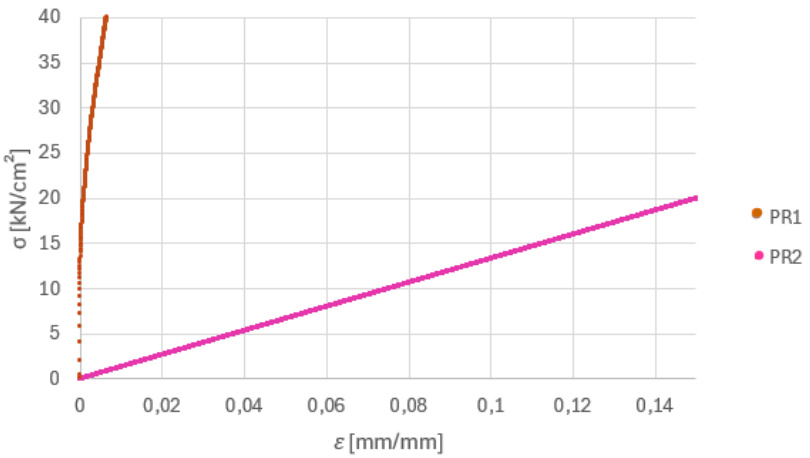


Figura 5. Gráfico tensão x deformação dos corpos de prova PR1 e PR2.

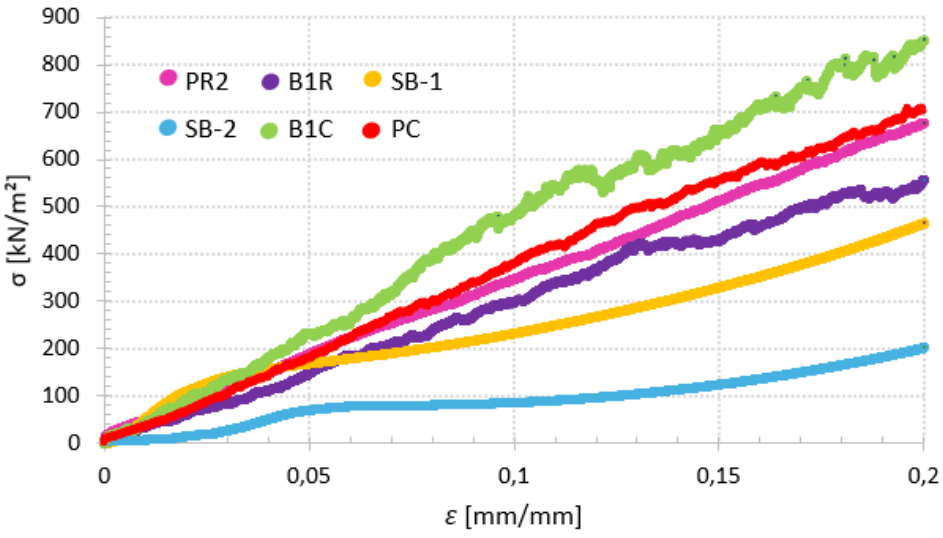


Figura 6. Gráfico de tensão x deformação de todos os corpos de prova ensaiados.

Para os agregados convencionais (B1C e PC), observa-se que os resultados estão de acordo com o esperado, ou seja, quanto maior a granulometria do material, maior o atrito entre partículas e, consequentemente, maior resistência é atribuída ao conjunto geocélula-material. Porém, a mesma correlação não ocorreu entre os agregados reciclados, nos quais se observa que a resistência do pedrisco reciclado (PR2) é maior que a da brita reciclada (B1R), resultado contrário ao esperado considerando a granulometria dos materiais. A análise das curvas granulométricas de ambos os materiais obtidas antes e após o ensaio de compressão poderia explicar tal comportamento. Isso porque um pedrisco bem graduado poderia ter maior resistência em função do seu maior empacotamento. Assim, sugere-se esta análise para futuras pesquisas. Outro fator que poderia explicar tal comportamento é a heterogeneidade dos materiais reciclados, assim, há a possibilidade da brita reciclada ter sido composta por materiais menos resistentes que o pedrisco reciclado.

Com relação aos CP de solo-brita, o SB-1 (ensaiado 5 dias após a moldagem) suportou maiores valores de tensão quando comparado com o SB-2 (moldado e ensaiado imediatamente). Esta diferença de comportamento pode estar relacionada à heterogeneidade do material e consequente variação granulométrica, porém, este controle não foi realizado e é sugerido para pesquisas futuras. O SB-1 foi moldado com umidade (w) de 15,70% e massa específica (ρ) de 1,210 g/cm^3, porém, no momento do ensaio, o CP apresentou w= 10,35%. Já o SB-2 foi moldado e ensaiado com w=12,47% e ρ=1,157 g/cm^3. Apesar da diferença de ρ entre os CPs, ela é pequena para explicar a diferença de comportamento. Provavelmente, este comportamento está associado à perda de umidade sofrida pelo SB-1 durante o armazenamento do CP e, consequentemente, com possível influência da variação da pressão neutra durante o ensaio de compressão. O tempo de armazenamento (cura de 5 dias) também pode ter influenciado o comportamento do solo-brita, considerando que em sua composição existem materiais cimentícios que podem ter sido ativados com o umedecimento, formando uma estrutura resistente.

4 CONCLUSÕES

Os materiais convencionais (brita 1 e pedrisco) foram os que conferiram maior resistência e rigidez ao conjunto geocélula-material preenchedor. Os piores desempenhos foram obtidos pelos CPs de solo-brita.

Os resultados deste estudo indicam que a granulometria e a resistência do material preenchedor tendem a influenciar o comportamento mecânico das geocélulas, embora a variabilidade observada entre os materiais avaliados indique que outros fatores também podem ser relevantes. De forma geral, observou-se tendência de aumento da rigidez com o aumento da resistência do material e da granulometria, exceto para o pedrisco reciclado, que apresentou resistência maior que a da brita reciclada, o que sugere a influência adicional de fatores como a heterogeneidade dos RCDs e a gradação granulométrica dos corpos de prova.

A diferença de comportamento entre os corpos de prova de solo-brita pode estar associada, principalmente, à variação de umidade observada entre os ensaios, bem como à possível presença de materiais cimentícios que, após o umedecimento e o período de cura, podem ter contribuído para o aumento da resistência do SB-1.

Os resultados indicaram que o comportamento do conjunto geocélula-agregado é fortemente influenciado pelo comportamento do material preenchedor.

Conclui-se que, apesar dos materiais convencionais atingirem valores maiores de resistência e rigidez, os materiais reciclados também demonstraram bom desempenho, reforçando o potencial de aplicação de materiais reciclados a depender do nível de tensões atuantes na obra geotécnica.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à empresa Maccaferri e, em especial, à Eng. Júlia Fernandes Approbato, pelo apoio e pelo fornecimento das geocélulas utilizadas nesta pesquisa; às usinas ECO-X, Usina Verde e Quibrita, pela disponibilização e doação dos materiais empregados nos ensaios experimentais; e ao Prof. Dr. Pablo Krahl, pelas valiosas contribuições na qualificação e na defesa do trabalho, bem como pelas sugestões para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (2020). Pesquisa setorial ABRECON 2020. São Paulo: Ministério Público de São Paulo.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2022). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: https://abrelpe.org.br/publicacoes/panorama/. Acesso em: 21 abr. 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. Solo — Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 12770. Solo — Ensaio de compressão simples. Rio de Janeiro.

Avesani Neto, J. O. (2013). Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Bathurst, R. J.; Karpurapu, R. (1993). Large-scale triaxial compression testing of geocell-reinforced granular soils. Journal of Geotechnical Engineering, 119 (3), p. 573–590.

Bordoloi, S.; Afolayan, O. D.; Ng, C. W. W. (2022). Feasibility of construction demolition waste for unexplored geotechnical and geo-environmental applications: a review. Construction and Building Materials, 356, 129230.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

Chen, Z. P.; Huang, K. W.; Huang, J. Y. (2010). Experimental research on the flexural strength of recycled coarse aggregate concrete. In: International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China, p. 1041–1043. IEEE.

Dutta, S. C.; Kumar, S.; Singh, R. (2020). Geogrid mechanical damage caused by recycled construction and demolition waste (RCDW): Influence of grain size distribution. Soils and Rocks, 43 (2), p. 231–246.

Garcia, R. S. (2021). Modelagem analítica de solos reforçados com geocélulas: aplicação na obtenção do fator de melhora do módulo (MIF) e do comportamento tensão/deformação da célula. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Geotécnica), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Lei, H.; Ma, T.; Feng, S.; Wang, L. (2024). Confinement effect of geocell on the mechanical characteristics of reinforced sand subgrade. Transportation Geotechnics, 48, 101336.

Santos, E. C. G. dos (2011). Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos.

Zhou, H.; Chen, W.; Zhu, H. (2009). Experimental study on geocell-reinforced sand under cyclic loading. Geotextiles and Geomembranes, 27 (3), p. 201–208.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/30

Danos de Instalação em Geogrelhas Tecidas de Poliéster: Microdanos e Implicações nos Fatores de Redução em RAP

Fernando Affonso Névoa
Doutorando, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil, fernandonevoa@estudante.ufscar.br

Natália de Souza Correia
Professora, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil, ncorreia@ufscar.br

Fernando H. M. Portelinha
Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Este estudo analisou a perda de resistência por danos de instalação em geogrelhas tecidas de poliéster causada pelo uso de fresado de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como material de aterro, comparando-a aos danos provocados por areia. Foram construídas duas seções experimentais em escala real, compactadas com procedimentos padrão de campo, nas quais quatro tipos de geogrelhas foram instalados sobre camadas de 30 cm de RAP ($D_{máx}$ = 38,1 mm) e de areia ($D_{máx}$ = 5,66 mm). Após a instalação, as amostras foram exumadas e submetidas a ensaios de tração para determinação dos fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}). A análise incluiu a inspeção por microscopia eletrônica de varredura (MEV), avaliando a influência da granulometria do material e das características da geogrelha (abertura de malha e largura dos filamentos) na magnitude e no mecanismo de dano. Os fatores de redução por danos de instalação variaram entre 1,36 e 1,59 para o RAP e entre 1,27 e 1,42 para a areia. Na areia predominaram abrasão superficial e micro-punção, enquanto no RAP observaram-se abrasão, corte e contusão. Conclui-se que os danos de instalação não dependem exclusivamente do diâmetro máximo do material de aterro, mas principalmente da compatibilidade entre a abertura de malha da geogrelha e o diâmetro modal dos agregados.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelhas, Danos de Instalação, RAP, Areia, Fator de Redução.

ABSTRACT: This study evaluated tensile strength loss due to installation damage in woven polyester geogrids caused by the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) as backfill material, comparing it with damage induced by sand. Two full-scale experimental sections were constructed and compacted using standard field procedures, in which four types of geogrids were installed over 30 cm layers of RAP (D_{max} = 38.1 mm) and sand (D_{max} = 5.66 mm). After installation, specimens were exhumed and subjected to tensile testing to determine installation damage reduction factors (RF_{ID}). The analysis included scanning electron microscopy (SEM), assessing the influence of backfill gradation and geogrid characteristics (aperture size and filament width) on damage magnitude and mechanisms. The reduction factors for installation damage ranged from 1.36 to 1.59 for RAP and from 1.27 to 1.42 for sand. Surface abrasion and micro-puncturing predominated in the sand, whereas abrasion, cutting, and impact-related damage were observed in the RAP. It is concluded that installation damage does not depend exclusively on the maximum particle size of the backfill material, but primarily on the compatibility between the geogrid aperture size and the modal aggregate diameter.

KEYWORDS: Geogrids, Installation Damage, RAP, Sand, Reduction Factor.

1 INTRODUÇÃO

O uso de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) como substituto a materiais naturais na engenharia geotécnica tem se mostrado uma prática sustentável e economicamente viável. O RAP é um resíduo composto por agregados e ligante asfáltico, proveniente do processo de manutenção por fresagem da camada de revestimento do pavimento, esse resíduo pode ser usado em diversas obras de infraestrutura (FHWA, 2024). O emprego desse material nessas obras geotécnicas diminui o consumo de agregados naturais e a emissão de gases de efeito estufa, associados a extração e transporte desses materiais (Sunarjono & Hidayati, 2019). De acordo com Lopes et al. (2024) o Brasil gerou pouco mais de 2 milhões de toneladas de fresado entre os anos

2019 e 2021. Embora o interesse em seu reuso tenha crescido nos últimos anos, pouco se sabe sobre o seu comportamento quando usado com geossintéticos.

Nesse contexto, a aplicação do RAP como camada granular reforçada ou mesmo em estruturas de solo reforçado demanda a avaliação de sua interação com geossintéticos, especialmente com geogrelhas, amplamente utilizadas para melhoria de desempenho e estabilidade. Durante o processo construtivo, a etapa de lançamento e compactação do material de aterro pode induzir danos mecânicos nos elementos de reforço, comprometendo sua capacidade resistente. Assim, compreender como as características físicas e granulométricas do RAP influenciam os mecanismos de dano nas geogrelhas torna-se fundamental para garantir desempenho estrutural e segurança nos projetos.

Os danos que as geogrelhas sofrem durante a instalação são quantificados por fatores de redução (FR), definidos como a razão entre a resistência à tração última da geogrelha virgem e da geogrelha danificada (exumada). Esses fatores permitem ajustar os parâmetros de resistência utilizados em projeto para valores compatíveis com as condições de campo, por meio da aplicação de fatores parciais de segurança que consideram a degradação decorrente da construção (Koerner et al., 2023). A severidade dos danos está associada às características físico-mecânicas do geossintético e do material de aterro, como tipo de polímero, abertura de malha, graduação, forma e diâmetro máximo dos agregados (Barbosa et al., 2021; Hufenus et al., 2005; Lackner, 2012; Lim & McCartney, 2013). Em especial, os danos causados por agregados dependem da distribuição granulométrica, do diâmetro máximo e do formato dos grãos, bem como das propriedades da geogrelha, incluindo polímero e processo de fabricação (Hufenus et al., 2005). Além disso, o desempenho e a interação com o aterro estão diretamente relacionados às suas características físicas e mecânicas (Lackner, 2012).

Em geral, os danos de instalação em geogrelhas são governados apenas pelo diâmetro máximo do material de aterro, mas principalmente pela compatibilidade dimensional entre a abertura de malha da geogrelha e o diâmetro mais frequente dos agregados, bem como pelas características superficiais dos grãos. Assim, materiais com granulometria semelhante podem induzir mecanismos de dano distintos, resultando em fatores de redução significativamente diferentes. E apesar do crescente uso do RAP em obras geotécnicas, ainda não há estudos sistemáticos que investiguem, em escala real e com análise microestrutural, os mecanismos de danos de instalação em geogrelhas e sua implicação direta nos fatores de redução adotados em projeto, favorecendo a aplicação de materiais alternativos em obras geotécnicas.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é quantificar e interpretar mecanicamente os danos de instalação em geogrelhas tecidas de poliéster instaladas em camada de fresado RAP e camada areia, correlacionando os mecanismos de microdano observados por microscopia eletrônica de varredura com os fatores de redução obtidos experimentalmente em escala real. Para isso foram construídas seções experimentais em campo seguindo as especificações da norma D5818 (ASTM, 2022).

2 MATERIAIS

2.1 Geogrelhas

Este estudo avaliou o desempenho de quatro geogrelhas tecida de poliéster (PET) revestidas com policloreto de vinila (PVC) com diferentes resistências última à tração. As especificações e características físicas das geogrelhas usadas nesse trabalho estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização das geogrelhas utilizadas neste estudo.

		Norma	Unid.	GG1	GG2	GG3	GG4
Propriedades Mecânicas	Resistência à Tração última (Long.)	ASTM D6637	kN/m	59.0	83.6	133.4	155.5
	Alongamento Resistência Ultima	ASTM D6637	%	<12	<12	<12	<12
	Resistência à tração em 2% alongamento	ASTM D6637	kN/m	9.6	14.5	24.0	29.6
	Resistência à tração em 5% alongamento			13.9	22.6	345.0	42.8
	Abertura Nominal Longitudinal		mm	24	29	25	27
	Abertura Nominal Transversal		mm	25	24	20	15

As amostras de geogrelhas a serem utilizadas para caracterização física em laboratório, e no trecho experimental, foram retiradas do mesmo rolo de fabricação. As geogrelhas virgens, assim como as geogrelhas danificadas, foram submetidas a ensaios de resistência à tração no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da Universidade Federal de São Carlos (LabGEO/UFSCar), conforme a norma D6637 (ASTM, 2023), utilizando o método *Single Rib*.

2.2 Pavimento asfáltico fresado (RAP) e areia

O RAP utilizado neste estudo foi obtido do processo de manutenção por fresagem de um pavimento asfáltico de uma rodovia da cidade de Araraquara, no interior do estado de São Paulo, Brasil. O RAP coletado é composto por grãos angulares, com índices de forma variando conforme as seguintes passagens: $IF_{38.1} = 3{,}61$; $IF_{25,4} = 3{,}38$; $IF_{19,1} = 2{,}98$; $IF_{12,7} = 2{,}57$; e $IF_{9,52} = 2{,}61$, indicando elevada angularidade especialmente nas frações de maior diâmetro. Os grãos apresentam textura superficial áspera, revestidos por cimento asfáltico de petróleo (CAP) com teor de 5,85%, determinado de acordo com o ensaio da norma D6307 (ASTM, 2019). É importante ressaltar que as propriedades físico-mecânicas do RAP são influenciadas pela configuração da fresadora, especialmente pelo espaçamento das ferramentas de corte (bits) e pela velocidade do cilindro de fresagem, conforme diretrizes da FHWA (2023).

A areia, por sua vez, foi adquirida em comércio local, apresenta-se limpa e em coloração amarelada. Por meio das imagens de microscopia, os grãos foram classificados como tendo forma angular segundo a norma D2488 (ASTM, 2017). As curvas granulométricas dos materiais utilizados neste estudo é apresentada na Figura 1. É importante notar na Figura 1 que a areia natural adotada como material de referência tem composição granulométrica mais fina ($D_{50} = 0{,}3$) que o agregado de RAP ($D_{50} = 8$).

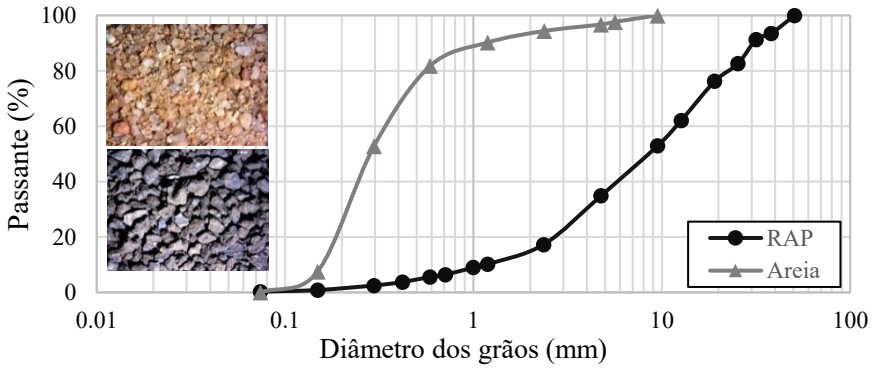


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do RAP e da areia natural.

3 METODOLOGIA

3.1 Execução das seções experimentais

Para avaliar o dano de instalação das geogrelhas devido uso em camada de RAP e em camada de areia, foram construídas duas seções experimentais, cada uma utilizando um dos materiais propostos. A execução do canteiro experimental seguiu as diretrizes da norma D5818 (ASTM, 2022), empregando-se equipamentos e procedimentos similares aos utilizados em obras geotécnicas.

Inicialmente, o terreno natural foi preparado por meio de limpeza e remoção da camada superficial de vegetação com o uso de pá carregadeira, seguida do nivelamento da área. O controle de compactação foi realizado na camada de base, utilizando um cilindro de controle com volume conhecido. Para atingir grau de compactação superior ao mínimo desejado na norma foram aplicadas passadas do rolo vibratório liso de 4,2 toneladas sobre a camada de agregado RAP e sobre a camada de areia, atingindo graus de compactação de 102,5% e 109,3% respectivamente. Os graus de compactação foram determinados em relação à densidade seca máxima do Proctor Modificado. Valores superiores a 100% são compatíveis com materiais granulares compactados por energia vibratória, pois o ensaio Proctor não reproduz integralmente o rearranjo particulado promovido por rolos vibratórios em campo.

Cada seção experimental (Figura 2) apresentou dimensões de 3,20 m de largura por 5,10 m de comprimento, sendo composta por uma camada de base de agregados com 12 cm de espessura, seguida da instalação da geogrelha, e uma camada de topo com 20 cm.

Em seguida, os agregados foram lançados diretamente sobre as geogrelhas com o auxílio de pá carregadeira, adotando-se uma altura de queda de 1,20 m. Essa altura foi definida por representar condições típicas de campo e por não provocar a dispersão das frações mais finas dos materiais.

Após a distribuição uniforme do material, foi realizada a compactação da camada de topo, finalizando a execução das seções. Após 24 horas da conclusão da construção da seção experimental, foi realizada a exumação das geogrelhas, de forma manual, sem o uso de equipamentos mecanizados, com o objetivo de evitar danos adicionais. A exumação consistiu na remoção cuidadosa dos agregados até a completa exposição das geogrelhas. Somente após estarem totalmente livres dos agregados sobre sua superfície, as geogrelhas foram retiradas e armazenadas adequadamente no laboratório, garantindo que os danos observados fossem exclusivamente decorrentes do processo de instalação.



Figura 2. Execução da seção experimental.

3.2 MEV e Microscopia Digital

Para uma avaliação dos danos e microdranos causados pelos agregados nas geogrelhas, foram realizadas análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microscopia digital. O equipamento utilizado para o ensaio de MEV foi o modelo MIRA da TESCAN, com ampliação variando de 0 a 1000 vezes. Considerando que a análise nesse tipo de equipamento pode ser prejudicada pela presença de poeira ou resíduos dos agregados, as amostras foram limpas cuidadosamente com pincel de cerdas finas e macias, evitando danos adicionais as geogrelhas. Amostras das quatro geogrelhas danificadas por areia e por RAP, além de amostras virgens (controle) foram cortadas para análise.

A microscopia digital foi realizada com equipamento da ZEISS, equipado com uma câmera digital AxioCam ERc, com ampliação de 0 a 20 vezes. A seleção das amostras de geogrelhas foi baseada na presença de danos característicos observados, mas que também apresentassem áreas intactas ao redor, para que fosse possível comparar as camadas danificadas e íntegras do material. Foi realizado o ensaio de microscopia nos agregados RAP e areia, para que pudesse avaliar a forma dos grãos mais finos do material.

3.3 Análise Estatística

Inicialmente, foi realizada a verificação da normalidade dos dados amostrais, para garantir que os métodos estatísticos paramétricos fossem adequados. A normalidade foi testada utilizando o teste de Shapiro-Wilk, amplamente utilizado devido à sua eficácia em detectar desvios da distribuição normal em amostras com N>30. O teste calculou o W estatístico e o valor p correspondente, sendo este último usado para avaliar a hipótese nula de que os dados seguiram uma distribuição normal.

Confirmada a normalidade, foram calculadas as principais medidas de estatísticas descritiva, incluindo média amostral, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão e os valores mínimo e máximo, conforme apresentado na Tabela 2. A média foi adotada como medida de tendência central das resistências das geogrelhas, enquanto o desvio padrão foi utilizado para quantificar a dispersão dos dados.

Em seguida, realizou-se a análise de valores discrepantes, com base no intervalo interquartil. Valores identificados como outliers foram excluídos da amostra, uma vez que poderiam influenciar de forma significativa a interpretação dos resultados. Após a remoção dos outliers, foi determinado o intervalo de confiança com nível de 95%, utilizando-se a distribuição de *Student*, permitindo estimar a faixa de valores na

qual se encontra a média populacional com determinado grau de confiança e avaliar a precisão das estimativas obtidas.

Tabela 2. Estatistica Descritiva

Geogrelha	Nº Corpos-de-prova	Média (kN/m²)	Desvio Padrão	COV	IQR	Intervalo Confiança 95%		Shapiro-Wilk	
						Limite Inferior	Limite Superior	W	P
GG1-V	10	59.0	2.23	3.78	2.81	57.4	60.6	0.928	0.426
GG2-V	10	83.6	2.43	2.91	2.15	81.9	85.3	0.910	0.284
GG3-V	10	133.4	4.25	3.19	6.57	130.4	136.5	0.919	0.346
GG4-V	10	155.5	5.92	3.81	7.35	151.3	159.7	0.872	0.105
GG1-RAP	32	37.0	3.94	10.64	6.51	35.6	38.5	0.945	0.102
GG2-RAP	36	59.7	5.47	9.16	6.38	57.8	61.5	0.981	0.768
GG3-RAP	36	98.3	9.80	9.96	13.14	95.0	101.6	0.966	0.329
GG4-RAP	32	105.1	12.93	12.30	18.47	100.5	109.8	0.978	0.741
GG1-Areia	34	46.4	4.24	9.15	5.64	44.9	47.9	0.970	0.459
GG2-Areia	35	64.1	5.39	8.40	7.87	62.3	66.0	0.976	0.612
GG3-Areia	35	99.4	10.67	10.73	13.85	95.8	103.1	0.959	0.212
GG4-Areia	33	109.5	7.71	7.04	8.83	106.8	112.2	0.965	0.361

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Danos visuais observados na Geogrelha

Alguns dos danos mecânicos observados nas geogrelhas foram visualmente identificados, como abrasão, corte, desfilamento e esmagamento, e correspondem aos mesmos tipos caracterizados por Lopes (2006) e por Lim & McCartney (2013). A Figura 3 apresenta os principais danos mecânicos em geogrelhas. Nos testes realizados em camada de areia, os danos observados foram menos severos, sendo os danos visualmente constatados em sua grande maioria sendo do tipo abrasão, e em alguns poucos pontos foram observados danos de desfilamento. Os danos recebidos na geogrelha exumada do fresado RAP foram mais severos em comparação com aqueles constatados na areia. Foram observados danos por abrasão, desfilamento, esmagamento e, em alguns pontos específicos, por corte.



Figura 3. Danos observados nas geogrelhas – corte, esmagamento, desfilamento e abrasão.

4.2 Danos observados nas análises microscópicas

A Figura 4 apresenta imagens típicas dos resultados dos ensaios de MEV em geogrelhas instaladas em camada de areia e RAP. Embora visivelmente alguns pontos nos filamentos de geogrelha aparentassem estar sem dano algum, os ensaios de MEV revelaram que os grãos em formato angular de areia causaram micro punções na estrutura da geogrelha, gerando pontos de acúmulo de tensão e consequentemente, perda de resistência última à tração, conforme é observado nas Figuras 4a e 4b. A geometria plana da geogrelha utilizada no presente estudo criou uma condição favorável para aderência e acúmulo dos grãos finos entres os fios que compõem um filamento. Notou-se um aumento gradativo nestes micro danosconforme maior a área de contato do filamento da geogrelha, ou seja, quanto maior a largura do filamento, maior o dano mensurado

O ensaio de MEV revelou, em alguns casos, perda significativa do revestimento de PVC da geogrelha, onde o desgaste desse revestimento danificou parcialmente os fios mais externos do filamento, visto que o PVC estava aderido a esses fios (Figuras 4c e 4d). Lopes & Pinho-Lopes (2014) observaram danos semelhantes em análises de MEV com geogrelhas de poliéster, onde a perda da camada de PVC resultou em danos aos fios externos, que estavam aderidos a essa camada.

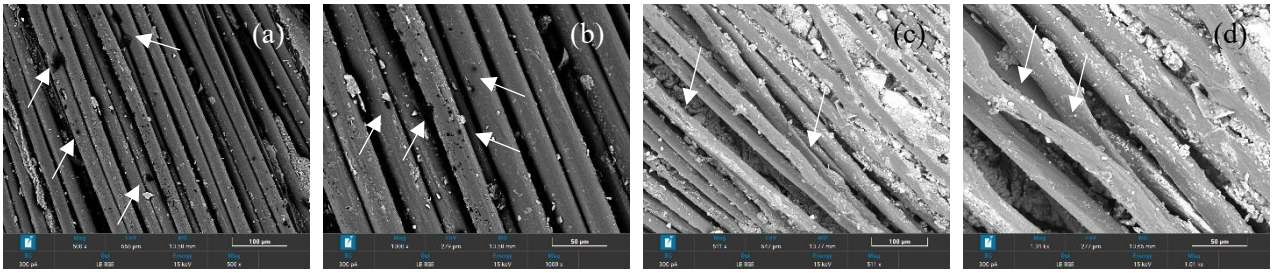


Figura 4. Resultado das análises MEV – 'a' e 'b' micro danos e 'c' e 'd' desgaste do revestimento de PVC.

No caso do RAP, apesar da variedade dos danos, estes foram predominantemente superficiais. Isso pode ser explicado pelas características físicas do RAP, que, quando compactado, passam a apresentar um comportamento de cimentação, devido à característica coesiva do ligante asfáltico, gerando um endurecimento e uma conformação do RAP em torno da geogrelha, minimizando danos mais profundos.

4.3 Redução na resistência à tração devido aos danos de instalação

Após realizado o ensaio de campo, que simula danos de instalação (i.e. danos mecânicos), é esperado que as geogrelhas exumadas e danificadas apresentem resistência última à tração média ($\bar{T}_{ult,d}$) menor do que a obtida nas geogrelhas virgens ensaiadas. Foram analisados pelo menos 30 corpos-de-prova de geogrelha de cada combinação avaliada. A perda de resistência última à tração média, das geogrelhas instaladas em camadas de agregado RAP foi de 37.29% para a GG1, de 28.59% para a GG2, de 26.31% para a GG3 e de 32.41% para a GG4. Já a perda de resistência última à tração média, obtida para as geogrelhas instaladas em camadas de areia foram de 21.36% para a GG1, de 23.32% para a GG2, de 25.49% para a GG3 e de 29.58% para a GG4. A partir das médias de resistência à tração das geogrelhas danificadas, e das médias de resistência à tração das respectivas geogrelhas virgens, foram obtidos os fatores de redução (FR_{DI}) apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Fatores de redução obtidos no presente estudo.

Geogrelha	FR_{DI} (médio)		Faixa calculada do FR_{DI} (todos os valores)
	Agregado 1 (RAP)	Agregado 2 (Areia)	
GG1	1,59	1,27	1,27-1,59
GG2	1,40	1,30	1,30-1,40
GG3	1,36	1,34	1,34-1,36
GG4	1,48	1,42	1,42-1,48

Conforme discutido anteriormente, as características físicas do material usado como aterro exerceram grande influência sobre os danos de instalação nas geogrelhas. Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam que os fatores de redução por danos de instalação foram consistentemente maiores para o RAP em comparação com a areia. Observa-se ainda que a variação dos FR_{DI} entre as geogrelhas evidencia a influência das características geométricas dos elementos estruturais na severidade do dano, especialmente no caso da GG4, que apresentou os maiores valores médios.

O RAP apresenta fração de grãos finos (34.92% < D:4.76mm) com proporção próxima a um terço dos grãos grossos (65.08% > D:4.76mm), sendo um material bem graduado o que confere uma boa sinergia com as geogrelhas. As geogrelhas GG1, GG2 e GG3 apresentam aberturas de malha superiores ao diâmetro máximo de aproximadamente 82,6% das partículas que compõem o RAP, favorecendo a passagem dos agregados predominantes através da malha e reduzindo a concentração de tensões nos filamentos. Por outro lado, a GG4

possui menor abertura efetiva e maior largura de filamento, o que intensifica a interação agregado–filamento e aumenta a suscetibilidade a danos mecânicos, comportamento refletido nos maiores valores de fator de redução por danos de instalação observados (Figura 5). Já a areia estudada é mal graduada, formada por grãos angulares e constituída de 96.73% dos grãos menores que o diâmetro de 4.76 mm. Por ser formada por material com diâmetro muito inferior a abertura das malhas da geogrelha, seu mecanismo de dano parece estar associado à área de contato com a geogrelha, sendo observado que, quanto menor a largura (área de contato) do filamento da geogrelha, menor a perda de resistência medida. Portanto, foram constatados menores fatores de redução para as geogrelhas com largura de filamento menor (GG1 e GG2) em comparação com as geogrelhas de largura de filamento maior (GG3 e GG4).

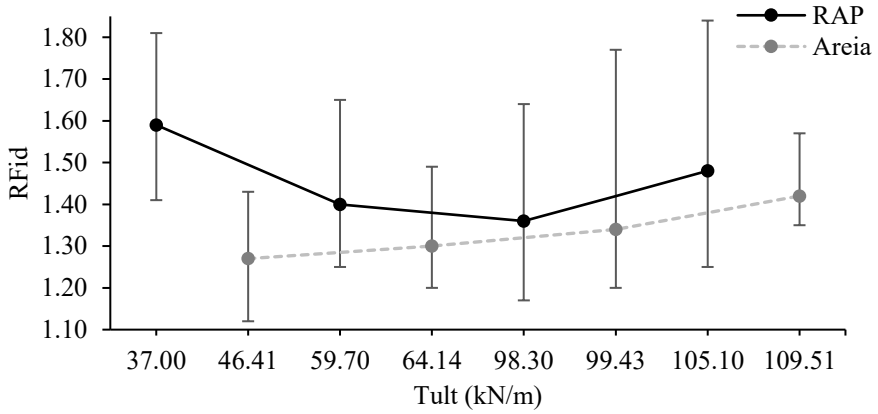


Figura 5. Fator de redução de dano de instalação (FR_{ID}) versus resistência à tração ultima (Tult).

A perda de resistência das geogrelhas instaladas em RAP ($D_{máx}$ = 38,1 mm) indicou comportamento semelhante ao de agregados convencionais de mesma dimensão máxima, com FR_{DI} entre 1,36 e 1,59, enquanto para a areia os valores variaram entre 1,27 e 1,42. No RAP, os danos foram condicionados principalmente pela compatibilidade entre a abertura de malha e os diâmetros mais frequentes, enquanto na areia, composta por partículas menores que as aberturas, o dano foi predominantemente controlado pela área de contato partícula–filamento, tornando a largura do filamento o parâmetro determinante da severidade.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos e nas análises mecânicas e microestruturais realizadas, foi possível avaliar de forma consistente os mecanismos de dano por instalação em geogrelhas tecidas de poliéster submetidas a diferentes materiais de aterro.

- Os fatores de redução por danos de instalação variaram entre 1,36 e 1,59 para o RAP ($D_{máx}$ = 38,1 mm) e entre 1,27 e 1,42 para a areia (Dmáx = 5,66 mm).
- Os resultados indicaram que a severidade do dano no RAP não foi governada exclusivamente pelo Dmáx, mas predominantemente pela compatibilidade entre a abertura de malha da geogrelha e os diâmetros mais frequentes do material. A granulometria bem distribuída e a presença de ligante asfáltico conferiram comportamento parcialmente coeso após compactação. A maior interação malha–agregado observada na GG4 explica o aumento do fator de redução nessa configuração.
- Para a areia, cujo tamanho de partícula é significativamente inferior às aberturas de malha da geogrelha, o dano mostrou-se independente da compatibilidade malha–agregado e foi controlado principalmente pela área de contato partícula–filamento.
- A análise microestrutural por MEV confirmou a distinção dos mecanismos de dano: na areia predominaram abrasão superficial e micro-punção, enquanto no RAP observaram-se abrasão, corte e contusão associados às frações grossas predominantes.

Conclui-se que os danos de instalação em geogrelhas tecidas de poliéster são controlados principalmente pela relação entre abertura de malha e diâmetro predominante dos agregados, e não apenas pelo diâmetro máximo do material. Assim, a adoção de fatores de redução baseados exclusivamente no $D_{máx}$ pode não representar adequadamente o comportamento de materiais alternativos como o RAP.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos, Laboratório de Caracterização Estrutural e Laboratório de Biologia Experimental da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International. (2017). *Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2488-17E01

ASTM International. (2019). *Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method (ASTM D6307)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6307-19

ASTM International. (2022). *Designation: D5818 − 22 Standard Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics 1*. https://doi.org/10.1520/D5818-22

ASTM International. (2023). *Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method (D6637)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6637_D6637M-15R23

Barbosa, K. R. M., Dos Santos, E. C. G., & Gusmão, A. D. (2021). Geogrid mechanical damage caused by recycled construction and demolition waste (RCDW) under in-field cyclic loading. *Soils and Rocks*, *44*(2). https://doi.org/10.28927/SR.2021.056520

Dager, C. H., Morro, R. H., Hubler, J. F., & Sample-Lord, K. M. (2023). Review of Geotechnical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Reuse in Infrastructure. *Geotechnics*, *3*(1), 21–42. https://doi.org/10.3390/geotechnics3010003

FHWA. (2024). *FHWA-HRT-23-110: Alternative Backfills for Highway Applications: State of the Practice*. https://www.ntis.gov

FHWA. (2023). *Reclaimed Asphalt Pavement: Material Description*. Washington, DC: FHWA. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm.
Acesso em: 10 jun. 2026.

Hufenus, R., Rüegger, R., Flum, D., & Sterba, I. J. (2005). Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, *23*(5), 401–424. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.02.003

Koerner, G. R., Loux, T., Filshill, A., & Schuller, J. (2023). Geosynthetic damage due to installation stresses in ultra-light weight foamed glass aggregate versus conventional aggregate. In *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet* (pp. 213–218). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003386889-8

Lackner, C. (2012). *Prestressed reinforced soil – Concept, investigations and recommendations*.

Lim, S. Y., & McCartney, J. S. (2013). Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids. *Geosynthetics International*, *20*(2), 62–72. https://doi.org/10.1680/gein.13.00002

Lopes, A. F. D., Savasini, K. V., Almeida, M. S. de A., & Bernucci, L. L. B. (2024). GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO RAP NO BRASIL. *Revista ENINFRA*, *3*(3), 201–217. https://doi.org/10.70859/2764-9539.v3.n3.126

Lopes, M. J. F. de P. (2006). Estudo de coeficientes de segurança a aplicar em estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos. *Universidade de Porto*, 1–764. http://hdl.handle.net/10216/13380

Lopes, M. L., & Pinho-Lopes, M. (2014). Tensile properties of geosynthetics after installation damage. *Environmental Geotechnics*, *1*(3), 161–178. https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00032

Névoa, F. A. (2025). *Danos de instalação em geogrelhas de poliéster em agregado natural e fresado de revestimento asfáltico (RAP)*. Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.

Sunarjono, S., & Hidayati, N. (2019). Physical properties of reclaimed asphalt pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *674*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/674/1/012029

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/31

Desenvolvimento laboratorial de geomembrana de PEAD para incorporação de nanopartículas

Fernanda Harumy Gomes Ohira
Mestranda, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, fernandaharumy@usp.br

Fernando Luiz Lavoie
Professor Doutor, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, fernando.lavoie@usp.br

Marcelo Aparecido Chinelatto
Professor Doutor, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, mchinelatto@sc.usp.br

Viviane Tavares de Moraes
Professora Doutora, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Paulo, Brasil, viviane.moraes@maua.br

Guilherme Wolf Lebrão
Professor Doutor, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Paulo, Brasil, guinet@maua.br

RESUMO: Geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente empregadas como barreiras em sistemas de proteção ambiental, tendo sua durabilidade condicionada à formulação, ao processamento e às condições de exposição. Este trabalho valida, em escala laboratorial, um procedimento para replicar geomembranas de PEAD, estabelecendo condição de referência para posterior incorporação de nanopartículas à base de grafeno. Utilizaram-se resina DOW MDPE NG6895 e masterbatch comercial contendo negro de fumo e antioxidantes, processados em extrusora dupla rosca, com posterior peletização e prensagem térmica com e sem secagem prévia. As placas produzidas foram caracterizadas em laboratório quanto a espessura, densidade, tração, teor e dispersão de negro de fumo, DSC e tempo de indução oxidativa Std-OIT, com comparação sistemática à norma GRI-GM13. Ambas as condições de secagem atenderam aos requisitos normativos com densidade, teor e dispersão de negro de fumo adequados, resistência à tração e Std-OIT superiores aos valores mínimos. A prensagem úmida apresentou alongamento na ruptura mais elevado, dispersão de negro de fumo mais homogênea e indicadores ligeiramente superiores de cristalinidade e estabilidade oxidativa, consolidando-se como condição preferencial para a produção laboratorial de geomembranas de PEAD.

PALAVRAS-CHAVE: geomembranas PEAD, prensagem térmica, nanocompósitos poliméricos.

ABSTRACT: High-density polyethylene (HDPE) geomembranes are widely employed as barriers in environmental protection systems, with durability governed by formulation, processing conditions, and field exposure. This study validates, at laboratory scale, a procedure to replicate HDPE geomembranes, establishing a reference condition for the subsequent incorporation of graphene-based nanoparticles. DOW MDPE NG6895 resin and a commercial masterbatch containing carbon black and antioxidants were processed in a co-rotating twin-screw extruder, followed by pelletization and thermal pressing with and without prior drying. The resulting sheets were characterized for thickness, density, tensile properties, carbon black content and dispersion, DSC, and standard oxidative-induction time (Std-OIT), with systematic comparison to GRI-GM13. Both drying conditions met specification requirements, with suitable density, carbon black content and dispersion, and tensile and Std-OIT values above the minimum limits. Wet pressing yielded higher elongation at break, more homogeneous carbon black dispersion, and slightly superior indicators of crystallinity and oxidative stability, consolidating this route as the preferred laboratory condition for HDPE geomembrane production.

KEYWORDS: HDPE geomembranes, thermal pressing, polymer nanocomposites.

1 INTRODUÇÃO

Geossintéticos desempenham funções críticas de reforço, separação, drenagem e barreira em engenharia geotécnica (Bueno *et al.*, 2015). Geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) destacam-se como barreiras primárias em proteção ambiental, combinando resistências química, mecânica, baixa permeabilidade e custo-benefício competitivo (Rowe; Sangam, 2002). A durabilidade dessas geomembranas depende da formulação, do processamento fabril e das condições de exposição em campo (temperatura, agentes químicos, tensões mecânicas, radiação UV; Rowe; Sangam, 2002). Para assegurar desempenho mínimo em longo prazo, a norma GRI-GM13 (GRI, 2025) estabelece limites para espessura, propriedades de tração, teor de negro de fumo e tempo de indução oxidativa (OIT), os quais têm sido tomados como referência em estudos de durabilidade (Lavoie *et al.*, 2020). Ensaios de envelhecimento acelerado mostram consumo de antioxidantes e perda de resistência ao *stress cracking* em lixiviados agressivos, motivando o uso de reforços nanoestruturais em geomembranas de PEAD (Lavoie *et al.*, 2020; Dolez *et al.*, 2016).

Nesse cenário, nanocargas vêm sendo investigadas como alternativa para ajustar propriedades mecânicas, térmicas e de barreira de polímeros utilizados em geossintéticos. Grafeno e óxido de grafeno (GO) oferecem rigidez, resistência à tração e propriedades de barreira superiores em baixos teores (0,1–2% m/m), atuando como nucleantes que elevam cristalinidade e módulo (Papageorgiou *et al.* 2017). No PEAD, Jafari *et al.* (2021) verificaram maior estabilidade térmica até 2,1% m/m de grafeno; Luz *et al.* (2025) produziram geogrelhas PEAD-grafeno com teor de 0,01% m/m, obtendo dispersão superior, cristalinidade aumentada e incremento de aproximadamente 4,3° no ângulo de atrito em cisalhamento com areia. Em conjunto, esses resultados indicam que pequenas adições de nanocargas à base de grafeno podem modificar de forma relevante o comportamento de produtos em PEAD, inclusive geossintéticos (Papageorgiou *et al.*, 2017; Jafari *et al.*, 2021; Luz *et al.*, 2025; Dolez *et al.*, 2016).

Apesar dos avanços em compósitos de PEAD com nanocargas, a maioria dos estudos foca em propriedades de materiais ou produtos específicos, sem descrever protocolos laboratoriais consolidados para gerar geomembranas de referência compatíveis com a GRI-GM13. Essa lacuna dificulta isolar o efeito de nanopartículas, pois diferenças de processamento podem mascarar os ganhos associados exclusivamente à formulação daqueles decorrentes de variações de processamento ou de qualidade de fabricação (Lavoie *et al.*, 2020; Dolez *et al.*, 2016; Luz *et al.*, 2025; Jafari *et al.*, 2021; Papageorgiou; Kinloch; Young, 2017).

Nesse contexto, este trabalho objetiva replicar geomembranas de PEAD em escala laboratorial por meio de rotas de prensagem térmica úmida (sem secagem prévia) e seca (com secagem prévia). Os resultados de espessura, densidade, tração, teor e dispersão de negro de fumo, DSC e OIT foram comparados aos critérios mínimos de referência estabelecido pela GRI-GM13 (GRI, 2025).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Utilizou-se resina de polietileno da Dow Chemical (DOW MDPE NG 6895), frequentemente aplicada na produção de geomembranas, com densidade de 0,939 g/cm³ (ASTM D 792), resistência à tração no escoamento de 19 MPa e na ruptura de 30 MPa, alongamento na ruptura >800% (ASTM D 638), dureza Shore D 63 (ASTM D 2240), resistência ao stress cracking >3000 h/F50 (ASTM D 1693) e tempo de indução à oxidação (OIT) >110 min a 200 °C (ASTM D 3895).

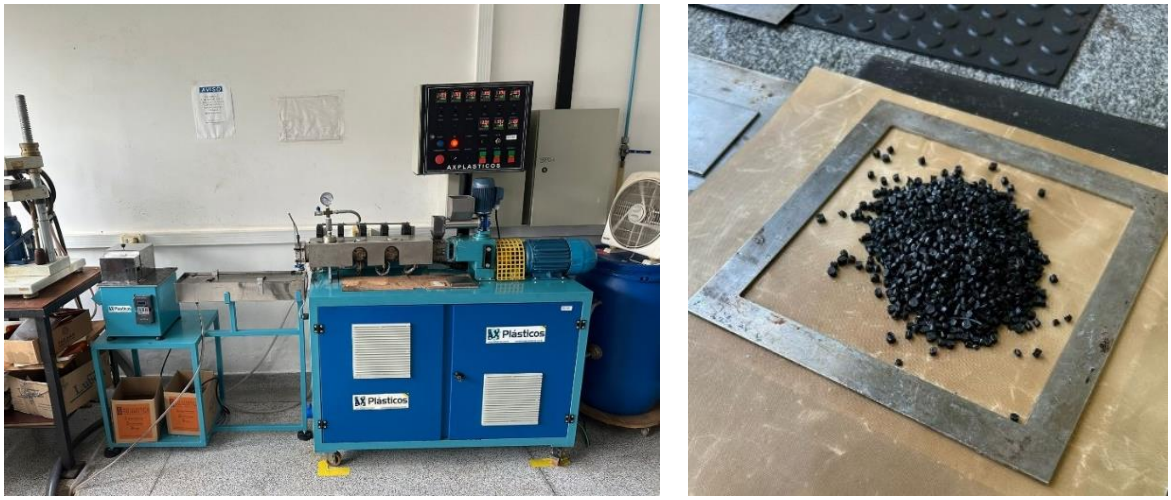
Para proteção da resina, empregou-se o concentrado de aditivos comercial PE-PR 926, contendo negro de fumo, antioxidantes primários e secundários, termoestabilizantes e polietileno de baixa densidade (PEBD) como resina veículo, com teor de negro de fumo entre 48–52% (ASTM D 1603), índice de fluidez de 30 g/10 min (P-AM-2246) e estabilidade térmica e à luz comprovadas segundo normas DIN.

2.2 Métodos

2.2.1 Processamento (extrusão e prensagem)

As misturas de resina de polietileno e concentrado de aditivos foram processadas em extrusora dupla rosca co-rotacional interpenetrante (AX Plásticos, Figura 1a), com vazão de 0,985 kg/h, rotação de 100 rpm e perfis de temperatura entre 160 e 210 °C, garantindo fusão completa e mistura homogênea.

O extrudado foi resfriado e picotado em pellets, posteriormente conformados em placas planas em molde metálico de 3,2 mm e 10 × 10 cm por prensagem térmica a 165–175 °C (Figura 1b). Foram avaliadas duas rotas: (i) úmida, com prensagem direta dos pellets (Figura 2a); e (ii) seca, com secagem prévia em estufa a 80 °C por 8 h seguida de prensagem nas mesmas condições (Figura 2b).



(a) (b)

Figura 1. (a): Extrusora dupla rosca; (b): Material extrudado e picotado em molde da prensa térmica.



(a) (b)

Figura 2. Amostras resultantes prensadas: (a) úmida e (b) seca.

2.2.2 Caracterização de materiais

As placas obtidas foram ensaiadas em laboratório acreditado pelo programa GAI-LAP do Geosynthetic Accreditation Institute, assegurando rastreabilidade metrológica e conformidade com normas ASTM e ISO. A caracterização incluiu espessura (ASTM D 5199), densidade (ASTM D 792), tração (ASTM D 6693), teor e dispersão de negro de fumo (ASTM D 1603, ASTM D 5596), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e tempo de indução à oxidação Std-OIT (ASTM D 3895), com comparação sistemática à especificação GRI-GM13.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados de espessura, foi possível identificar o parâmetro de valores mínimos exigidos pela GRI-GM13 para cada amostra. A GRI-GM13 é uma norma americana amplamente adotada no Brasil para controle de fabricação de geomembranas de PEAD modernas, uma vez que estabelece limites mínimos normativos, métodos de ensaio padronizados e frequências de amostragem para propriedades físicas, mecânicas e de caracterização de aditivos do material.

3.1 Espessura e Densidade

A amostra prensada úmida apresentou espessura média de 2,553 ± 0,056 mm e a seca, 1,950 ± 0,038 mm, valores compatíveis com espessuras nominais de 2,50 e 2,00 mm, respectivamente. As densidades médias foram de 0,949 e 0,947 g/cm³, ambas superiores ao limite mínimo de 0,94 g/cm³, indicando manutenção da classificação como PEAD e ausência de influência relevante do teor de umidade na estrutura molecular do polímero. Os resultados são expressos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de propriedades das amostras úmida e seca vs. Valores mínimos exigidos pela GRI-GM13.

Propriedade	Norma	Amostra Úmida	Especificação da GM-13	Amostra Seca	Especificação da GM-13
Espessura - mm	ASTM D 5199	2,553 (0,056)	2,50	1,950 (0,038)	2,00
Densidade - g/cm³	ASTM D 792	0,949 (0)	0,940	0,947 (0,001)	0,940
Resistência à Tração no Escoamento - kN/m	ASTM D 6693	38,79	37	47,82	29
Alongamento no Escoamento - kN/m		14,98	12	14,85	12
Resistência à Tração na Ruptura - %		61,88	67	56,13	53
Alongamento na Ruptura - %		771,02	700	637,09	700
Teor de negro de fumo - %	ASTM D 1603	2,67 (0,09)	2,0-3,0	2,83 (0,08)	2,0-3,0
Dispersão do negro de fumo	ASTM D 5596	9 na Categoria e 1 na Categoria 2	9 na Categoria 1 ou 2 e 1 na Categoria 3	7 na Categoria e 3 na Categoria 2	9 na Categoria 1 ou 2 e 1 na Categoria 3
Tempo de indução oxidativa (OIT)	ASTM D 3895	183,76 (0,87)	>100	176,08 (3,11)	>100

3.2 Ensaio de Tração

As amostras foram submetidas a ensaios de tração para avaliar o desempenho mecânico das geomembranas, considerando os parâmetros de tensão e alongamento nos pontos de escoamento e ruptura. Os valores de resistência variam em função da espessura do material, por serem expressos em kN/m, enquanto os valores de alongamento permanecem independentes dessa característica. Os resultados obtidos, juntamente com os valores mínimos exigidos pela especificação GRI-GM13, estão apresentados na Tabela 2, ao passo que o comportamento típico das curvas de força versus alongamento pode ser observado na Figura 3.

As curvas da amostra úmida (preto) mostram o perfil clássico de geomembranas de PEAD, com escoamento bem definido, longo patamar pós-escoamento e ruptura em alto alongamento. As curvas da amostra seca (cinza) seguem padrão similar, porém rompem em menor deformação e com forças ligeiramente

menores na fase final. Embora a resistência à tração na ruptura da amostra úmida esteja abaixo do limite GRI-GM13, sua ductilidade superior - com alongamento na ruptura de 771% (comparado aos 637% da seca e mínimo normativo de 700%) e maiores valores de resistência à tração pós-escoamento - assegura maior capacidade de acomodação de recalques diferenciais e deformações de subleito. Esse comportamento é determinante em aplicações geotécnicas que priorizam integridade funcional sobre resistência última absoluta.

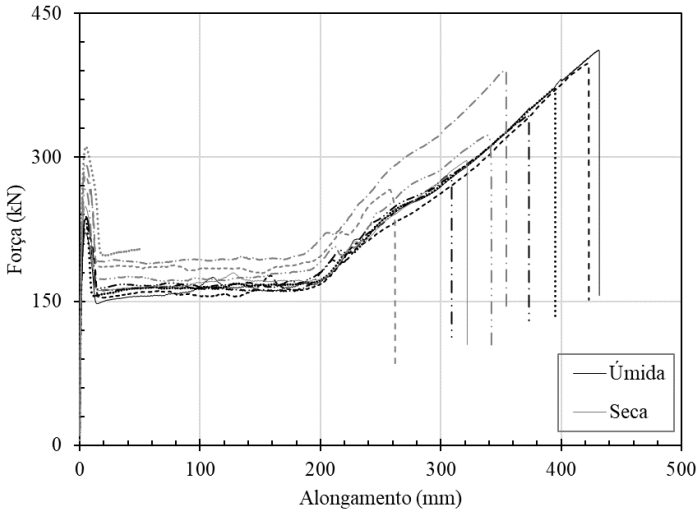


Figura 3. Gráfico do ensaio de tração para as amostras prensadas úmida e seca.

3.3 Negro de fumo

3.3.1 Teor de Negro de Fumo

Os teores médios de negro de fumo apresentados na Tabela 2 estão na faixa de 2 a 3%, conforme exigido pela especificação GRI-GM13, comprovando a precisão na dosagem do concentrado de aditivos tanto para as amostras prensadas úmidas quanto secas. Esses valores garantem plena conformidade com os requisitos técnicos essenciais para conferir resistência prolongada à radiação ultravioleta (UV) às geomembranas.

3.3.2 Dispersão de Negro de Fumo

A dispersão do negro de fumo foi avaliada conforme os critérios da GRI-GM13, que estabelecem que, em 10 campos microscópicos, pelo menos 9 devem ser classificados como Categoria 1 ou 2 - aglomerados esféricos predominantemente menores que 35 µm (Categoria 1) ou 75 µm (Categoria 2) - sendo no máximo 1 campo permitido na Categoria 3 (<175 µm). Essa exigência assegura proteção eficiente da matriz polimérica sem prejudicar as propriedades mecânicas do material.

A amostra prensada úmida demonstrou dispersão excelente, com 9/10 campos na Categoria 1 e apenas 1/10 na Categoria 2, enquanto a prensada seca alcançou 7/10 na Categoria 1 e 3/10 na Categoria 2. As duas amostras satisfizeram integralmente os critérios da GRI-GM13, todavia a condição úmida apresentou maior homogeneidade e consistência, mostrando-se maior tendência para aplicações em geomembranas onde a uniformidade do negro de fumo impacta diretamente a durabilidade em serviço.

3.4 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

As curvas de DSC são fundamentais para caracterizar a morfologia e a estabilidade térmica de geomembranas de PEAD, revelando diferenças induzidas pelo processamento nos picos de fusão e no comportamento exotérmico (Figura 4: duas curvas pretas [prensada úmida]; duas curvas cinzas [prensada seca]).

A amostra prensada úmida apresentou pico de fusão bem definido em aproximadamente 132 °C, com entalpia de fusão mais elevada, indicando grau de cristalinidade ligeiramente superior e maior preservação da estrutura típica do PEAD. Já a amostra prensada seca mostrou transição menos nítida e entalpia inferior, sugerindo menor ordenação cristalina, possivelmente associada ao histórico térmico adicional imposto pela etapa de secagem em estufa.

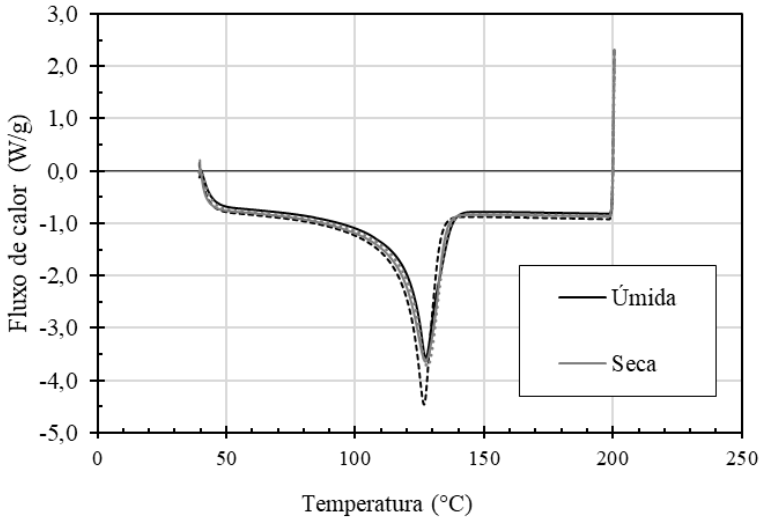


Figura 4. Curvas das amostras prensadas úmida e seca de DSC.

3.5 Tempo de indução oxidativo (Std-OIT)

A especificação GRI-GM13 exige um Std-OIT mínimo de 100 minutos (ASTM D 3895) a 200 °C, requisito essencial para assegurar capacidade antioxidante suficiente nas geomembranas de PEAD durante toda a vida útil projetada (Figura 5).

Ambas as rotas de processamento superaram amplamente esse limite, com a amostra prensada úmida alcançando 183,76 ± 0,87 min (curva preta) e a prensada seca, 176,08 ± 3,11 min (curva cinza) - margens de 84% e 76% acima do mínimo, respectivamente. Esses valores confirmam a eficácia do concentrado de aditivos em fornecer antioxidantes primários e secundários que protegem a matriz polimérica contra degradação termo-oxidativa. A amostra úmida destaca-se pelo platô de indução mais extenso antes da oxidação exotérmica, indicando menor consumo de estabilizantes durante a prensagem térmica.

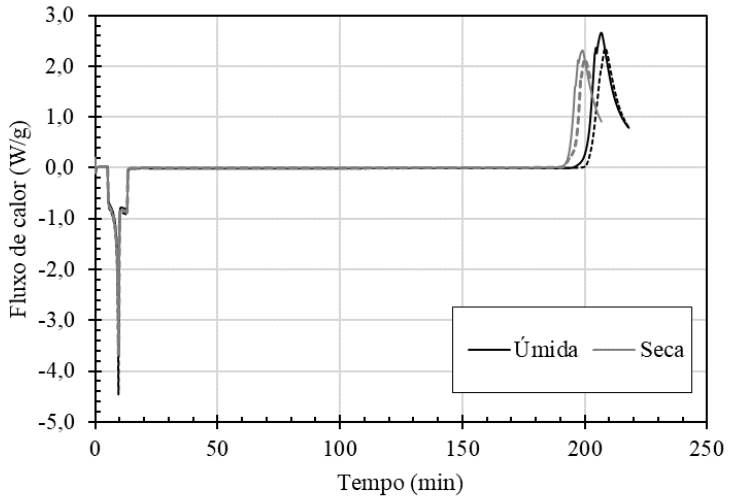


Figura 5. Curvas das amostras prensadas úmida e seca de OIT.

A amostra prensada seca apresenta início de oxidação um pouco mais precoce, possivelmente devido a maior exposição térmica ou perda de voláteis no condicionamento prévio. Essa diferença complementa os resultados de DSC, reforçando que a condição úmida preserva melhor a integridade estrutural e antioxidante do PEAD.

Em síntese, a prensagem térmica úmida se mostra a rota mais adequada, entre as avaliadas, para a produção de geomembranas de PEAD destinadas à incorporação de óxido de grafeno, apresentando desempenho sistematicamente favorável nos ensaios de tração - com alongamento na ruptura econsequente ductilidade superior que compensa a resistência na ruptura ligeiramente inferior-, dispersão de negro de fumo, DSC e Std-OIT. Esse conjunto de resultados, relevante para soldabilidade, acomodação de deformações e durabilidade em campo, respalda a escolha da rota úmida como condição de referência para estudos futuros de reforço com nanopartículas.

4 CONCLUSÃO

Este estudo objetivou estabelecer um procedimento laboratorial para a produção de geomembranas de PEAD em laboratório. Utilizou-se uma formulação industrialmente representativa, composta por resina de polietileno DOW MDPE NG6895 e concentrado de aditivos comercial contendo negro de fumo e antioxidantes, processada por extrusão em dupla rosca, peletização e conformação por prensagem térmica em duas condições distintas: úmida (sem secagem) e seca (com secagem em estufa). As geomembranas produzidas foram caracterizadas em laboratório e os resultados obtidos foram comparadas limites estabelecidos pela GRI-GM13 (GRI, 2025).

Ambas as rotas atenderam aos requisitos normativos e preservaram as características essenciais do PEAD, evidenciadas por densidade $\geq 0{,}94$ g/cm³, teores adequados e boa dispersão de negro de fumo, além de desempenho mecânico e de estabilidade oxidativa compatíveis, majoritariamente, com geomembranas comerciais.

A rota de prensagem úmida destacou-se pelo alongamento na ruptura superior a 700%, pela maior homogeneidade na dispersão de negro de fumo, pelo indicativo de cristalinidade ligeiramente mais elevada nas curvas de DSC e pelo tempo de indução à oxidação marginalmente maior em relação à rota seca. Em contraste, o condicionamento prévio em estufa resultou em pequena redução de ductilidade, entalpia de fusão menor e Std-OIT um pouco mais baixo, efeitos compatíveis com a exposição térmica adicional.

Dessa forma, a prensagem térmica úmida se consolida, no contexto deste estudo, como rota preferencial para a replicação laboratorial de geomembranas de PEAD destinadas à incorporação de nanopartículas, em especial de óxido de grafeno. A metodologia proposta fornece uma base experimental reprodutível, na qual variações futuras de composição e teor de nanocargas poderão ser avaliadas com menor influência do método de produção adotado, contribuindo para a avaliação das características e propriedades de geomembranas nanorreforçadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2020). ASTM D 1603 *Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics.*

ASTM International (2021). ASTM D 1693 *Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.*

ASTM International (2025). ASTM D 5199 *Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.*

ASTM International (2021). ASTM D 5596 *Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics.*

ASTM International (2022). ASTM D 638 *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.*

ASTM International (2025). ASTM D 6693 *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polyolefin Geomembranes.*

ASTM International (2020). ASTM D 792 *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.*

ASTM International (2019). ASTM D 3895 *Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry*.

Bueno, B. S.; Lotti, C. L. Matérias-Primas. In: *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, 2. ed., Vertematti, J. C., Coord. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 2, p. 31-46.

Dolez, P. I.; Ragoubi, N.; David, E.; Weltrowski, M. Reduction in HDPE Geomembrane Thermal Expansion using Nanoclay Particles. *Adv. Mater. TechConnect Briefs*, v. 1, p. 296, 2016.

DIN (1984). DIN 53388 *Testing of Plastics and Elastomers; Light Exposure in Open Air Under Glass*.

DIN (1988). DIN 53772 *Testing of Colouring Materials in Thermoplastics - Determination of Thermal Stability by Injection Moulding.*

DIN (1990). DIN 53775 *Testing of Colouring Materials in Plastics; Testing of Colouring Materials in Plasticized Polyvinyl Chloride (PVC-P) Materials; Determination of Heat Stability in an Oven.*

Drexler, K. E. (1981) Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. *Proc. Natl. Acad. Sci*., v. 78, p. 5275-5278.

Firoozi, A. A.; Naji, M.; Dithinde, M.; Firoozi, A. A. (2021) A review: influence of potential nanomaterials for civil engineering projects. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng*., v. 45, p. 2057-2068. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00474-x.>.

GRI (2025). GRI-GM13 *Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*.

Jafari, I. et al. (2021) Thermal Degradation Kinetics and Modeling Study of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWP)/Graphene *Nanocomposite. Molecules*, v. 26, p. 1597. DOI:< https://doi.org/10.3390/molecules26061597>.

Lavoie, F. L.; Kobelik, M.; Valentin, C. A.; Silva, J. L. (2020) Durability of HDPE Geomembranes: An Overview. *Quím. Nova*, v. 43, p. 656-667. DOI:< https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170540.>

Li, W.; Konsta-Gdoutos, M.; Shi, X.; Sobolev, K.; Shah, S. P. (2022) Editorial: Intelligent Concrete, New Functionalities and Nanotechnology. *Front. Mater*., v. 9. DOI:< https://doi.org/10.3389/fmats.2022.854580.>.

Luz, P. A. C. et al. (2025) High-density polyethylene-graphene polymer nanocomposites used as geogrids. *Polym*. Compos. DOI:< https://doi.org/10.1002/pc.70305.>.

Mansouri, I.; Esmaeili, E. (2016) Nanotechnology applications in the construction industry. In: Khitab, A.; Anwar, W., Eds. *Advanced research on nanotechnology for civil engineering applications*. Hershey, PA: IGI Global, 2016. p. 30. DOI:< https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0344-6.ch004.>.

Papageorgiou, D. G.; Kinloch, I. A.; Young, R. J. (2017) Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Prog. Mater. Sci.*, v. 90, p. 75-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>.

PETROBRAS (2013) N-2246: *Operation of Onshore and Offshore Gas Pipelines*.

Rowe, R. K.; Sangam, H. P. (2002) Durability of HDPE geomembranes. *Geotext. Geomembr*., v. 20, p. 77-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00005-5>.

Taha, M. R. (2018) Recent developments in nanomaterials for geotechnical and geoenvironmental engineering. *MATEC Web Conf.*, v. 149, 02004.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/32

Durabilidade de Geomembranas Texturizadas de Polietileno de Alta Densidade Expostas à Radiação Ultravioleta em Laboratório Avaliada por Espectrometria no Infravermelho

Jaedson Alves Ferreira
Mestrando, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jaedson.f3593@ufob.edu.br

Júlia de Sousa Dourado
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, julia.d4277@ufob.edu.br

Maria Alejandra Aparicio Ardila
Pós-doutoranda, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, maparicio@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

Sérgio Macedo Soares
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sergio.soares@ufob.edu.br

José Domingos Santos da Silva
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jose.silva@ufob.edu.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: O presente trabalho avalia a durabilidade de geomembranas texturizadas de polietileno de alta densidade (PEAD) fabricadas pelo método de extrusão com matriz balão, quando submetidas à radiação ultravioleta em condições controladas de laboratório. O estudo teve como objetivo investigar as alterações químicas associadas aos processos de degradação oxidativa, comparando-se a superfície texturizada e a porção de borda lisa do material. Amostras virgens e envelhecidas foram expostas em câmara de intemperismo acelerado com lâmpadas UVA-340, em ciclos de irradiação e condensação, por períodos de até 2000 horas. A caracterização foi realizada por espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) utilizando acessório de reflexão total atenuada (ATR), permitindo a identificação e o acompanhamento das principais bandas associadas à estrutura do PEAD e à formação de grupos oxidativos. Os resultados indicaram a manutenção da assinatura espectral característica do PEAD após o envelhecimento, com variações na intensidade das bandas. Observou-se que a borda lisa apresentou alterações espectrais mais pronunciadas, associadas ao aumento de bandas relacionadas a grupos carbonila e hidroxila, indicando maior suscetibilidade à degradação oxidativa em comparação à superfície texturizada, que apresentou maior estabilidade química ao longo do envelhecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembranas, PEAD, Durabilidade, Radiação Ultravioleta, FTIR

ABSTRACT: This study evaluates the durability of textured high-density polyethylene (HDPE) geomembranes manufactured by the blown extrusion process when subjected to ultraviolet radiation under controlled laboratory conditions. The objective was to investigate chemical changes associated with oxidative degradation processes, comparing the textured surface and the smooth edge portion of the material. Virgin and aged samples were exposed to accelerated weathering in a UV chamber equipped with UVA-340 lamps, operating under alternating irradiation and condensation cycles for exposure times of up to 2000 hours. Material characterization was performed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) with an attenuated total reflectance (ATR) accessory, enabling the identification and monitoring of characteristic

HDPE absorption bands and oxidation-related functional groups. The results showed that the characteristic spectral signature of HDPE was preserved after aging, although variations in band intensities were observed. The smooth edge exhibited more pronounced spectral changes, particularly increases in bands associated with carbonyl and hydroxyl groups, indicating greater susceptibility to oxidative degradation. In contrast, the textured surface showed more moderate spectral variations, suggesting improved chemical stability throughout the aging process.

KEYWORDS: Geomembranes, HDPE, Durability, Ultraviolet Radiation, FTIR

1 INTRODUÇÃO

Para aplicações ambientalmente sensíveis, onde a estabilidade da estrutura depende fortemente da interação entre a geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e os demais materiais, como em obras em aterros sanitários ou mineração, a textura e coloração do material são um importante aliado (Aparicio-Ardila e Silva, 2026; Aparicio-Ardila et al., 2025a). A presença da textura permite ainda a construção de taludes mais íngremes, por exemplo, taludes laterais de 3(H):1(V) e, em alguns casos, até mais íngremes, reduzindo significativamente o risco de escorregamento das camadas de solo ou cobertura (Shukla e Yin, 2006). Já a coloração pode minimizar os efeitos da radiação e temperatura sob a superfície da geomembrana exposta (Aparicio-Ardila et al., 2025a; Aparicio-Ardila et al., 2025b).

O processo de fabricação de geomembranas texturizadas por extrusão com matriz balão é amplamente utilizado na indústria, sendo considerado o mais comum para a produção comercial desses materiais (Aparicio-Ardila, 2025). Nesse método, a resina de polietileno em forma granular é alimentada em uma extrusora, onde é plastificada, homogeneizada e então direcionada para uma matriz circular. Durante o processo, para evitar que as paredes internas do tubo se fundam, insufla-se ar sob pressão no interior, criando um balão. A formação da textura superficial está associada à taxa de extrusão e à velocidade do puxador, ocorrendo quando bolhas de nitrogênio inerte, ao se resfriarem e se romperem devido ao cisalhamento na extrusora, geram a rugosidade característica do material (Müller, 2007; Scheirs, 2009).

Em polímeros empregados na fabricação de geomembranas, a espectroscopia no infravermelho permite acompanhar alterações nas ligações carbônicas e nos grupos funcionais formados ou modificados ao longo do tempo, associadas aos processos de degradação oxidativa. Estudos mostraram que ao longo da exposição ao meio ambiente exógeno, é possível acompanhar o surgimento da banda carbonila (C=O) em polímeros (Kwon *et al.*, 2013; Curcio *et al.*, 2015; Murakami e Koga, 2016). Em pesquisas com geossintéticos, outros autores também utilizaram essa técnica (Yang e Ding, 2006; Azuma *et al.*, 2009; Valente *et al.*, 2010; Rouillon *et al.*, 2016; Dias Filho *et al.*, 2019). Dentro desses trabalhos, Rouillon *et al*, destacou a análise da banda em 1456 cm^{-1}, correspondente ao grupo metil (CH_3), como outra análise alternativa representativa para avaliar o comportamento de polipropilenos.

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Geomembranas

O estudo foi realizado a partir da seleção de geomembranas texturizadas PEAD fabricadas pelo método balão, todas com espessura nominal de 2,00 mm e de cor preta, fornecidas por fabricantes sul-americanos que utilizam resinas produzidas na própria região. Foi realizada avaliação comparativa entre áreas com superfície texturizada e a porção de borda lisa, tornando possível analisar possíveis variações associadas à morfologia superficial. Antes da realização dos ensaios, verificou-se que todos os materiais atendiam aos critérios de desempenho estabelecidos pelo GRI-GM13 (2024). As etapas de caracterização utilizando amostras virgens e expostas foram executadas no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de São Paulo (USP), em São Carlos, Brasil. Os parâmetros iniciais dos materiais analisados e os respectivos métodos de ensaio estão apresentados na Tabela 1. A Figura 1 mostra detalhes da borda lisa da amostra.



Figura 1. Detalhe da borda lisa da amostra.

Tabela 1. Propriedades iniciais das geomembranas analisadas.

Propriedade (Unidade)	**Método**	**Média ± (desvio padrão)**	
Geomembrana	-	Texturizada	Borda Lisa
Data de fabricação	-	2022	2022
Texturização	-	Dois lados	Lisa
Espessura (mm)	ASTM D5994 (2021)/D5199 (2012)	2.28 (±0.09)	1.77 (±0.07)
Altura de aspereza (mm)	ASTM D7466 (2015)	1.00 (±0.12)	-
Resistência à tração na ruptura (kN/m)	ASTM D6693 (2020)	38.63 (±1.63)	56.43 (±2.03)
Deformação na ruptura (%)		422.90 (±53.20)	723.3 (±25.39)
Resistência à tração no escoamento (kN/m)		37.31 (±0.96)	30.81 (±0.55)
Alongamento no escoamento (%)		15.50 (±0.36)	19.75 (±0.32)
Resistência à punção (N)	ASTM D4833 (2020)	838.1 (±31.47)	N.D
Resistência média ao rasgo (N)	ASTM D1004 (2021)	329.40 (±25.02)	N.D
Tempo de indução à oxidação – OIT (min)	ASTM D3895 (2023)	334.43 (±1.2)	383.71 (±1.92)

2.2 Procedimentos de câmara UV

Conforme diretrizes normativas, os ensaios de intemperismo acelerado foram realizados em uma câmara do tipo EQUV, operando com lâmpadas fluorescentes UVA-340 (Equilam, São Paulo, Brasil), o equipamento foi configurado para ciclos alternados compostos por um período prolongado de irradiação ultravioleta, mantido a 75 ºC por 20 horas, seguido por uma etapa de condensação de 4 horas a 60 ºC. Foram retiradas amostras texturizadas após 500, 1000 e 2000 horas de exposição, enquanto a amostra da borda lisa foi retirada após o período de 2000 horas. O mesmo procedimento foi realizado e discutido no trabalho de Aparicio-Ardila et al. (2025b) com geomembranas coloridas texturizadas.

2.3 Procedimentos em infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho foram obtidos utilizando um espectrômetro equipado com acessório de ATR, contendo cristal de alta transparência adequado à região do infravermelho médio. As análises foram realizadas na faixa espectral de 4.000 a 400 cm^{-1}, que corresponde à região do MIR (Infravermelho Médio, em inglês), com resolução e sensibilidade adequadas à identificação dos grupos funcionais presentes nas geomembranas de PEAD. Além disso, análises foram realizadas com resolução espectral de 4 cm^{-1} e 64 varreduras acumuladas por espectro, a fim de aumentar a relação sinal-ruído.

Os espectros foram processados e corrigidos por meio dos métodos, presentes no software do equipamento, *Arithmetic, Baseline Correction, Normalize e Smoothing*, visando tratar dados com base matemática, alinhar as linhas de base, normalizar a intensidade das bandas e eliminar ruídos. Após o processamento, todos os espectros foram exportados em formato ASCII e posteriormente tratados no software OriginPro, utilizado para organização, comparação e análise gráfica dos dados.

A análise dos dados ocorreu utilizando o espectro de referência do PEAD, Conforme Smith (2021), as bandas mais intensas localizam-se em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1}, correspondentes, respectivamente, aos estiramentos (stretch) assimétrico e simétrico das ligações C–H do grupo metileno (CH_2). Essas absorções são

características de materiais que possuem longas cadeias de carbono e hidrogênio ligadas de forma linear, como o polietileno (Kovács *et al.*, 2021). Já as bandas em 1472 cm^{-1} e 1464 cm^{-1} estão associadas às vibrações de deformação angular (ou scissoring) das ligações C–H (Casarano, 2004), enquanto os picos em 730 cm^{-1} e 720 cm^{-1} correspondem às vibrações de balanço (rocking) do grupo CH_2. Dessa forma, estas bandas constituem a chamada "assinatura espectral" do PEAD, servindo como base para a interpretação dos espectros obtidos experimentalmente durante o trabalho. A análise dessas regiões permite verificar se o material sofreu alterações químicas ao longo do tempo ou sob diferentes condições de exposição. Além disso, analisa-se 1710 cm^{-1}, banda ligada ao grupo carbonila (C=O), e 3400 cm^{-1}, ligada a grupos hidroxila (O–H).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os espectros da análise comparando a geomembrana texturizada fabricadas pelo método de extrusão balão antes (linha verde) e após degradação em câmara UV a 500 h (linha azul), 1000 h (linha vermelha) e 2000 h (linha preta).

Os espectros da geomembrana envelhecida fabricada pelo método de extrusão balão manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD após envelhecimento até 2000 h e, como esperado, houveram variação de suas intensidades. O surgimento da banda de dióxido de carbono ocorreu, provavelmente, devido absorção do gás no momento do ensaio. A banda em 1710 cm^{-1}, que já continha indicativo de carbonila devido envelhecimento no armazenamento, apresentou leve aumento de intensidade e alargamento da região ao longo do envelhecimento da amostra. A banda em 3400 cm^{-1} apresentou leve aparição em 2000 h. A região entre 800 e 1200 cm^{-1}, que já estava presente na geomembrana virgem, também apresentou variações de intensidade.

A Figura 3, por sua vez, contém os espectros da análise comparando a borda lisa da geomembrana texturizada antes (linha vermelha) e após envelhecimento em câmara UV a 2000 h (linha preta).

O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida fabricada por extrusão balão apresentou aumento de intensidade das bandas características do PEAD, principalmente das bandas A, B e D. As bandas em 1710 cm^{-1} e 3400 cm^{-1}, que já haviam aparecido na amostra virgem, apresentaram variação. A região entre 800 e 1200 cm^{-1} obtiveram suavização de suas bandas.

Figura 2 - FTIR da geomembrana texturizada antes e após envelhecimento em câmara UV

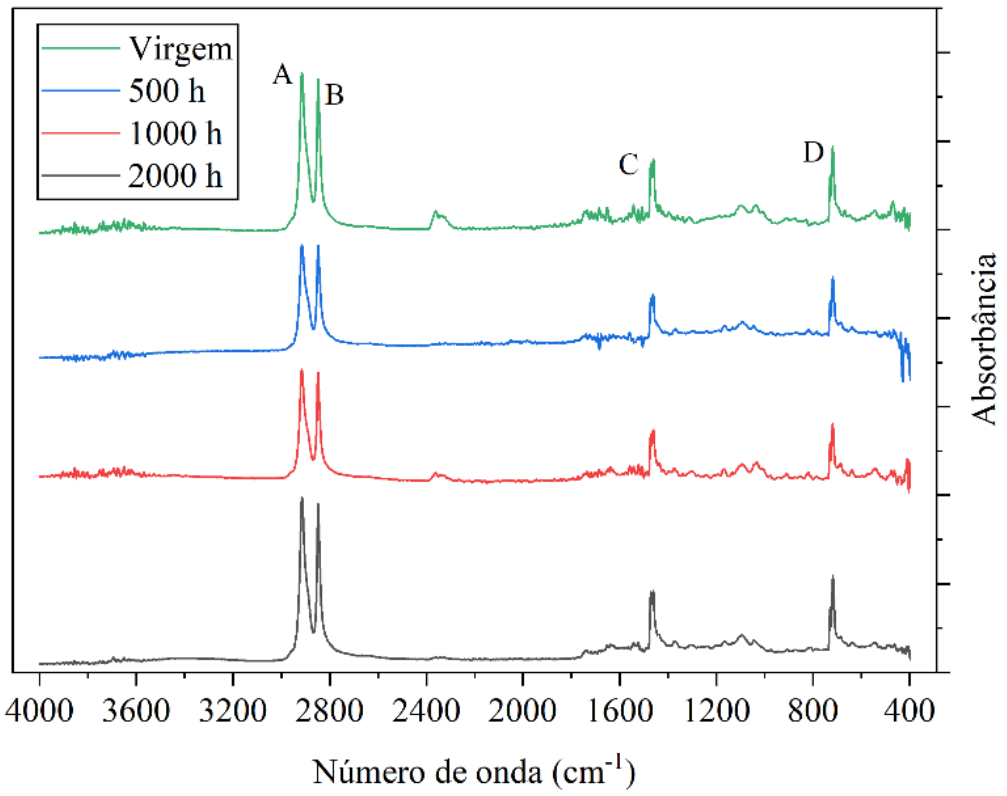
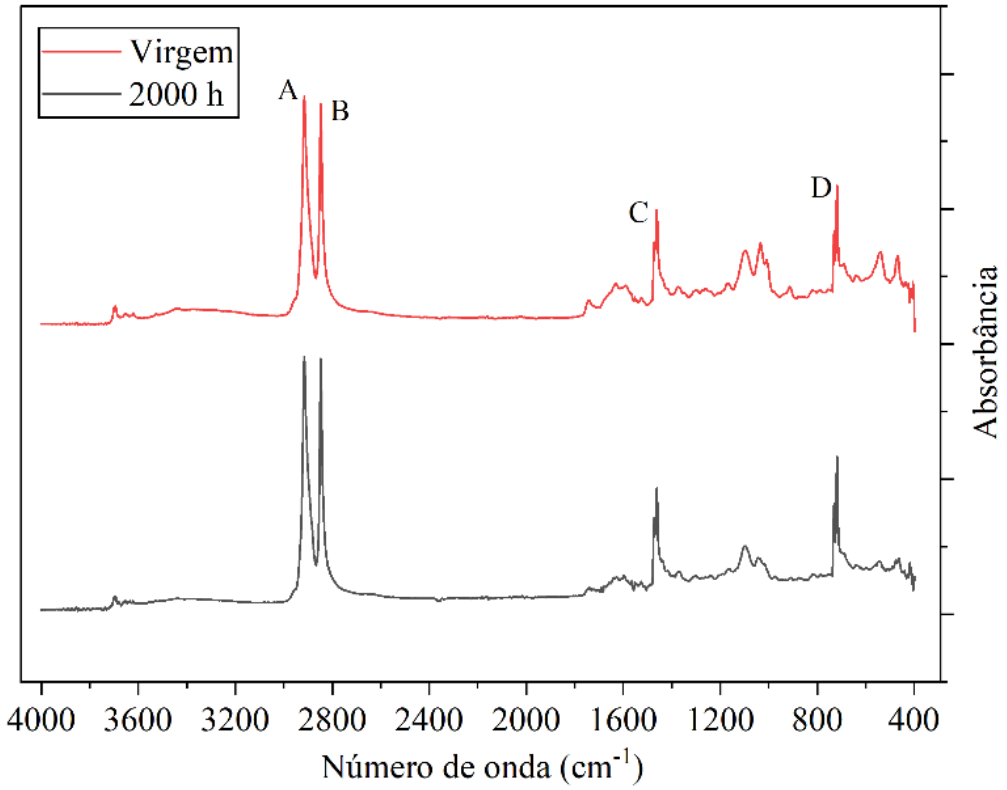


Figura 3 - FTIR da borda lisa de geomembrana antes e após envelhecimento em câmara UV



4 CONCLUSÃO

De modo geral, as variações espectrais observadas nas geomembranas corroboram a tendência apontada por Aparicio-Ardila (2025) de que a porção de borda lisa apresenta maior suscetibilidade à degradação oxidativa que a texturizada. As variações mais pronunciadas das bandas associadas a carbonilas, hidroxilas e da região 800–1200 cm^{-1} na borda lisa da geomembrana indica um processo oxidativo mais avançado e formação acelerada de produtos secundários, coerente com a maior perda de antioxidantes e avanço mais rápido nos estágios de oxidação relatados pela autora. Já a porção texturizada mostrou alterações espectrais mais moderadas ao longo do envelhecimento e maior estabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP e ao Laboratório de Química da UFOB pelo apoio técnico e infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio-Ardila, M.A. (2025) *Durability of textured HDPE geomembranes in environmental protection applications*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 118 p.

Aparicio-Ardila, M.A., Kobelnik, M., Valentin, C.A., Palomino, C.F., Sabogal-Paz, L.P., & Silva, J.L. (2025a). Natural weathering effects on white, green, and black HDPE textured GMs. *Geosynthetics International*, 32(6), 1-40. https://doi.org/10.1680/jgein.24.00150.

Aparicio-Ardila, M.A., Silva, J. L. (2026) Textured high-density polyethylene geomembranes in geotechnical and environmental engineering: an overview. *Soils and Rocks.* 49 (2) : e2026012325. https://doi.org/10.28927/SR.2026.012325

Aparicio-Ardila, M.A., Valentin, C.A., & Silva, J.L. (2025b). Colored HDPE textured geomembranes exposed to UV: laboratory insights into material degradation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 11(3), 23. https://doi.org/10.1007/s40891-025-00632-z.

ASTM International (2012). ASTM D5199: *Standard test method for measuring the nominal thickness of Geosynthetics.*

ASTM International (2015). ASTM D7466: *Standard test method for measuring the asperity height of textured geomembrane.*

ASTM International (2020). ASTM D4833: *Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products.*

ASTM International (2020). ASTM D6693: *Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes.*

ASTM International (2021). ASTM D1004: *Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting.*

ASTM International (2021). ASTM D5994: S*tandard test method for measuring core thickness of textured geomembranes.*

ASTM International (2023). ASTM D3895: *Standard test method for oxidative-induction time of polyolefins by differential scanning calorimetry.*

Azuma, Y., Takeda, H., Watanabe, S., & Nakatani, H. (2009). Outdoor and accelerated weathering tests for polypropylene and polypropylene/talc composites: A comparative study of their weathering behavior. *Polymer Degradation and Stability*, 94(12), 2267-2274.

Curcio, M. S., Oliveira, M. P., Waldman, W. R., Sánchez, B., & Canela, M. C. (2015). TiO2 sol-gel for formaldehyde photodegradation using polymeric support: photocatalysis efficiency versus material stability. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 800-809. https://doi.org/10.1007/s11356-014-2683-4

Dias Filho, J. L. E., de Almeida Maia, P. C., & de Castro Xavier, G. (2019). Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), 577-585. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.02.002.

Kwon, H. J., Lee, Y. W., Kim, H. S., Zhoh, C. K., Park, K. W., (2013) One-dimensional TiO2 nanostructures with improved UV-blocking properties. *Materials Letter*. 93 (1), 175–178.

Müller, W. (2007). *HDPE geomembranes in geotechnics* (1st ed.). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37288-2

Murakami, N., & Koga, N. (2016). In situ photoacoustic FTIR studies on photocatalytic oxidation of 2-propanol over titanium (IV) oxide. *Catalysis Communications*, 83, 1-4.

Rouillon, C., Bussiere, P. O., Desnoux, E., Collin, S., Vial, C., Therias, S., & Gardette, J. L. (2016). Is carbonyl index a quantitative probe to monitor polypropylene photodegradation?. *Polymer degradation and stability*, 128, 200-208.

Scheirs, J. (2009). *A guide to polymeric geomembranes: a practical approach*. Hoboken: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470748213.

Shukla, S. K.; Yin, J. H. (2006*) Fundamentals of geosynthetic engineering*. London: Taylor & Francis.

Valente, I. M., Carneiro, J. R., Almeida, P. J., & Lopes, M. L. (2010). Chemical studies about the durability of polypropylene geotextiles. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics* (Vol. 2, pp. 785-788).

Yang, X.; Ding, X. Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 2, p. 103–109, 2006.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/33

Durabilidade Geotêxteis Tecidos Aplicados no Campo Experimental da Universidade Federal do Oeste da Bahia

Sofia Oliveira Carvalho Bulhoes
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sofia.b0972@ufob.edu.br

Eduarda Calado Da Silva
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, eduarda.s0909@ufob.edu.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: Os geossintéticos, por apresentarem vantagens estruturais e econômicas, têm sido cada vez mais utilizados em obras geotécnicas. Em função dessa demanda crescente, garantir um nível adequado de durabilidade é fundamental para assegurar a estabilidade e a vida útil das estruturas. Nesse viés, este trabalho tem como objetivo caracterizar e estimar o tempo de vida de geotêxteis expostos às variáveis climáticas de Barreiras (BA), avaliando seu comportamento mecânico através de ensaios de resistência à tração. Foram analisados quatro tipos de geotêxteis, denominados conforme polímero de fabricação, polipropileno-PP ou poliéster-PET, seguido de sua gramatura, PET-340, PET-740, PP-500 e o PP-925. Após exposição ao ambiente tiveram suas medidas de máxima tensão obtidas a partir da máquina universal de ensaio presente no laboratório da Universidade Federal do Oeste da Bahia. Os resultados indicaram que o PET-340 apresentou as menores resistências em todos os períodos analisados, ao passo que o PP-925 apresentou maior estabilidade mecânica, com menor redução das tensões de ruptura. Sob uma ótica geral, registrou-se uma queda mais acentuada nas tensões datadas no inverno, de modo que sugere influência de fatores climáticos no processo de degradação dos materiais e, portanto, da sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Geotêxteis, Durabilidade, Degradação no campo, Resistência à tração.

ABSTRACT: Geosynthetics, due to their structural and economic advantages, have been increasingly used in geotechnical works. Because of this growing demand, ensuring an adequate level of durability is fundamental to guaranteeing the stability and lifespan of structures. In this context, this work aims to characterize and estimate the lifespan of geotextiles exposed to the climatic variables of Barreiras (BA), evaluating their mechanical behavior through tensile strength tests. Four types of geotextiles were analyzed, named according to their manufacturing polymer, polypropylene-PP or polyester-PET, followed by their basis weight: PET-340, PET-740, PP-500, and PP-925. After exposure to the environment, their maximum stress measurements were obtained using the universal testing machine present in the laboratory of the Federal University of Western Bahia. The results indicated that PET-340 presented the lowest resistances in all periods analyzed, while PP-925 showed greater mechanical stability, with less reduction in rupture stresses. From a general perspective, a more pronounced drop in dated stresses was recorded in winter, suggesting the influence of climatic factors on the degradation process of materials and, therefore, on their lifespan.

KEYWORDS: Geosynthetics, Geotextiles, Durability, Field Degradation, Tensile Strength.

1 INTRODUÇÃO

Nas obras geotécnicas modernas, vem sendo amplamente utilizados os geossintéticos, em virtude das sua eficiente propriedade mecânica e versatilidade de uso. Por isso, esse material vem sendo amplamente integrado ao elenco de insumos de construção civil, utilizados em todas as modalidades de obras de engenharia (Vertematti, 2015). Entre esses materiais, o subgrupo dos geotêxteis são empregados em diversas categorias, de acordo com sua principal função, como por exemplo, separação, reforço, filtração, drenagem e barreira de umidade. Diante de uma vasta gama de aplicações, as obras são projetadas com base na função em que esse geotêxtil será empregado (Koerner, 2012).

Em virtude da crescente utilização desse recurso, torna-se cada vez mais progressiva a investigação do seu comportamento mecânico desenvolvido em campo. Um importante aspecto relativo à utilização de polímeros em construções, sobretudo geotécnicas, diz respeito à dependência do comportamento mecânico dos geotêxteis em relação à temperatura e à taxa de deformação (Palmeira, 2018). Sendo assim, o desempenho desses materiais ao longo do tempo está comumente relacionado à sua resistência mediante as condições ambientais, como radiação ultravioleta, variações de temperatura e umidade, visto que provocam alterações em suas propriedades físicas e, consequentemente, mecânicas (Dias Filho et al., 2024). Logo, a durabilidade e a resistência dos geossintéticos podem sofrer drásticas reduções quando expostos a esses fatores (Koerner, 2012; Dias Filho e Silva, 2025).

A avaliação das propriedades de um geossintético é importante para garantir que ele desempenhe adequadamente a função pretendida quando utilizado em um projeto ou estrutura (Shukla, 2016). Nesse viés, o estudo acerca da durabilidade desse material exposto a diversas condições climáticas reais torna-se imprescindível para clareza do comportamento desenvolvido pelo geotêxtil ao longo de sua vida útil. Diante disso, estudos realizados em campo experimental permitem obter dados reais acerca da ação que fenômenos atmosféricos provocam na degradação de geotêxteis, de modo que contribui e evolui o modelo de dimensionamento empregado nos campos de projetos geotécnicos.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o comportamento mecânico de geotêxteis tecidos expostos às condições climáticas, no campo experimental da Universidade Federal do Oeste da Bahia, na cidade de Barreiras (BA). O estudo tem como base a análise dos resultados obtidos através do ensaio de resistência à tração, buscando compreender a influência das condições sazonais no comportamento mecânico e na durabilidade desses materiais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Geotêxtil

Para realização desse estudo, foram selecionados dois tipos de geossintéticos: geotêxteis tecidos multifilamento de PET (poliéster) e monofilamentos de PP (polipropileno), os quais foram divididos entre amostras brancas e pretas respectivamente. Dentro de cada grupo foram separados em espessuras distintas, do mais fino, PET 340 e PP 500, ao mais grosso, PET 740 e PP 925, evidenciados na Figura 1.



Figura 1. Geotêxteis tecidos expostos na UFOB.

As características dos geotêxteis estudados são apresentadas na Tabela 1. Os testes foram realizados de acordo com às normas para determinar a massa por unidade de área (NBR ISO 9864, 2013) e espessura nominal (NBR ISO 9863–1, 2013), com coeficientes de variação abaixo de 10%. As amostras foram cortadas na direção longitudinal e a resistência à tração da amostra virgem foi determinado com faixa estreita (NBR15865, 2010).

Tabela 1. Propriedades dos geotêxteis intactos.

Property	Value			
	PET340	PP500	PET740	PP925
Resistencia à Tração (kN/m)	52,5±1,6	106,2±2,0	150,7±5,2	155±1,6
Deformação (mm)	16,5±1,8	20,1±1,3	34,8±1,8	28,5±2,1
Gramatura (g/m²)	340±8	500±9	740±23	925±25
Espessura (mm)	0,51±0,02	1,53±0,04	1,17±0,01	2,62±0,06

2.2 Amostragem e corpos de prova

2.2.1 Exposição e caracterização em campo

Nesse trabalho, a exposição do material de análise foi realizada na cidade de Barreiras/BA, nas proximidades da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) (Figura 2). O local de exposição encontra-se nas proximidades da Prainha. Antes da devida exposição, foram preparadas amostras para os quatros geotêxteis tecidos da pesquisa em dimensões aproximadas de 20 x 20 cm, totalizando 40 amostras expostas em um painel de madeira sobre estrutra metálica. Com o conteúdo serão analisados as variáveis climáticas para as quatros estações do ano entre dezembro de 2024 e dezembro de 2025. E para pesquisas futuras, há material para os próximos quatro anos de pesquisa.



Figura 2. Geotêxteis sobre mesa em exposição na ETE, UFOB.

O painéis foram projetados seguindo as recomendações da ISO 877-1 (2009) e ISO 877-2 (2009). Os geotêxteis foram expostos aos agentes intempéries em suporte de estrutura de aço com tampo de madeira e inclinação (igual à latitude do local de exposição) para garantir a condição de máxima severidade da radiação solar de acordo com a ISO TS 13434. As amostras foram instaladas em suporte com inclinação de 12°09', de acordo com a latitude local, 12º09'10" Sul e 41° 44º59'24" oeste, com base virada para norte.

2.2.2 Corpos de prova

Após a exposição, das amostras expostas da Figura 2, corpos de prova foram preparados com medidas de 4 cm por 10 cm aproximadamente (Figura 3), de modo que sua maior medida se localizou no sentido de fabricação do geotêxtil, adotado posteriormente como orientação no ensaio de tração.

2.2.3 Ensaio de resistência à tração

Para a obtenção dos dados necessários, foi utilizada a Máquina Universal de Ensaios - MUE (Figura 4), presente no laboratório da Universidade Federal do Oeste da Bahia. O ensaio foi realizado com a fixação da peça a ser tracionada por garras acopladas à máquina.

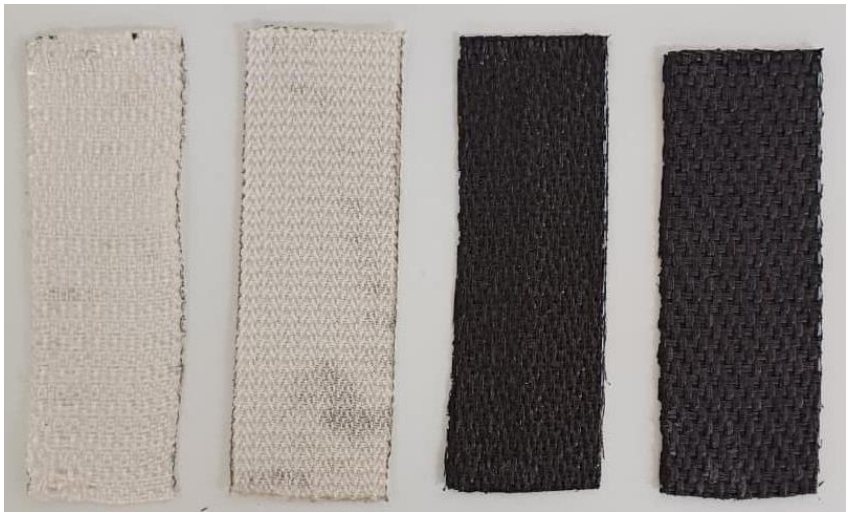


Figura 3. Corpos de prova preparados para o ensaio de tração.



Figura 4. MUE.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova foram retirados da mesa, na qual ficaram expostos às condições climáticas locais. A separação desse material se deu por agrupamento daqueles degradados em estações diferentes. Isto é, os resultados dos ensaios com as amostras buscaram analisar os efeitos que as subdivisões climáticas provocam no comportamento mecânico dos geotêxteis. Sendo assim, foram retiradas amostras relativas ao verão, outono, inverno e primavera, degradadas no período de 21/12/2024 à 20/03/2025, 20/03/2025 à 20/06/2025, 20/06/2025 à 22/09/2025 e 22/09/2025 à 21/12/2025, respectivamente.

Após exposição às intempéries da região, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração em faixa estreita (NBR15865, 2010), na qual foram coletados dados de tensão e deformação máximas, utilizadas para a determinação do módulo secante na ruptura. Tal parâmetro foi calculado como a razão entre a tensão máxima e a deformação correspondente, de modo que representa a rigidez global do material até o seu ponto de rompimento.

Com os dados de tensão e deformação de cada material, em estações distintas, foram plotados gráficos da Figura 5. Observa-se curvas de tensão x deformação não lineares para todos os geossintéticos analisados. Nota-se que ao longo da trajetória dos gráficos, a inclinação sofre mudanças, ora mais declinada, ora mais acentuada. Isso indica que a rigidez inicial difere da final, sendo mais elevada no início e apresenta reduções progressivas até o rompimento. Por isso, foi adotado o módulo secante da ruptura como parâmetro de dureza, ao passo que engloba todos os pontos sinuosos da curva.

Na Tabela 2 podem ser conferidos os valores médios da resistência a tração máxima de cada ensaio, separados conforme gramatura e estação do ano. Nota-se, a priori, as variações ocorridas entre as estações para cada tipo de material, de modo que os menores valores correspondem a estação da primavera, seguida pelo verão, outono e inverno. Com isso, observa-se a tendência de menor variação da resistência à tração no inverno,

possivelmente associada ao clima sem chuvas nessa estação, a qual tem como a radiação o agente de degradação predominante. As resistências mais baixas são observadas no verão e na primavera, o qual deve-se ao fato de apresentarem condições climáticas mais extremas com variação de temperatura e, principalmente ao período chuvoso. Dessa forma, essas duas estações contribuíram para a ocorrência de uma degradação mais crítica dos materiais. Já o outono obteve comportamento intermediário, em razão da menor quantidade de dias chuvosos, uma vez que caracteriza-se pelo fim da seca na região durante o inverno.

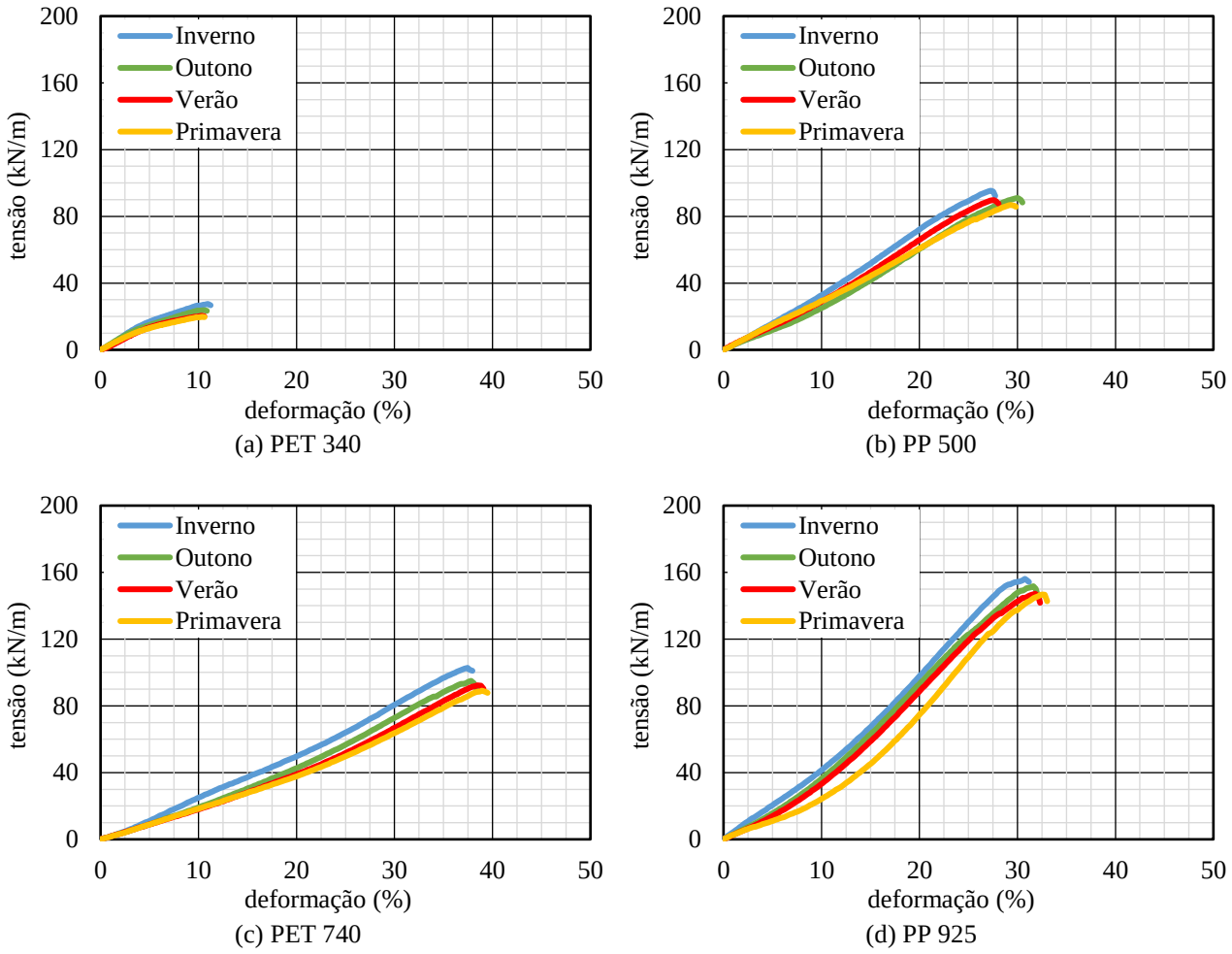


Figura 5. Gráfico: tensão x deformação dos geossintéticos

Em visualização dos dados apossados, ao separar os geossintéticos por composição diferente do material, percebe-se que a consistência das curvas das amostras de maiores espessuras mantém-se acima daquelas de menor espessura. Isto é, a comparação entre materiais de mesma composição polimérica evidencia a influência da gramatura. Tal influência é percebida, mais evidentemente, nos valores de αmáx, em que ocorre o seu aumento nos corpos de prova de mesmo material, mas de gramatura maior, ou seja, tal dado tem valor maior registrado no PET 740 em comparação com o PET 340, assim como o PP 925, que possui αmáx mais elevado que o PP 500. Dessa forma, fica evidente que o aumento da gramatura está diretamente associada ao aumento da capacidade resistente e da energia absorvida até a ruptura, pois geotêxteis de maior gramatura apresentam maior capacidade de dissipação de energia. Além de que, une-se ao fato de que o tipo do polímero também influencia na estabilidade e na energia absorvida, haja vista que, na composição do geotêxtil tipo PP, são apresentados estabilizantes em sua fórmula. Então, os efeitos das intempéries ambientais se tornam menos significativos nessas amostras, em relação aos do tipo PET. Pode-se observar, dessa forma, que os geotêxteis tipo PET apresentaram resistência retira muito inferior ao tipo PP.

Nos ensaios, foram registrados coeficientes de variação baixos, o que demonstra menor variabilidade entre os resultados, assegurando a discussão acerca dos resultados supracitados.

Tabela 2. Resistência média dos geossintéticos por estação

Geotêxtil	Estação	αmáx (kN/m)	
		Média	CV (%)
PET 340	Verão	20,41	0,38
	Outono	23,71	0,65
	Inverno	27,52	1,25
	Primavera	19,79	2,71
PET 740	Verão	92,31	1,12
	Outono	94,98	4,34
	Inverno	102,78	3,35
	Primavera	89,12	3,42
PP 500	Verão	89,70	0,56
	Outono	90,92	2,16
	Inverno	95,37	1,52
	Primavera	86,81	2,28
PP 925	Verão	147,21	5,36
	Outono	151,72	1,00
	Inverno	156,14	2,09
	Primavera	146,74	3,83

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados supracitados, avaliou-se o comportamento mecânico de geotêxteis ao longo das estações do ano, a partir de ensaios de resistência à tração realizados após a exposição desse material às condições climáticas do município de Barreiras (BA), nas proximidades da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB). De modo geral, os resultados indicaram que a espessura do material exerce um papel significativo na capacidade resistente e na rigidez global dos geotêxteis, apesar da influência da sazonalidade nas propriedades mecânicas, de modo que se torna um fator decisivo para as aplicações estruturais.

Os resultados indicaram que o geotêxtil PET 340 apresentou a menor capacidade resistente, enquanto o PP 925 manifestou maiores valores de tensões máximas, evidenciando maior resistência ao longo do carregamento. Adicionalmente, a análise comparativa também salientou a influência da gramatura no desempenho mecânico, uma vez que as amostras de maior densidade apresentaram maiores tensões de ruptura e maior capacidade de absorção de energia.

Além disso, notou-se que no verão e primavera a degradação foi mais significativa, ao passo que o inverno pouco alterou a sua estrutura, demonstrado a partir do aumento da resistência no período quando comparado às outras estações analisadas. Isso se deve às condições climáticas com temperaturas mais amenas e ausência de chuva nesse período, demonstrando que a durabilidade do material se afeta menos nessas condições. Enquanto isso, o outono demonstrou um comportamento mais intermediário. Dessa forma, fica evidente que a durabilidade nas condições de campo observadas é altamente influenciada pelos regimes de chuvas na região.

Em suma, os dados apresentados contribuem para a compreensão do comportamento de diferentes geotêxteis expostos às condições ambientais reais de campo. A compreensão dos fatores que exercem influência nos materiais, como condições ambientais, gramatura e tipo de polímero, é fundamental para a sua adequada aplicação em obras de infraestrutura. Diante disso, estudos experimentais como o apresentado fornecem subsídios importantes para a avaliação da durabilidade e da vida útil desses materiais, no qual o geotêxtil PP 925 apresentou maior estabilidade entre os analisados, seja em função da gramatura ou aditivos estabilizantes da sua composição. Assim, esses resultados contribuem no dimensionamento mais seguro e eficiente de futuras estruturas geotécnicas que o utilizarem esse material em curto prazo ou em condições favoráveis de intemperismo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP e à UFOB pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010) NBR 15865. *Geomembranas e produtos correlatos — Determinação das propriedades de tração.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) NBR ISO 9863-1. *Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) NBR ISO 9864. *Geossintéticos - Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos*. Rio de Janeiro.

Dias Filho, J. L. E., Silva, J. L., Valentin, C. A., Fleury, M. P., Aparicio-Ardila, M. A., Vidal, D. M. and Costa, C. M. L. (2024). *Natural weathering effects of nonwoven geotextile exposed to different climate conditions*. Geosynthetics International. https://doi.org/10.1680/jgein.23.00156

Dias Filho, J. L. E.; Silva, J. L. (2025). Estudo da durabilidade de geossintéticos. *Avanços recentes em Ciências da Engenharia*. São Carlos: v. 1. 255p, p. 80-102. http://dx.doi.org/10.11606/9786586954524.

ISO (2009b). *ISO 877-2:2009: Plastics – Methods of Exposure to Solar Radiation – Part 2: Direct Weathering and Exposure Behind Window Glass*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO (2020).*ISO/TS 13434:2020: Geosynthetics – Guidelines for Assessment of Durability*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO (International Organization for Standardization) (2009a). *ISO 877-1:2009: Plastics – Methods of Exposure to Solar Radiation – Part 1: General Guidance*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Koerner, R. M. (2012) *Designing with geosynthetics*. 6. Ed. Bloomington: Xlibris

Palmeira, E. M. (2018) *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente.* São Paulo: Oficina de Textos.

Shukla, S. K. (2016) *Fundamentals of geosynthetic engineering.* London: CRC Press.

Vertematti, J. C. (2015) *Manual brasileiro de geossintéticos*, São Paulo: Edgard Blücher.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/34

Efeitos de Vibrações Induzidas por Britadores de Mineração em Estruturas de Solo Reforçado com Geossintéticos

Kaio Morete Santos
Mestrando em geotecnia, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, kaio.morete@estudante.ufscar.br

Fernando Henrique Martins Portelinha
Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Os muros de solo reforçado com geossintéticos têm sido amplamente utilizados em empreendimentos minerários, especialmente como estruturas de suporte a britadores e áreas sujeitas ao tráfego de equipamentos pesados. Nesses contextos, além das solicitações estáticas usuais, essas estruturas podem estar submetidas a vibrações operacionais induzidas por equipamentos de britagem, cuja influência no comportamento global ainda é pouco explorada na literatura. O presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica, a influência das vibrações induzidas por britadores no desempenho de muros de solo reforçado com geossintéticos. Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo com base em estudo experimental consagrado da literatura. Em seguida, foram simuladas condições típicas de aplicação em mineração, considerando diferentes cenários de carregamento dinâmico e configurações de apoio da superestrutura. As análises foram conduzidas no *software* PLAXIS 2D, utilizando o modelo constitutivo *Hardening Soil* com *Small Strain Stiffness* (*HSsmall*). Os resultados indicam que as vibrações operacionais promovem incrementos localizados nos deslocamentos e nas deformações internas, sem, contudo, ocasionar instabilidade global ou amplificações significativas quando comparadas às condições estáticas de projeto. Observou-se ainda que a configuração de engastamento influencia a redistribuição de esforços e os padrões de deformação.

PALAVRAS-CHAVE: solo reforçado com geossintéticos, vibrações induzidas, britadores, mineração, modelagem numérica.

ABSTRACT: Reinforced soil walls with geosynthetics have been widely applied in mining projects, particularly as support structures for crushers and areas subjected to heavy equipment traffic. In such conditions, beyond conventional static loads, these structures may also be exposed to operational vibrations induced by crushing equipment, whose influence on global behavior remains insufficiently explored in the literature. This study aims to evaluate, through numerical modeling, the influence of crusher-induced vibrations on the performance of geosynthetic reinforced soil walls. Initially, the numerical model was calibrated based on a well-established experimental study from the literature. Subsequently, typical mining conditions were simulated, considering different dynamic loading scenarios and support configurations of the superstructure. The analyses were performed using PLAXIS 2D, adopting the Hardening Soil model with Small-Strain Stiffness (HSsmall). The results indicate that operational vibrations lead to localized increases in horizontal displacements and internal deformations, without causing global instability or significant amplification when compared to static design conditions. It was also observed that the support condition significantly influences the redistribution of stresses and deformation patterns.

KEYWORDS: crushers, geosynthetic reinforced soil, induced vibrations, mining, numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Os muros de solo reforçado com geossintéticos têm se consolidado como uma solução amplamente empregada para estabilização de taludes, em função de vantagens como rapidez construtiva, elevada resistência à tração, viabilidade econômica e bom desempenho sob solicitações sísmicas (Evirgen *et al.*, 2017; Mafia, 2020; Chaitanya e Karpurapu, 2023). No contexto brasileiro, a aplicação é fortemente associada à mineração,

sendo utilizados como acessos, contenções e, especialmente, como estruturas de suporte a britadores, em um cenário de crescente mecanização das operações (Terefe e Tefera, 2019; Yamashita *et al.,* 2021).

Nessas aplicações, além dos carregamentos estáticos, essas estruturas estão sujeitas a ações dinâmicas induzidas por vibrações operacionais, que podem se propagar ao maciço por meio da fundação ou do contato direto com a superestrutura, influenciando seu desempenho. Apesar da relevância prática, estudos específicos sobre o comportamento de muros de solo reforçado em ambiente minerário ainda são limitados. Revisões recentes, abrangendo informações de 1985 a 2023, indicam avanço nas pesquisas, sobretudo em estabilidade sísmica e modelagem numérica, mas apontam lacuna quanto à aplicação em mineração (Malekmohammadi e Damians, 2024).

2 METODOLOGIA

A estratégia de modelagem adotada neste estudo baseia-se na integração de abordagens consolidadas da literatura, tendo como referência o modelo experimental e numérico proposto por Hatami e Bathurst (2005), reconhecido por sua capacidade de representar adequadamente o comportamento de muros de solo reforçado, a partir do qual foram incorporadas adaptações voltadas à simulação de condições típicas do contexto minerário, conforme abordagens descritas por Ananias *et al.* (2014).

A calibração numérica foi realizada no *software* PLAXIS 2D, versão 20.2.0.83, sendo posteriormente introduzidas modificações na geometria, nas condições de carregamento e na configuração estrutural, com o objetivo de representar de forma mais realista os muros de solo reforçado empregados no ambiente industrial, como é posto na sequência.

2.1 Modelagem numérica e carregamento dinâmico

A estrutura adotada como base para o presente estudo é apresentada na Figura 1, em vista frontal, e na Figura 2, em seção. Trata-se de um muro de solo reforçado com 20 metros de altura e inclinação de face semivertical (87°), composto por reforços do tipo geogrelha dispostos horizontalmente ao longo da altura da estrutura. Os reforços são distribuídos com espaçamento vertical constante de 0,50 m, sendo empregados três níveis distintos de rigidez, organizados em camadas ao longo do maciço reforçado. A face do muro é constituída por elementos modulares do tipo *terramesh*, e o maciço é formado por solo de aterro compactado.

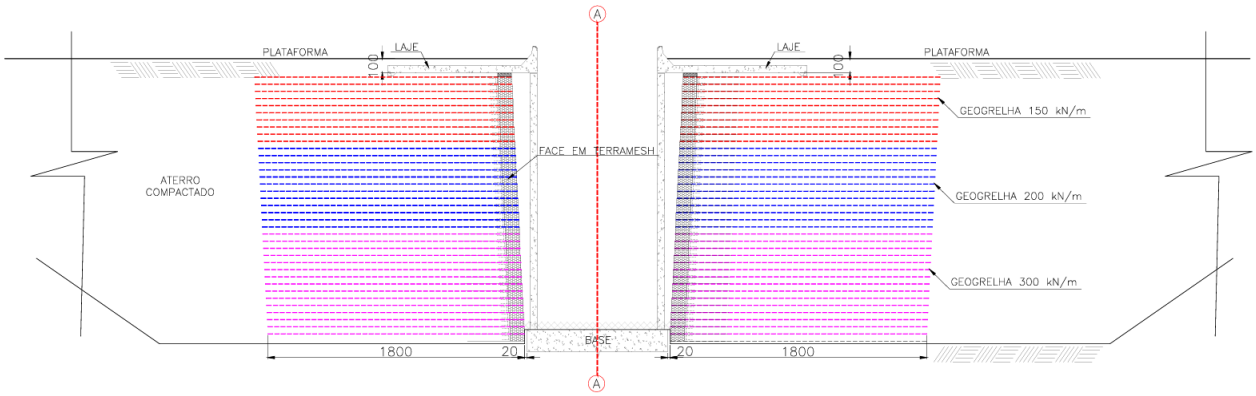


Figura 1. Representação frontal elaborada para simular a vista frontal da estrutura conceitual de referência do estudo.
Fonte: próprio autor baseado em Ananias *et al.* (2014).

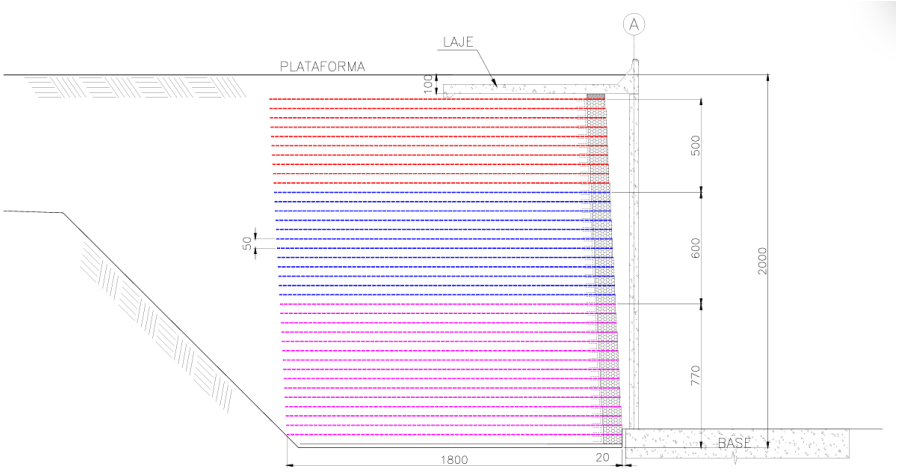


Figura 2. Seção típica A–A do muro de solo reforçado adotado como referência conceitual para o presente estudo – cotas em centímetros.
Fonte: modificado de Ananias *et al.* (2014).

A análise numérica foi conduzida por meio de estágios construtivos, com incrementos de altura compatíveis com o espaçamento entre reforços, totalizando 40 etapas de construção. A malha adotada foi composta por elementos triangulares de 15 nós, resultando em 45.185 nós e 5.446 elementos. O modelo foi desenvolvido no *software* PLAXIS 2D, versão 20.2.0.83.

Em cada etapa construtiva, foram considerados os efeitos da compactação do aterro, por meio da aplicação da metodologia do tipo II proposta por Mirmoradi e Ehrlich (2018). Ao final da construção, foram aplicados carregamentos incrementais de 10 kPa no topo da estrutura, até se atingir o valor de 100 kPa, correspondente à carga de projeto adotada por Ananias *et al.*, (2014). O modelo resultante modelado na ferramenta numérica é representado na Figura 3.

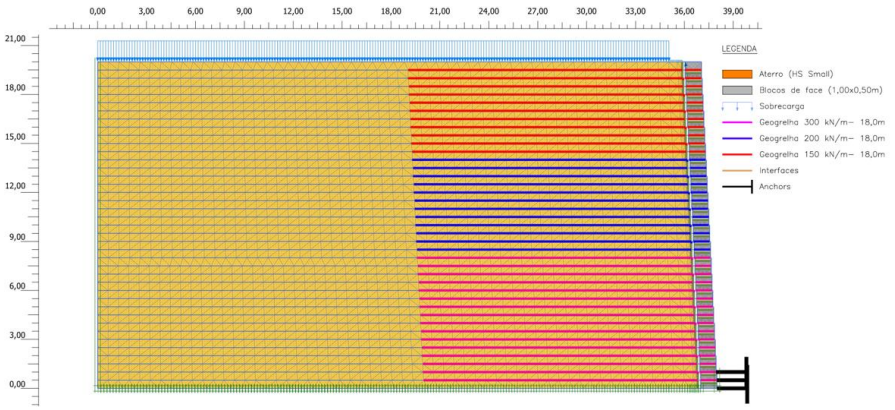


Figura 3. Geometria, condições de contorno e malha utilizada na modelagem numérica.

2.1.1 Modelagem dos materiais

A modelagem dos materiais seguiu a parametrização definida quando da calibração numérica. O aterro foi modelado como um solo homogêneo, isotrópico e elasto-plástico não linear, adotando o critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* e comportamento dilatante. Trata-se de uma areia mal graduada (SP), com peso específico de 16,8 kN/m³, ângulo de atrito efetivo de 44° e ângulo de dilatância de 8°. Para representar adequadamente a dependência da rigidez com o nível de tensão e o comportamento em pequenas deformações, foi utilizado o modelo constitutivo *Hardening Soil with Small-Strain Stiffness* (*HSsmall*). Os principais parâmetros incluem: E_{50} = 56.667 kN/m², E_{oed} = 47.220 kN/m², E_{ur} = 170.000 kN/m², ν = 0,25, G_0 = 300.000 kN/m² e $\gamma_{0,7}$ = 0,0002.

Os reforços foram representados por geogrelhas do tipo MacGrid® WG, modeladas como elementos de tração com comportamento linear-elástico e rigidez axial constante de 300, 200 e 150 kN/m, como é

apresentado na Figura 1. O comprimento dos reforços foi de 18 metros. A ancoragem das geogrelhas foi simulada por sua inserção sob os elementos de face, aproveitando as tensões verticais atuantes, em função de limitações do *software*.

A face do muro foi modelada por blocos segmentais de concreto, seguindo a validação numérica, considerados como material homogêneo, isotrópico e linear-elástico, com módulo de elasticidade de $23{,}0 \times 10^6$kN/m², coeficiente de *Poisson* de 0,15 e peso específico de 21,8 kN/m³. As interfaces solo-bloco e bloco-bloco foram simuladas pelo modelo de *Mohr-Coulomb*, com parâmetros reduzidos de resistência e rigidez, de modo a representar adequadamente as interações mecânicas entre os elementos estruturais e o solo.

2.1.2 Carregamento dinâmico

Em função da ausência de dados diretos na literatura quanto às acelerações efetivamente transmitidas por britadores em muros de solo reforçado, adotou-se uma abordagem paramétrica, fundamentada em informações indiretas disponíveis. As faixas de frequência consideradas foram baseadas em dados típicos de operação de britadores, que indicam valores entre aproximadamente 1,4 e 16,7 Hz (Wills, 2016). Para a definição das amplitudes de aceleração, foram utilizados registros experimentais disponíveis na literatura, originalmente associados ao comportamento dinâmico de equipamentos mecânicos, os quais foram posteriormente normalizados em relação à aceleração da gravidade, conforme apresentado no item correspondente. A partir desses dados, foram definidos diferentes cenários de carregamento dinâmico, combinando níveis distintos de aceleração e frequência, de modo a representar condições de baixa, média e alta intensidade.

Adicionalmente, considerando que a forma de transferência da vibração para o maciço não é claramente estabelecida, adotou-se uma abordagem conservadora quanto à direção de aplicação dos carregamentos. Com base em estudos experimentais sobre propagação de vibrações no solo (Massarsch, 1999; Chen *et al.*, 2019), as acelerações foram aplicadas de forma simultânea nas direções vertical e horizontal, uma vez que, mesmo em sistemas com excitação predominantemente vertical, são observadas componentes horizontais significativas no campo de resposta do solo. Os registros definidos com diferentes amplitudes e frequências de aceleração são mostrados na Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

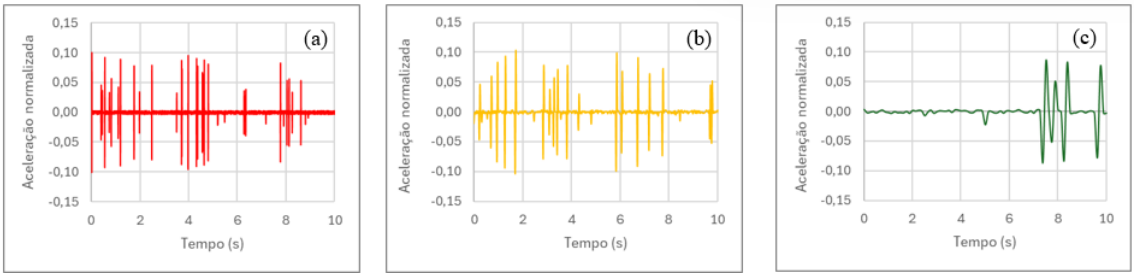


Figura 4. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,003 e aceleração de pico normalizada de 0,10: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

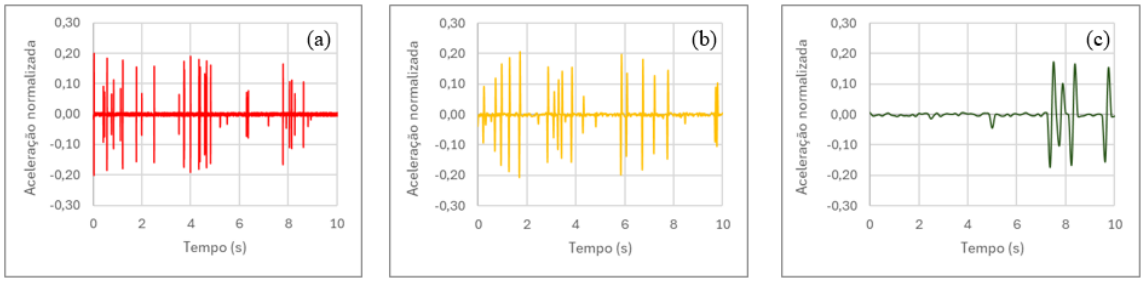


Figura 5. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,006 e aceleração de pico normalizada de 0,20: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

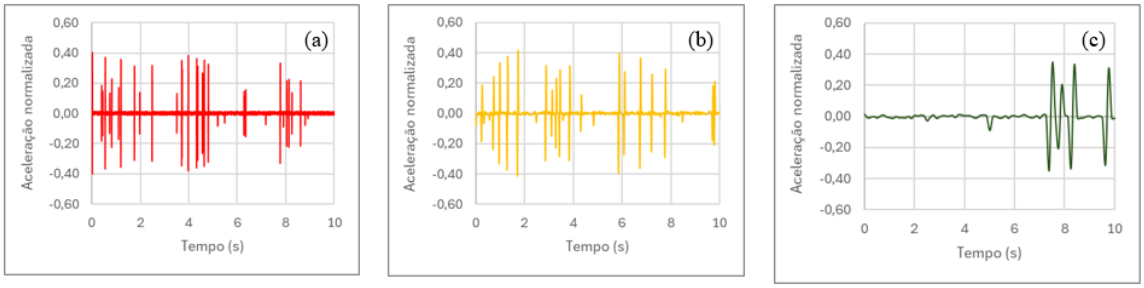


Figura 6. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,012 e aceleração de pico normalizada de 0,40: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

2.1.3 Condições de engastamento e modelagem dos materiais

Diante da incerteza quanto à forma de interação entre a estrutura de suporte do britador e o muro de solo reforçado, foram analisadas duas condições representativas de vinculação: (i) engastamento no topo, caracterizando um contato localizado entre a estrutura e o muro; e (ii) engastamento em 5 pontos ao longo da altura do muro, representando uma condição mais rígida de vinculação. As reações associadas a essas condições foram previamente estimadas por meio de modelagem estrutural, sendo posteriormente aplicadas ao modelo geotécnico, contemplando tanto os carregamentos estáticos quanto os efeitos dinâmicos associados à vibração do equipamento. A representação dos carregamentos impostos, os valores utilizados bem como o local de engastamento são representados na Figura 7.

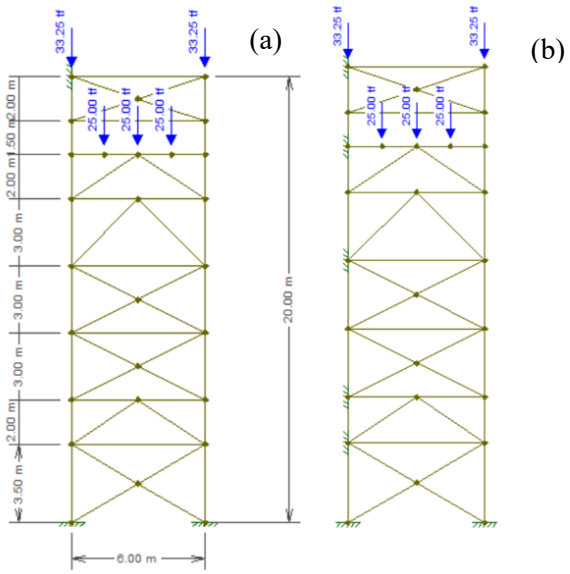


Figura 7. Posições de engaste da torre do britador com o muro de solo reforçado: (a) 1 apoio de terceiro gênero e dimensões da torre; (b) 5 apoios de terceiro gênero.

No que se refere à modelagem dos materiais, o reforço foi representado por elementos do tipo geogrelha, com rigidez definida a partir de dados de fabricante, considerando níveis de deformação compatíveis (2%) com condições de campo, resultando em 2750 kN/m, 2050 kN/m e 1300 kN/m, desde a base até o topo. O aterro, a face e as interfaces foram modelados conforme a etapa de validação numérica, com ajustes pontuais visando melhor representar o comportamento da estrutura nas condições analisadas.

3 RESULTADOS

A avaliação dos resultados foi conduzida a partir da análise dos deslocamentos horizontais da face e da distribuição das tensões verticais na base do muro, visando compreender o comportamento global da estrutura frente às diferentes condições de carregamento e configurações de engastamento consideradas.

3.1 Deslocamentos de face

A avaliação dos resultados foi conduzida com base nos deslocamentos horizontais da face, considerando duas condições de engastamento: no topo e distribuído ao longo da altura do muro, como foi descrito à priori. A Figura 8 apresenta as deformadas obtidas, enquanto a Tabela 1 sintetiza os valores máximos encontrados nas análises.

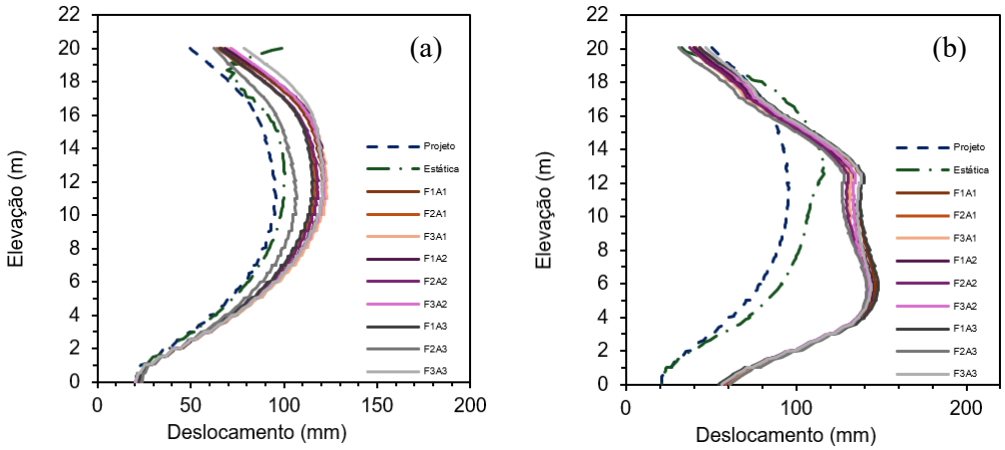


Figura 8. Deslocamentos de face: (a) cenário de engastamento 1 e (b) cenário de engastamento 2.

Tabela 1. Deslocamentos horizontais máximos dos cenários 1 e 2 de engastamento.

Análise	Deslocamento (mm) - cenário 1	Deformação ε (%) - cenário 1	Deslocamento (mm) - cenário 2	Deformação ε (%) - cenário 2
Projeto	95,95	0,48%	95,95	0,48%
Estática	100,29	0,50%	116,70	0,58%
F1A1	121,22	0,61%	146,81	0,73%
F2A1	117,24	0,59%	143,55	0,72%
F3A1	123,20	0,62%	143,87	0,72%
F1A2	121,68	0,61%	144,87	0,72%
F2A2	118,52	0,59%	142,93	0,71%
F3A2	121,89	0,61%	142,67	0,71%
F1A3	115,78	0,58%	148,39	0,74%
F2A3	106,99	0,53%	141,47	0,71%
F3A3	121,20	0,61%	143,99	0,72%

De forma geral, a condição de projeto, considerando apenas o carregamento distribuído de 100 kPa, apresentou deslocamento máximo da ordem de 96 mm (≈0,48%). A inclusão da carga estática, condição corresponde à aplicação das reações nos pontos de engastamento entre a torre e o muro, sem a consideração das ações dinâmicas induzidas pela vibração associada à estrutura do britador, resultou em comportamentos distintos. Para o engastamento no topo, observou-se incremento discreto, atingindo aproximadamente 100 mm (≈0,50%), com maior mobilização na região superior do muro. Por outro lado, no engastamento distribuído, o aumento foi mais significativo, alcançando cerca de 117 mm (≈0,58%), além de promover maior mobilização da região inferior, indicando maior participação do pé do muro na acomodação das solicitações.

A consideração do carregamento dinâmico promoveu incremento adicional dos deslocamentos em ambos os cenários. No engastamento no topo, os valores variaram entre aproximadamente 107 mm e 123 mm (≈0,53% a 0,62%), enquanto, no engastamento distribuído, variaram entre aproximadamente 141 mm e 148

mm (≈0,71% a 0,74%). Apesar desses incrementos, não foi observada tendência clara de aumento dos deslocamentos com a variação de frequência ou amplitude das excitações.

Em termos absolutos, o acréscimo máximo foi da ordem de 27 mm (≈28%) para o engastamento no topo e de aproximadamente 52 mm (≈50%) para o engastamento distribuído, quando comparados à condição de projeto. Ainda assim, todos os resultados permaneceram significativamente inferiores ao limite de 2% da altura do muro recomendado pela FHWA (Adams e Nicks, 2018), indicando desempenho adequado da estrutura.

3.2 Tensão mobilizada na base

Com relação às tensões verticais na base do muro, a avaliação foi conduzida de forma normalizada ($\sigma_v/\gamma H$), com o objetivo de permitir a comparação entre os diferentes cenários analisados, bem como eliminar a influência direta da altura da estrutura na interpretação dos resultados.

Na região mais próxima à face, observou-se uma redução local das tensões normalizadas, seguida por um pico acentuado imediatamente adjacente, comportamento associado às condições de contorno impostas pela presença dos blocos de face e pela interação solo–estrutura. A variação é compatível com o mecanismo de redistribuição de tensões nessa região, no qual ocorre alívio local, possivelmente relacionado à deslocamento do sistema de face no sentido de desconfinamento do solo de aterro, seguido por concentração de tensões decorrente da transferência de carga entre os elementos estruturais da face.

Comparando os cenários, verifica-se que o cenário 2 apresenta uma tendência mais pronunciada de redução das tensões ao longo da base, atingindo valores menores na região mais próxima à face. Por outro lado, no cenário 1, a distribuição permanece mais uniforme ao longo de uma extensão maior do reforço. Não obstante, os resultados indicam que as condições de engastamento do britador-muro de solo reforçado bem como os cenários dinâmicos avaliados praticamente não influenciam na tensão da base do modelo.

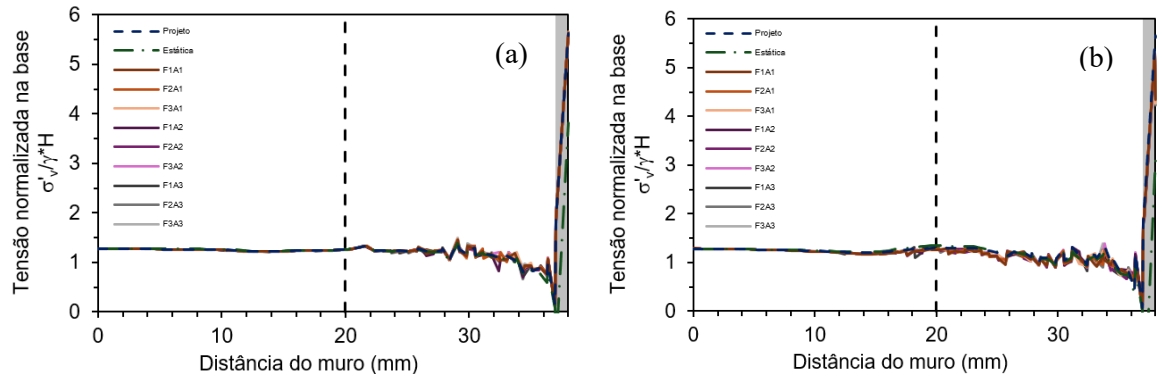


Figura 9. Tensão normalizada na base do modelo: (a) cenário de engastamento 1 e (b) cenário de engastamento 2.

4 CONCLUSÕES

O estudo avaliou, por meio de modelagem numérica em elementos finitos, a influência de vibrações de britadores nos deslocamentos horizontais de muros de solo reforçado, considerando duas condições de acoplamento estrutural: engastamento no topo e engastamento distribuído ao longo de cinco pontos na altura do muro. Os resultados indicaram que a inclusão das ações dinâmicas promove incremento dos deslocamentos horizontais, mais pronunciado na condição de engastamento distribuído, além de evidenciarem capacidade de modificação expressiva da forma da deformada ao longo da altura do muro, em função da condição de acoplamento adotada.

Ademais, foi observada baixa sensibilidade da resposta estrutural às variações de frequência e amplitude consideradas, sendo a condição de engastamento o fator predominante no comportamento do sistema. Apesar dos incrementos observados, os deslocamentos permaneceram inferiores ao limite de 2% da altura do muro, conforme recomendado pela *Federal Highway Administration* – FHWA (Adams e Nicks, 2018), indicando desempenho adequado da estrutura nas condições analisadas. Contudo, os resultados evidenciam que a

desconsideração das ações dinâmicas pode levar à subestimação dos deslocamentos, sobretudo em cenários com maior rigidez de acoplamento entre a superestrutura e o maciço reforçado.

No que se refere às tensões mobilizadas na base do modelo, verificou-se distribuição global semelhante entre os cenários analisados, com variações localizadas na região próxima à face, caracterizadas por alívio seguido de concentração de tensões na face. Observou-se que, de forma geral, as condições de engastamento e os carregamentos dinâmicos exerceram influência limitada sobre o padrão global de tensões na base do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, M., Nicks, J. (2018). *Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems*. 1st ed. McLean, Virginia, VA, USA, 225 p.

Ananias, E. J., Campos, G. O., Silveira, J. F. S., Mendonça, C. T. (2014). Estudo de caso: solo reforçado em terramesh e geogrelhas para a contenção de britagem primária em mineração – Alto Horizonte/GO – projeto, execução, controle e desempenho. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2014, Goiânia. *Anais...* ABMS.

Ardila-Montilla, E. L. (2023). *Estudo do desempenho de estruturas portantes de solo reforçado com geossintéticos GRS-IBS sob a ação de sismos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 122 p.

Chaitanya, B., Karpurapu, R. (2023). Dynamic response of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 51 (2), p. 356–370.

Chen, A., Cheng, F., Wu, D., Tang, X. (2019). Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction. *Journal of Vibroengineering*, 21 (5), p. 1342–1352.

Evirgen, B., Tatsuoka, F., Ishihara, K. (2017). Seismic performance of geosynthetic-reinforced soil structures. *Geosynthetics International*, 24 (5), p. 493–509.

Hatami, K., Bathurst, R. J. (2005). Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (4), p. 1066–1085.

Mafia, G. A. (2020). *Estudo da distribuição dos reforços em muros portantes de solos reforçados com geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 112 p.

Malekmohammadi, K., Damians, I. P. (2024). A bibliometric review of reinforced soil wall research topics. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10 (42), p. 1–16.

Massarsch, K. R. (2002). Effects of vibratory compaction. In: International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-la-Neuve. *Keynote Lecture*, p. 33–42.

Mirmoradi, S. H., Ehrlich, M. (2018). Numerical simulation of compaction-induced stress for the analysis of RS walls under working conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (3), p. 354–365.

Terefe, T. O, Tefera, G. A. (2019). Design of impact stone cruscher machine. International Journal of Scientific & Engineering Research, 10 (5), p. 904-909.

Wills, B. A., Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. 8th ed. Oxford, OX, UK, 498 p.

Yamashita, A. S., Thivierge, A., Euzébio, T. A. M. (2021). A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, 170 (107036), p. 1–17.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/35

Ensaios de Tração em Geogrelhas Produzidas em Impressora 3D com Garrafas PET Recicladas Visando Aplicação em Obras de Pequeno Porte

Julia Ferreira Duarte
Graduanda, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, julia.ferreiraduarte14@gmail.com

Juliana Keiko Tsugawa
Prof. Doutora, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campinas, Brasil, juliana.tsugawa@mackenzie.br

RESUMO: Geogrelhas são amplamente utilizadas como reforço em geotecniage devido à sua eficiência. A impressão 3D apresenta potencial para sua fabricação em pequena escala, sob demanda e com diferentes geometrias. Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico à tração, foram produzidas geogrelhas de PET em impressora 3D (K1 Max da Creality). Ensaios de tração (NBR 10319) foram realizados na Instron 34TM-10-SA, com velocidade de deformação de 20 mm/min, para 12 geogrelhas: 3 baseadas no modelo Tensar SS20 em PET virgem e 9 baseadas no modelo Huesker 200T (5 em PET virgem e 4 em PET reciclado). A resistência à tração das geogrelhas baseadas na Tensar variou entre 5,35 e 8,96 kN/m, cerca de 27% a 45% do valor usado como referência (20 kN/m). Para as geogrelhas baseadas na Huesker em PET virgem apresentaram resistência entre 15,90 e 18,54 kN/m, enquanto as em PET reciclado variaram entre 2,71 e 7,65 kN/m, equivalendo a aproximadamente 85% a 93% e 14% a 38%, respectivamente, do valor de referência. Conclui-se que a impressão 3D apresenta potencial técnico preliminar para aplicações de pequena escala e sob menores solicitações. Entretanto, as amostras produzidas com PET virgem apresentaram resistência à tração superior à das amostras produzidas com PET reciclado.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelha, Impressão 3D, Ensaio de Tração, Garrafas PET, Reciclagem.

ABSTRACT: Geogrids are widely used as reinforcement elements in geotechnical engineering due to their efficiency. Three-dimensional printing shows potential for their small-scale, on-demand manufacture with different geometries. To evaluate their tensile mechanical behavior, PET geogrids were produced using a Creality K1 Max 3D printer. Tensile tests were conducted in accordance with NBR 10319 using an Instron 34TM-10-SA universal testing machine at a displacement rate of 20 mm/min. A total of 12 geogrids were tested: three based on the Tensar SS20 model and manufactured from virgin PET, and nine based on the Huesker 200T model, of which five were manufactured from virgin PET and four from recycled PET. The tensile strength of the Tensar-based geogrids ranged from 5.35 to 8.96 kN/m, corresponding to approximately 27% to 45% of the reference value of 20 kN/m. The Huesker-based geogrids manufactured from virgin PET exhibited tensile strengths ranging from 15.90 to 18.54 kN/m, whereas those manufactured from recycled PET ranged from 2.71 to 7.65 kN/m. These values corresponded to approximately 85% to 93% and 14% to 38%, respectively, of the reference value. It was concluded that 3D printing shows preliminary technical potential for small-scale applications subjected to lower loads. However, the specimens manufactured from virgin PET exhibited higher tensile strength than those manufactured from recycled PET.

KEYWORDS: Geogrids, 3D Printing, Tensile Test, PET Bottle, Recycling.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de geossintéticos vem se tornando cada vez mais frequente na engenharia geotécnica e ambiental, incluindo pavimentação, controle de erosão e estabilidade de taludes. As geogrelhas são empregadas principalmente com função de reforço e são produzidas com diferentes geometrias, dimensões, orientações, matérias-primas e processos de fabricação, de acordo com os requisitos de cada aplicação. Neste

sentido, a impressão 3D apresenta potencial para a produção de geogrelhas, pois permitiria uma maior customização de suas características e o ajuste de materiais e geometrias para atender requisitos específicos (HASHEMINEZHAD et al., 2025). A impressão 3D também permite fabricar geometrias complexas ou de difícil obtenção por outros métodos (TYLMAN, DZIERZEK, 2020). Assim, devido à sua versatilidade, a impressão 3D poderia facilitar a produção de geogrelhas em pequena escala, sob demanda e com geometrias diferentes, o que pode representar vantagens na aplicação em obras de pequeno porte.

A utilização de PET reciclado como matéria-prima é bastante relevante, evidenciada pelas 410 mil toneladas de PET pós-consumo recicladas no ano de 2024 (STATISTA, 2024). Apesar das dificuldades de manuseio e processamento desse material decorrentes da necessidade de diferentes etapas no processo de reciclagem antes de sua reutilização (GILENO, TURCI, 2021), bem como da degradação estrutural do polímero a cada ciclo de reprocessamento (FROUNCHI, 1999), o PET reciclado ainda apresenta grande potencial de reuso. Assim, novas alternativas de reutilização e reciclagem do PET podem contribuir para a redução de impactos ambientais, como a redução das emissões de CO_2 associadas à extração da matéria-prima (GILENO, TURCI, 2021; HASHEMINEZHAD et al., 2026; VICUÑA et al., 2024).

O uso de PET na produção de geogrelhas vem gradualmente ganhando espaço e geogrelhas de PET já são comercializadas como, por exemplo, a Fortrac T Eco da Huesker produzida em PET (Huesker, 2023). Estudos com geogrelhas fabricadas com PET reciclado e virgem também estão começando a ser desenvolvidos. No estudo de Hasheminezhad et al. (2025) foram produzidas e implementadas geogrelhas e outros geossintéticos de PET reciclado e PP reciclado. Os ensaios de tração das geogrelhas impressas em impressora 3D, usando PET 100% reciclado e produzidas em uma escala de 1:10, apresentaram resultados semelhantes às geogrelhas manufaturadas de fibras sintéticas virgem, quando considerado o efeito de escala, sendo os valores obtidos para geogrelhas biaxiais e monoaxiais de: 6,53 e 16,5 kN/m (PET reciclado) e 40 e 64 kN/m (PET virgem), respectivamente. Vicuña *et al.* (2024) apresentaram um estudo sobre o comportamento mecânico de *blends* de PEAD e PP reciclados utilizados na produção de geogrelhas, por meio de ensaios de tração e flexão. Foram exploradas diferentes composições PP/PEAD (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 e 100/0% em massa) e configurações de geogrelhas. Os resultados indicaram maior capacidade de deformação do PEAD reciclado puro (PP/PEAD 0/100), o qual apresentou deformação superior a 60% em comparação com as misturas PP/PEAD. Além disso, os autores ressaltam a importância da configuração dos fios e dos blends nas propriedades mecânicas e desempenho das geogrelhas, e apontam o potencial dos polímeros reciclados como uma solução viável para a produção deste material.

A possibilidade da adaptação das características como geometria, matéria-prima e dos modos de produção constituem uma oportunidade de avanço tecnológico e inovação para a produção de geogrelhas em pequena escala e sob demanda o que indica potencial para aplicações específicas em pequena escala e sob menores solicitações.

Assim, nesta pesquisa foram produzidas geogrelhas em impressora 3D baseadas em geogrelhas comerciais, Tensar SS20 e Huesker Fortrac T Eco 200T, utilizando-se filamentos de PET virgem e PET reciclado, com o objetivo de avaliar preliminarmente o comportamento mecânico à tração.

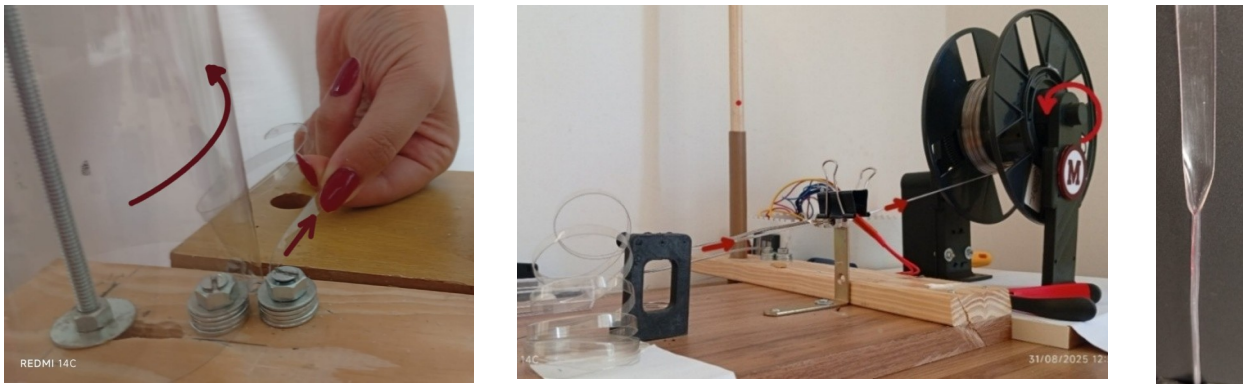
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a fabricação das geogrelhas em impressora 3D e posterior realização dos ensaios de tração, foi necessária a compra do filamento de PET virgem e a fabricação do filamento reciclado utilizando-se garrafas PET usadas.

2.1 Estações de reciclagem de garrafas PET para fabricação do filamento

Para a fabricação das geogrelhas por meio de impressão 3D, foram utilizados filamentos de PET virgem adquiridos em loja especializada (marca F3D) e filamentos produzidos a partir de garrafas PET pós-consumo (Sprite Lemon Fresh 1,5 L), manufaturada em uma estação de reciclagem desenvolvida nesta pesquisa.

A estação de reciclagem é composta por um filetador que transforma a garrafa em tiras (Figura 1a) e por um conjunto de extrusão que transforma as tiras em filamento de forma constante e padronizada (Figura 1b). O filetador funciona através de um mecanismo manual que, ao ser acionado, corta as garrafas em tiras uniformes e contínuas de 6 mm de largura (Figura 1a). Já a estação de extrusão é composta por um carretel motorizado que puxa as tiras em velocidade constante, fazendo-as atravessar um bico de aquecimento que eleva sua temperatura e as molda de forma uniforme em filamentos ocos com diâmetro de 2 mm (Figura 1c).



(a) (b) (c)

Figura 1. Estações de reciclagem: (a) filetador e, (b) estação de extrusão, (c) recorte do filamento oco.

2.2 Impressão 3D

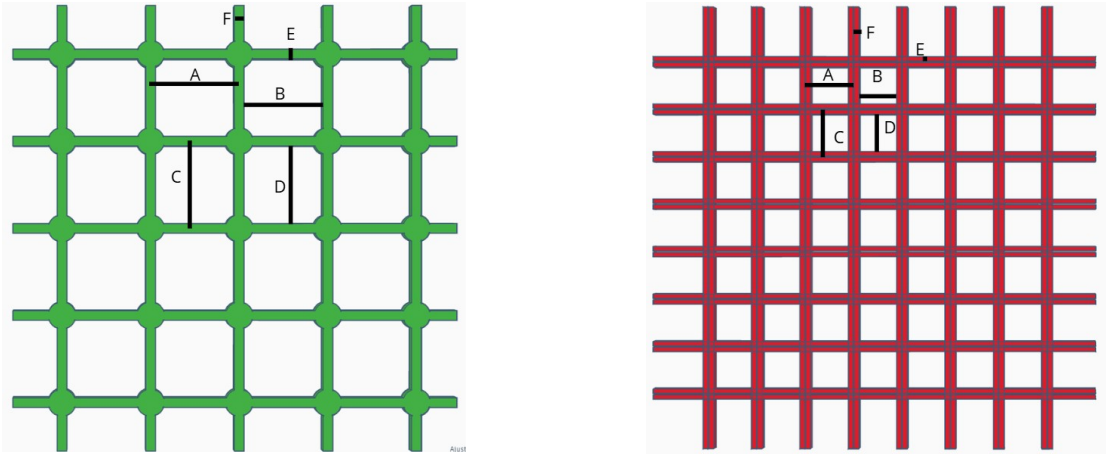
A impressora utilizada para a produção das geogrelhas foi a K1 Max da marca Creality, a qual apresenta dimensão de construção máxima de 30x30x30 cm e permite a impressão com diferentes tipos de polímeros. De forma a diminuir a possibilidade de causar danos à impressora e defeitos na estrutura do filamento, o que poderia comprometer a sua resistência, as configurações iniciais e ajustes da impressora foram redefinidas com base nas recomendações do fabricante e de Dzieezek (2020). Porém, modificações adicionais foram necessárias para a produção segura de geogrelhas de PET, tendo sido necessários muitos testes de desempenho e reconfigurações. Assim, foram realizadas modificações na configuração, como das temperaturas de extrusão e da cama aquecida, velocidade de extrusão, fluxo e modificações físicas (espessura do bico de extrusão, tipo de cola utilizada para fixação do filamento e modo de fixação da impressão na cama aquecida). Isso foi necessário para que se pudesse realizar uma boa impressão utilizando-se o filamento PET reciclado, considerando as diferenças de resistências, flexibilidade, viscosidades e temperatura de fusão entre os polímeros. Os detalhes das modificações realizadas serão descritos e analisados de forma mais detalhada em um artigo atualmente em elaboração.

2.3 Geogrelhas

Foram produzidos dois modelos de geogrelhas: um baseado no modelo Tensar SS20 (Figura 2a) e outro no modelo Huesker Fortrac T Eco 200T (Figura 2b). Ambos os modelos foram fabricados com resina de PET virgem, já o modelo Huesker foi também produzido em PET 100% reciclado produzido nas estações de reciclagem pelas autoras. Ao todo, foram produzidas 3 (três) unidades do modelo Tensar SS20 em PET virgem e, 9 (nove) unidades do modelo Huesker 200T, sendo 5 (cinco) de PET virgem e 4 (quatro) de PET reciclado. As características, como dimensões e resistência das geogrelhas segundo os fabricantes foram apresentadas na Tabela 1, juntamente com as características das geogrelhas produzidas nesta pesquisa.

As geogrelhas Tensar SS20 produzidas pelo fabricante são do tipo extrudadas e possuem eixo biaxial com medidas de espessura, largura e comprimento diferentes nos dois eixos. Já as geogrelhas produzidas neste trabalho foram modificadas, apresentando medidas de espessura, largura (E e F) e comprimento (A e C) iguais nos dois eixos. Outras modificações foram aplicadas às geogrelhas produzidas, devido às

limitações impostas pela impressora 3D como, por exemplo, a maior espessura no nó apresentada pela Tensar SS20 do fabricante, não foi executada na geogrelha produzida, em decorrência da necessidade de fabricação de suportes (durante a impressão 3D), o que causaria grande desperdício de material e muito retrabalho. As dimensões de espessura (2,0 mm) e largura das faixas E e F (4,9 mm) das geogrelhas produzidas foram modificadas do modelo do fabricante, porém, mantendo-se a mesma proporção existente, ou seja, considerando que a espessura da geogrelhas do fabricante de 1,2 mm é quase 2,5 vezes a largura da faixa (E) de 2,8 mm.



(a) (b)

Figura 2. Projeto tridimensional das geogrelhas: (a) baseada no modelo Tensar SS20 e (b) no modelo Huesker 200T

Tabela 1. Características das geogrelhas Tensar SS20 e Huesker 200T e das geogrelhas produzidas (Tensar, 2019; Huesker, 2023). A: Comprimento entre o eixo sentido longitudinal; B: Comprimento de abertura do eixo sentido; C: Comprimento entre o eixo sentido transversal; D: Comprimento de abertura sentido transversal; E: Largura das faixas sentido transversal e F: Largura das faixas sentido longitudinal.

Propriedades	Tensar SS20 (fabricante)	Modelo baseado na Tensar SS20 (produzida pelas autoras)	Huesker Fortrac 200T (fabricante)	Modelo baseado na Huesker 200T (produzida pelas autoras)
Matéria-Prima	PP	PET	PET	PET
A (mm)	39	50	30	30
B (mm)	36,2	35	23	23
C (mm)	39	50	30	30
D (mm)	36,7	35	23	23
E (mm)	2,8	4,9	-	3
F (mm)	2,3	4,9	-	2
Espessuras das faixas (mm)	1,6 - 1,2	2	-	2
Espessuras do nó (mm)	3,8	2	-	2
Resistência máxima à tração (kN/m)	20	-	20	-
Deformação na resistência nominal à tração (%)	10	-	10	-

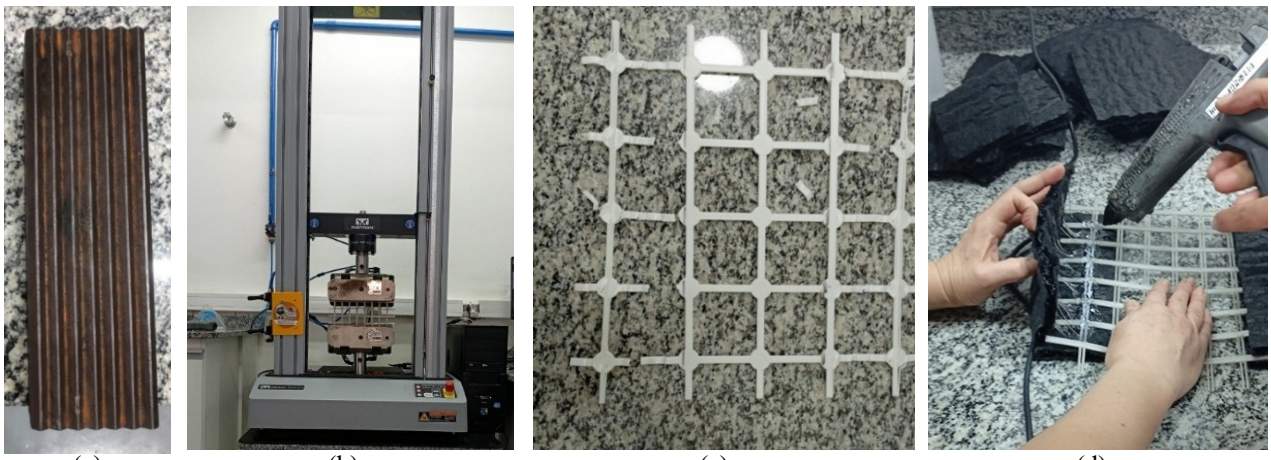
As geogrelhas Fortrac 200T da Huesker foram selecionadas por apresentarem melhor correspondência da matéria-prima (PET), porém, como houve alteração de material, geometria e processo de fabricação, a comparação com as geogrelhas Tensar e Huesker produzidas pelo fabricante foi usada como referência nominal, não como equivalência direta. As medidas das aberturas das geogrelhas produzidas com base na

Huesker Fortrac 200T foram mantidas iguais às dimensões da geogrelha do fabricante, ou seja, eixo biaxial com abertura de 23,0 mm por 23,0 mm (B e D). Porém, como algumas dimensões não foram descritas no catálogo da Huesker (2014), estas foram estimadas em função da abertura entre as faixas longitudinais e (B e D) disponibilizadas como, por exemplo, a espessura geral das faixas (estimada em 2 mm) e as dimensões das faixas transversais (E) estimada em 3 mm e das faixas longitudinais (F) estimada em 2 mm.

3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios foram realizados no Laboratório da Maccaferri Brasil, Jundiaí, São Paulo, no dia 11 de setembro de 2025. Ao todo, foram executados 12 ensaios de tração (3 geogrelhas baseadas no modelo Tensar SS20 e 9 geogrelhas baseadas no modelo Huesker 200T). Os ensaios de tração das geogrelhas seguiram as normas NBR ISO 9862 (ABNT, 2013) e NBR 10319 (ABNT, 2013), utilizando-se garras ranhuradas (Figura 3a) e o equipamento Instron 34TM-10-SA (Figura 3b).

A Instron 34TM-10-SA apresenta capacidade nominal de carga de 10 kN e erro de 1% ou 0,1 kN. A velocidade de deformação imposta durante o ensaio foi de 20 mm/min. As garras utilizadas nos ensaios foram desenvolvidas para ensaiar geossintéticos tecidos que são flexíveis e, portanto, se moldam adaptando-se contra as garras ranhuradas, oferecendo melhor aderência entre os materiais. Porém, como as geogrelhas ensaiadas são produtos mais rígidos, estas não conseguem se adaptar contra as garras. Assim, as garras ranhuradas foram inicialmente testadas diretamente em contato com uma geogrelha que apresentou uma falha generalizada no contato garra-geogrelha imediatamente após fixação, mesmo sem nenhuma carga ter sido aplicada ao ensaio (Figura 3c). Para contornar esse problema, foram utilizados geossintéticos maleáveis como suporte de fixação entre a garra e as geogrelhas. Assim, o geossintético maleável foi fixado à geogrelha com o auxílio de cola quente, o que evitou a ocorrência de rupturas no contato garra-geogrelha (Figura 3d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 3. (a) Garra ranhurada; (b) Instron 34TM-10-SA utilizada nos ensaios; (c) falha generalizada e (d) Aplicação de camadas de geossintéticos flexíveis nos dois lados da geogrelha para proteção contra as garras.

4 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de tração e as Figuras 4 e 5 os gráficos força versus deformação. Para a amostra 3, o equipamento falhou em registrar o gráfico.

As geogrelhas baseadas na Tensar SS20 fabricadas em PET virgem (amostras 1, 2 e 4) apresentaram resistência à tração variando entre 5,35 e 8,96 kN/m com média de 7,69 kN/m, ou seja, em média 38,5% da resistência do valor nominal declarado pelo fabricante de 20,00 kN/m. A deformação à tração na ruptura variou entre 3,27% e 4,17%, valores inferiores ao do fabricante de 10,00%. Assim, as geogrelhas modelo Tensar, fabricadas em PET virgem, apresentaram menor resistência e menor deformabilidade quando comparadas aos valores nominais de referência do produto comercial (Figura 4).

A resistência à tração das geogrelhas baseadas na Huesker 200T fabricadas em PET virgem (amostras 3, 5, 6, 7 e 8) variou entre 10,34 kN/m e 21,22 kN/m. A amostra 3 apresentou valor superior ao valor nominal de resistência informado pelo fabricante (20,00 kN/m) e as amostras 7 e 8 atingiram, respectivamente, 18,06 kN/m e 18,54 kN/m, ou seja, em média 91,5% do valor nominal de resistência informado pelo fabricante. A resistência à tração média obtida para a Huesker em PET virgem foi de 16,81 kN/m, considerando todas as amostras ensaiadas. A deformação na ruptura variou entre 6,21% e 12,24%, com média de 7,53% considerando todas as amostras ensaiadas, apesar de a média ser inferior ao valor nominal de deformação informado pelo fabricante (10,00%), a amostra 6 apresentou deformação superior. Assim, as geogrelhas baseadas no modelo Huesker fabricadas em PET virgem apresentaram maior rigidez em relação ao valor nominal de referência do produto comercial e sua resistência aproximou-se desse valor (Figura 5a). Interessante notar que a amostra 6 foi a que apresentou a menor resistência à tração e maior deformação na ruptura, caracterizando comportamento mais dúctil, porém, suportando metade do valor nominal informado pelo fabricante.

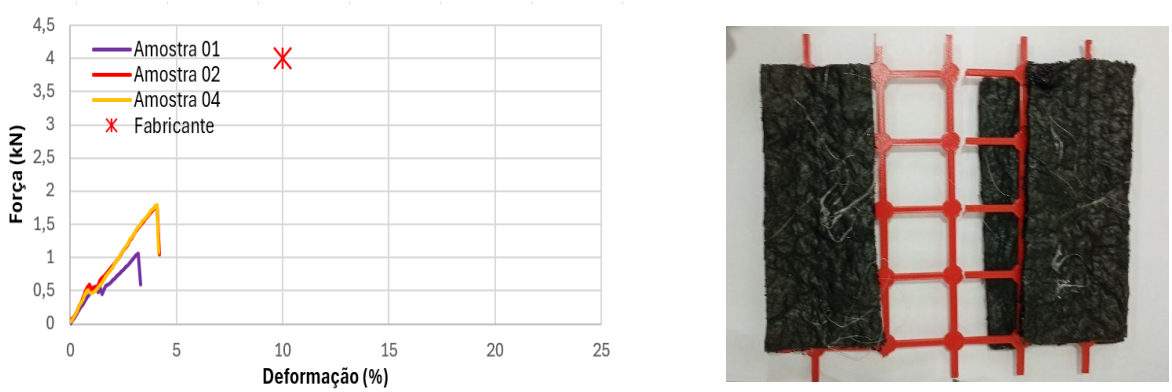
Tabela 2. Resultado do ensaio de tração das geogrelhas produzidas.

Ensaio	Modelo	Tipo de Filamento	Resistência à tração ou Força/largura (Tmáx) (kN/m)	Média Resistência à tração (kN/m)	Deformação à tração na Ruptura (%)	Média Deformação (%)	Rigidez Secante (j) (kN/m)	Média Rigidez Secante (kN/m)
1	Tensar	PET virgem	5,35	7,69	3,27	3,86	163,61	196,54
2	Tensar		8,75		4,17		209,83	
4	Tensar		8,96		4,14		216,18	
3	Huesker	PET virgem	21,22	16,81	6,59	7,53	321,7	248,4
5	Huesker		15,9		6,21		256,04	
6	Huesker		10,35		12,24		84,56	
7	Huesker		18,06		6,37		283,36	
8	Huesker		18,54		6,26		296,33	
9	Huesker	PET reciclado	7,65	4,94	4,05	3,33	188,89	143,06
10	Huesker		3,31		3,11		106,11	
11	Huesker		6,07		3,34		181,14	
12	Huesker		2,71		2,81		96,09	

As geogrelhas baseadas no modelo Huesker com PET reciclado (amostras 9, 10, 11 e 12) apresentaram uma resistência média de 4,94 kN/m e variação entre 2,71 kN/m e 7,65 kN/m, com deformação na ruptura variando entre 2,81% e 4,05% e média de 3,33%. Ambos os parâmetros ficaram abaixo dos valores nominais de referência informados pelo fabricante, indicando comportamento mais frágil e menor capacidade mecânica global (Figura 5b).

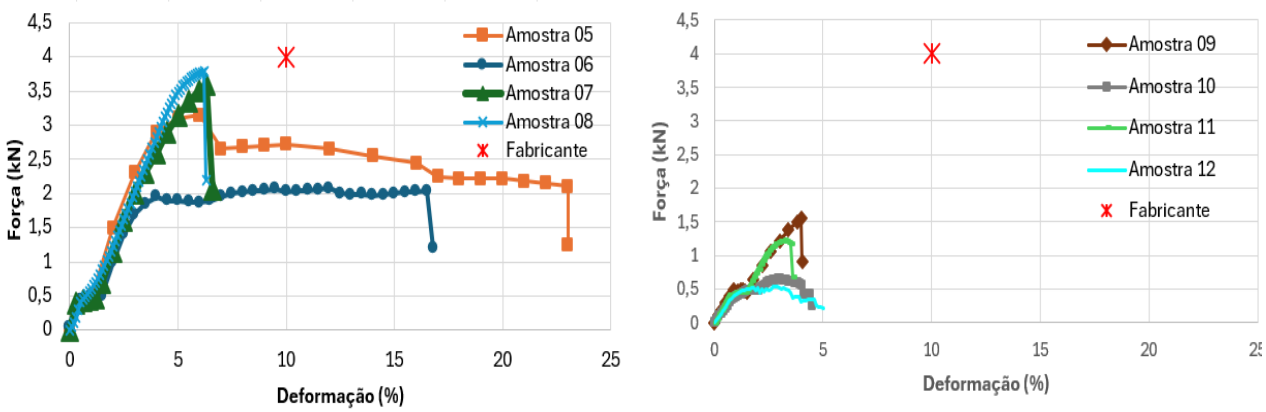
De modo geral, as geogrelhas produzidas com filamento reciclado apresentaram resistência média aproximadamente quatro vezes inferior àquelas de mesmo modelo com filamento PET virgem, 4,94 e 16,81 kN/m, respectivamente. Este resultado está de acordo com Hasheminezhad *et al.* (2025), que verificou que as resistências à tração das geogrelhas produzidas com PET reciclado são cerca de quatro vezes menores que a resistência das geogrelhas de PET virgem.

Com relação à rigidez secante, observou-se que as geogrelhas modelo Huesker em PET virgem são as mais rígidas (248,4 kN/m), seguido pelo modelo Tensar em PET virgem (196,5 kN/m) e pela Huesker em PET reciclado (143,0 kN/m). O resultado sugere que o modelo Huesker de PET reciclado se deforma mais quando submetido a uma mesma carga, portanto, tende a apresentar comportamento mais flexível e deformável.



(a) (b)

Figura 4. (a) Gráfico força (kN) versus deformação (%) para as geogrelhas modelo Tensar PET virgem e (b) geogrelha após ruptura frágil (Amostra 1-Tensar PET virgem)



(a) (b)

Figura 5. Gráfico força (kN) versus deformação (%) das geogrelhas modelo Huesker: (a) para PET virgem e (b) PET reciclado.

5 CONCLUSÃO

Diante do aumento anual da produção de plásticos, reforça-se a necessidade da adoção de alternativas para a utilização de resíduos pós-consumo. Assim, a utilização das garrafas PET como matéria-prima no processo de impressão 3D pode contribuir para a sustentabilidade na engenharia.

As variações nos resultados das geogrelhas de PET reciclado, provavelmente, são devidas à variabilidade inerente às qualidades dos materiais reciclados, à degradação natural do polímero com cada ciclo de processamento, entre outros. Entre os modelos de PET virgem, tais comportamentos podem estar associados à variabilidade das amostras produzidas e, provavelmente, ao processo de preparação das amostras de geogrelhas para o ensaio (ajuste geogrelha-garra, quantidade de cola, dimensão do geossintético de proteção às garras).

A aplicação de camadas de geossintéticos flexíveis utilizando cola quente, para a proteção no contato geogrelhas-garra, foi eficiente em evitar a ruptura no contato com geogrelha-garra. Para minimizar as variações nos resultados, recomenda-se que o geossintético flexível aplicado no contato geogrelhas-garra seja do mesmo tipo e lote, além disso, que sejam todos cortados exatamente nas mesmas dimensões e uma mesma quantidade de cola seja aplicada para sua fixação.

As geogrelhas apresentam diferentes configurações e níveis de resistência, por serem desenvolvidas para atender diferentes aplicações. Com a modificação dos modelos utilizados (Tensar SS20 e Huesker

200T) para um modelo de produção aditivo (impressão 3D), e a utilização de PET virgem e reciclado, foi observado no ensaio que as geogrelhas produzidas não alcançaram as resistências mínimas dos fabricantes (20 kN/m), apesar das geogrelhas do modelo Huesker em PET virgem terem atingido valores de resistência bastante próximos (média de 16,81 kN/m). De forma geral, o modelo de geogrelhas baseado na Huesker 200T apresentou maiores resistências à tração que o modelo baseado na Tensar SS20. A resistência das geogrelhas de PET reciclado atingiu apenas 25% da resistência das geogrelhas de PET virgem.

Uma das possibilidades para a viabilização das geogrelhas de PET reciclado seria o aumento da qualidade do filamento reciclado, além disso, a modificação do modelo 3D das geogrelhas, com o aumento das dimensões das faixas das geogrelhas, poderia aumentar o desempenho.

Conclui-se que a reciclagem de garrafas PET em geogrelhas representa uma forma de transformar esse resíduo em uma solução geotécnica, porém, estudos adicionais são necessários. Por outro lado, foi observado melhor desempenho das geogrelhas de PET virgem, com potencial para a aplicação em obras de pequeno porte com menores solicitações. Além disso, são recomendados estudos complementares, como os realizados por Vicuña et al. (2024), envolvendo a análise de diferentes configurações geométricas, com o objetivo de otimizar as propriedades das geogrelhas produzidas com materiais reciclados e ampliar sua aplicabilidade.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Maccaferri Brasil pela disponibilização do laboratório e aos engenheiros Jaime Duran, Jorge Silva e Júlia Fernandes Approbato, que proporcionaram a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2013). NBR – 9862. *Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios.*

Associação Brasileira De Normas Técnica (2013). NBR – 10319. *Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga.*

GILENO, A., TURCI, L. R. (2021) Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. Cleaner Environmental Systems, v. 3, p. 100057, 2021

HASHEMINEZHAD, A et al. (2025) Evaluation of 3D-printed model geogrids and composite geosynthetics made from recycled plastics: Bridging laboratory insights with field performance. *Construction and Building Materials*, v. 465, p. 140258, 2025.

HASHEMINEZHAD, A et al. (2026) Field performance of recycled and virgin plastic composite geosynthetics in gravel roads: Moisture mitigation and structural benefits. *Transportation Geotechnics*, v 56, p 101841, 2026

HUESKER. (2014) *Fortrac Geosynthetics: Fortrac T and R-T Geogrids*. Versão 3, Gescher, Germany, 2014.

HUESKER. *Product Overview Geosynthetics*. Gescher, Germany, 2023

STATISTA. *Market Volume of Polyethylene Terephthalate Worldwide from 2015 to 2022, with a Forecast for 2023 to 2030*. 2024. Disponível em: < https://www.statista.com/ statistics/1245264/polyethylene-terephthalate-market-volume-worldwide/./>. Acesso em: 27 abril 2025.

TENSAR. (2019) *Tensar SS Geogrids Product Specifications*. Blackburn, Reino Unido, 2019

TYLMAN, I., DZIEEŻEK, K. (2020) Filament for a 3D Printer from Pet Bottles Simple Machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 9, No. 10, Oct. 2020

VICUÑA, L. et al. (2024) Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization—A Case Study. *Polymers*, 2024, 16, 1151.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/36

Estabilidade Interna de Muros de Solo Fino Reforçado com Geogrelhas: Análise Numérica (PLAXIS) e Comparação com Métodos Analíticos

Alan Rizzato Espessato
Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá-PR, Brasil, arepessato@uem.br

Nelcí Helena Maia Gutierrez
Docente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá-PR, Brasil, nhmgutierrez@uem.br

Daniel Hideyuki Saito
Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá-PR, Brasil, danielhs.95@gmail.com

RESUMO: Este trabalho avalia a estabilidade interna de um muro de solo reforçado com geogrelhas e aterro em solo fino, tomando como estudo de caso uma seção típica da obra de rebaixamento da linha férrea em Maringá-PR. As análises numéricas foram realizadas pelo método dos elementos finitos no *software* PLAXIS 2D, incluindo a simulação do processo construtivo e o efeito da compactação. Os parâmetros dos materiais foram definidos a partir do projeto executivo, catálogos técnicos dos fabricantes, levantamentos *in loco* e ensaios de laboratório. Os valores de tração máxima mobilizada nos reforços (Tmax) obtidos no modelo numérico foram comparados com as previsões dos métodos analíticos de Ehrlich e Mitchell (1994), Bathurst et al. (2008) (*K-stiffness*) e Ehrlich e Mirmoradi (2016). Observou-se melhor concordância do MEF com Ehrlich e Mitchell (1994) nas camadas superiores, com diferenças mais pronunciadas próximas à fundação. O *K-stiffness* tendeu a subestimar as trações, enquanto Ehrlich e Mirmoradi (2016) mostrou-se mais conservador quando a coesão tem papel relevante.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos Elementos Finitos (MEF), Tração máxima mobilizada (Tmax), Condições de trabalho

ABSTRACT: This study evaluates the internal stability of a geogrid-reinforced soil wall constructed with a fine-grained backfill, using as a case study a representative section of the railway underpass project in Maringá, Paraná State, Brazil. Numerical analyses were performed with the finite element method in PLAXIS 2D, including staged construction and the effect of compaction. Material parameters were defined based on the design documents, manufacturers' technical datasheets, in situ investigations, and laboratory testing. The maximum tensile load mobilized in the reinforcements (Tmax) obtained from the numerical model was compared with the predictions from the analytical methods proposed by Ehrlich and Mitchell (1994), Bathurst et al. (2008) (K-stiffness), and Ehrlich and Mirmoradi (2016). The finite element results showed better agreement with Ehrlich and Mitchell (1994) for the upper reinforcement layers, whereas larger discrepancies were observed near the foundation. The K-stiffness method tended to underestimate reinforcement tensile loads, while Ehrlich and Mirmoradi (2016) was more conservative when cohesion plays a relevant role.

KEYWORDS: Finite Element Method (FEM), Maximum mobilized tensile load (Tmax), Working stress conditions

1 INTRODUÇÃO

Os muros de solo reforçado (MSR) constituem um sistema de contenção amplamente empregado em todo o mundo, em razão do baixo custo unitário, rapidez de execução, boa capacidade de acomodar deformações e benefícios associados à sustentabilidade (Falah e Muteb, 2024; Miyata, 2025; Santos, Yoo e Portelinha, 2025).

O desempenho global dessas estruturas é fortemente condicionado pela seleção do material de aterro, uma vez que as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo influenciam diretamente a estabilidade, a deformabilidade e a mobilização de esforços nos reforços (Dhanya e Divya, 2025). Tradicionalmente, aterros granulares são preferidos devido à sua maior capacidade de drenagem, enquanto a utilização de solos finos é, em muitos casos, desestimulada por recomendações técnicas. Como exemplo, diretrizes como as da *Federal Highway Administration* (FHWA) indicam que o teor de finos em materiais de aterro não deve exceder 15% (Berg, Christopher e Samtani, 2009).

Entretanto, especialmente em regiões tropicais, a escassez de materiais granulares tem estimulado a adoção de solos localmente disponíveis, frequentemente finos, como alternativa tecnicamente viável e economicamente atrativa (Nunes *et al.*, 2022; Dhanya e Divya, 2025). Nesse cenário, torna-se particularmente relevante avaliar como as condições de aterro com solos finos se refletem na mobilização de esforços nos reforços e nas verificações de estabilidade interna, especialmente no que se refere à estimativa da tração máxima mobilizada.

Do ponto de vista de projeto, a análise da estabilidade interna é um aspecto fundamental nas estruturas em solo reforçado, por envolver mecanismos de ruptura associados ao sistema de reforço (Berg, Christopher e Samtani, 2009; AASHTO, 2020). Em geral, essa verificação contempla, principalmente, a ruptura por tração do reforço e o arrancamento do reforço, sendo a determinação da tração máxima mobilizada no reforço (Tmax) um parâmetro central para as verificações de segurança (Ehrlich e Mirmoradi, 2016). A ABNT NBR 16920-1 (ABNT, 2021) reconhece distintas filosofias para o dimensionamento de MSR, incluindo métodos de equilíbrio limite, métodos sob condição de trabalho e a modelagem numérica explícita do maciço reforçado. Contudo, diversos estudos indicam que procedimentos baseados em equilíbrio limite tendem a superestimar as forças de tração nos reforços, ao passo que abordagens sob condição de trabalho e modelagens numéricas tendem a representar melhor o comportamento do conjunto e conduzir a estimativas mais realistas para a mobilização de esforços (Hatami e Bathurst, 2005; Allen e Bathurst, 2018).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade interna, em termos de tração máxima mobilizada nos reforços, de uma seção típica de muro de solo reforçado utilizada como contenção na obra de rebaixamento da linha férrea no município de Maringá-PR. As análises numéricas foram conduzidas pelo método dos elementos finitos, com auxílio do *software* PLAXIS, considerando o processo construtivo e o efeito da compactação. Os resultados obtidos foram comparados com previsões de métodos analíticos propostos por Ehrlich e Mitchell (1994), Bathurst et al. (2008) e Ehrlich e Mirmoradi (2016).

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rebaixamento da linha férrea em Maringá-PR foi executado no âmbito do projeto de revitalização urbana da região denominada “Novo Centro”. A intervenção teve extensão aproximada de 6 km e, em trechos específicos, demandou a implantação de trincheiras para compatibilizar o cruzamento, anteriormente em nível, do tráfego rodoviário local com a passagem do trem. Para a contenção dessas trincheiras, foram executados muros de solo reforçado com geogrelhas, com face em blocos segmentais de concreto intertravados.

A obra foi subdividida em segmento oeste (entre a Rua Ver. Arlindo Planas e a Av. Paraná) e segmento leste (entre as Avenidas Pedro Taques e Tuiuti). Como estudo de caso, foi selecionada uma seção executada no segmento leste, situada entre as estacas 1000 e 1024 do Projeto Executivo (trecho entre a Av. Pedro Taques e a Av. Monlevade). A Figura 1 ilustra a região onde a seção de referência foi definida. A seção selecionada possui altura livre de aproximadamente 9,0 m, face constituída por blocos segmentais de concreto intertravados e, na zona reforçada, utiliza solo local como material de aterro e geogrelhas de poliéster (PET) como elementos de reforço.



(a) (b)

Figura 1. (a) Vista aérea do segmento leste; (b) Local da seção transversal selecionada para o estudo.

A escolha dessa seção deve-se ao fato de representar uma configuração típica da obra e por dispor das informações de projeto e parâmetros de materiais necessários à modelagem numérica e às análises comparativas propostas neste estudo.

2.1 Caracterização geotécnica

Para a caracterização do solo local, foram realizadas três sondagens de simples reconhecimento com SPT e profundidade de 24 m. O perfil geotécnico identificado apresentou variação nítida quanto à coloração, às características e ao comportamento, permitindo seu agrupamento em duas unidades principais:

- Solo laterítico (solo de cobertura – Latossolo Vermelho Distroférrico): apresenta espessura aproximada de 9,0 m, textura argilosa e coloração marrom-avermelhada. Trata-se de um material poroso, bem drenado e pedologicamente evoluído, com baixo teor de minerais primários. A fração argila é constituída predominantemente por caulinita e óxidos de ferro e alumínio. Os índices de resistência à penetração (N_{SPT}) variam entre 2 e 10, com consistência classificada de muito mole a média.
- Solo residual e saprolítico: ocorre a partir de aproximadamente 9,0 m de profundidade, sendo oriundo da alteração in situ do material de origem, com forte influência da mineralogia da rocha-mãe (basalto) e diferentes estágios de evolução. Apresenta textura argila siltosa e ampla diversidade de cores, associada à presença de minerais primários em diferentes graus de alteração. Os valores de N_{SPT} são bastante variáveis (9 a >30), com consistência variando de média a dura.

Durante a execução do rebaixamento da linha férrea, foram realizados ensaios de caracterização e resistência no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Assim, parte desses resultados, disponíveis no banco de dados da instituição, foi utilizada na caracterização do solo empregada neste estudo. Foram coletadas amostras indeformadas em dois pontos do talude, correspondentes ao solo natural: a Amostra A, obtida na profundidade média de 5,0 m, e a Amostra B, obtida na profundidade média de 9,0 m. Adicionalmente, foi coletada uma amostra indeformada do solo do aterro compactado, denominada Amostra C.

A Tabela 1 apresenta as principais características geotécnicas das amostras, determinadas a partir de ensaios laboratoriais e de correlações empregadas no estudo. Os ensaios de cisalhamento direto realizados nas condições de umidade natural e inundada evidenciaram que o intercepto de coesão é sensível ao estado de umidade, com redução significativa quando inundado, indicando que a "coesão" mobilizada pode representar, em parte, coesão aparente suscetível a dimiuição do valor por umedecimento. Assim, adotou-se uma análise paramétrica variando a coesão (c=0, 10, 40 e 80 kPa), mantendo-se constantes os demais parâmetros, com o objetivo de avaliar a sensibilidade das previsões de Tmax e o grau de concordância entre as metodologias analíticas e o MEF sob diferentes valores de coesão.

Tabela 1. Características geotécnicas das amostras do perfil de solo evoluído.

Descrição	**Amostra A Prof. 5 m**	**Amostra B Prof. 9 m**	**Amostra C Compactado**
Massa específica dos sólidos - ρ_s (g/cm^3)	3,08	3,11	-
Massa específica natural - ρ (g/cm^3)	1,426	1,500	1,75
Teor de umidade natural – w (%)	29,8	29,3	29,7
Massa específica seca - ρ_d (g/cm^3)	1,098	1,160	1,349
Fração passante na peneira N.200(#0,075 mm) -%	96	95	-
Fração argila (%)	67	64	-
Fração silte (%)	22	18	-
Fração areia (%)	11	18	-
Limite de Liquidez – LL (%)	54	57	-
Limite de Plasticidade – LP (%)	37	39	-
Índice de Plasticidade – IP (%)	17	18	-
Índice de vazios – e	1,807	1,686	-
Porosidade – n (%)	64,3	62,7	-
Grau de Saturação – Sr (%)	51,0	54,4	-

2.2 Modelagem Numérica da Seção Típica

Para a análise numérica do muro em solo reforçado, utilizou-se o *software* PLAXIS®, cuja formulação é baseada no método dos elementos finitos (MEF). A estrutura foi simulada em estado plano de deformação, adotando-se elementos triangulares de 15 nós. A malha foi gerada com refinamento padrão fino, totalizando 2006 elementos, com dimensão média aproximada de 0,51 m por elemento. A Figura 2 apresenta o modelo numérico da seção típica empregado nas análises.

Nas extremidades laterais, impuseram-se restrições aos deslocamentos horizontais, enquanto na base do modelo foram restringidos os deslocamentos horizontais e verticais. As fronteiras do modelo foram posicionadas a uma distância considerada suficiente para evitar a influência das condições de contorno na resposta tensão–deformação do maciço de solo reforçado.

A seção típica foi pré-dimensionada conforme recomendações da AASHTO (2020). O modelo apresenta altura livre de 9,0 m, face com inclinação vertical e paramento constituído por blocos segmentais de concreto intertravados. Na zona reforçada, foram consideradas 15 camadas de geogrelhas, com espaçamento vertical de 0,60 m e comprimento de 6,3 m, resultando em Lr/H = 0,7. Adicionalmente, representou-se o embutimento da face do muro com profundidade de 0,60 m, correspondente a três blocos de concreto (Figura 2).

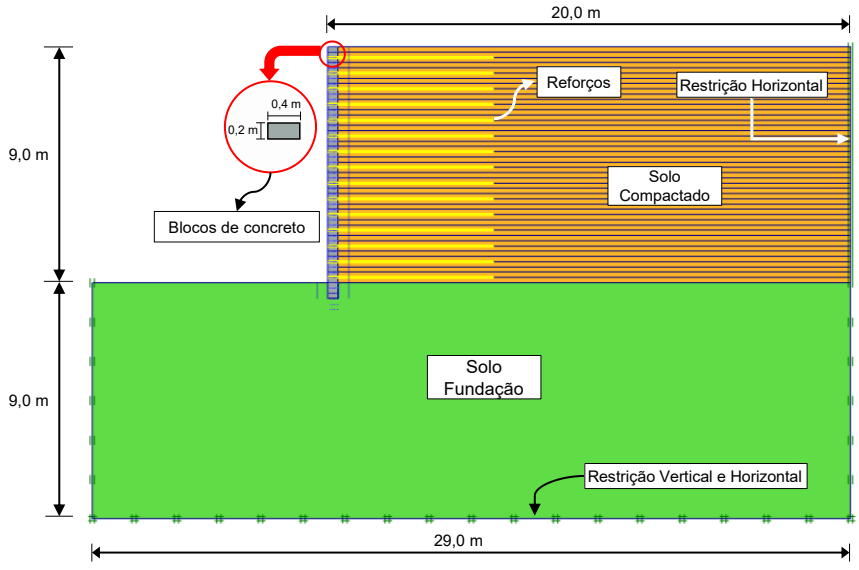


Figura 2. Seção típica do rebaixamento da linha férrea e materiais utilizados.

A definição dos parâmetros adotados considerou informações do projeto executivo do muro, catálogos técnicos dos fabricantes, levantamentos e estudos in loco, bem como resultados de ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Para representar o comportamento tensão–deformação do solo do aterro compactado, foi selecionado o modelo constitutivo *Hardening Soil*, por permitir uma representação mais realista da rigidez não linear e de sua dependência do nível de tensões. O solo de fundação foi simulado por meio do modelo constitutivo Mohr–Coulomb. Os valores do módulo de deformabilidade dos solos foram estimados a partir de ensaios edométricos realizados com amostras do solo evoluído da região do Novo Centro, tanto na condição natural quanto na condição compactada. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para representar os materiais.

Tabela 2. Parâmetros de entrada no modelo numérico da seção padrão.

Propriedade	**Valor**	**Propriedade**	**Valor**
Solo Compactado		**Geogrelha**	
Modelo	*Hardening Soil*	Rigidez axial, J_r, (EA) (kN/m)	700
Âng. de atrito, φ', (º)	32	**Blocos**	
Coesão, *c'*, (kPa)	0; 10; 40; 80	Modelo	Elástico linear
Ângulo de dilatação, ψ, (º)	0	Dimensões, (m × m)	0,40 m × 0,20 m
Peso específico, γ, (kN/m³)	17,5	Peso específico, γ, (kN/m³)	21,8
E_{50}^{ref}, (kPa)	20.000	Módulo de rigidez (kPa)	5×10^6
E_{ur}^{ref}, (kPa)	60.000	Coeficiente de Poisson, υ	0,15
Fator de potência, m	0,60	**Solo Fundação**	
Razão de ruptura, R_f	0,90	Modelo	*Mohr-Coulomb*
Coeficiente de Poisson, ν	0,30	Âng. de atrito, φ, (º)	26
P_{ref} (kPa)	100	Coesão, c, (kPa)	30
Interface bloco-bloco		Ângulo de dilatação, ψ, (º)	0
Ângulo de atrito, φ, (º)	57	Peso específico, γ, (kN/m³)	15,0
Coesão, c, (kPa)	46	E_{ref}, (kPa)	45.000
		Coeficiente de Poisson, ν	0,30

Como material de reforço, foram utilizadas geogrelhas de poliéster (PET) da linha Fortrac® T, com malha de abertura 25 mm × 25 mm. As geogrelhas foram representadas no PLAXIS por meio do elemento *geogrid*, com comportamento elástico linear, assumindo-se aderência perfeita no contato solo–geogrelhas (Jewell, 1980; Dyer e Milligan, 1984). A face em blocos de concreto foi simulada adotando-se um modelo elástico linear, sendo os parâmetros de entrada definidos com base em Riccio, Ehrlich e Dias (2014).

Para representar o contato entre os materiais, foram consideradas duas tipologias de interface: interfaces horizontais (bloco–bloco) e interfaces verticais (solo–bloco). Para a interface solo–bloco, utilizaram-se propriedades compatíveis com as do solo adjacente, de modo semelhante ao procedimento adotado por Guler, Hamderi e Demirkan (2007). Os parâmetros atribuídos às interfaces bloco-bloco foram baseados em valores determinados experimentalmente por Hatami e Bathurst (2005).

O processo construtivo foi simulado pelo alteamento em camadas com altura de 0,20 m (equivalente a 1 bloco), e o efeito da compactação foi incorporado conforme o procedimento "Tipo 2" descrito por Mirmoradi e Ehrlich (2014). A tensão induzida pela compactação adotada na simulação foi de 81,78 kPa, valor indicado no memorial de cálculo do rebaixamento da linha férrea.

3 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS NUMÉRICOS E OS MÉTODOS ANALÍTICOS

Os métodos analíticos selecionados para esta análise foram os de Ehrlich e Mitchell (1994), Ehrlich e Mirmoradi (2016) e Bathurst et al. (2008) (método *K-Stiffness*). Considerando as particularidades de cada procedimento teórico, realizou-se um estudo paramétrico com o objetivo de verificar o grau de concordância entre as previsões analíticas e os resultados obtidos por simulação numérica (MEF).

A Figura 3 apresenta os resultados adimensionais da distribuição da tração máxima mobilizada (T_{max}) ao longo das camadas de geogrelha em função da profundidade normalizada (z/H), obtidos pelo MEF e pelos

métodos analíticos. Nesta etapa, foram avaliados diferentes valores de coesão, mantendo-se constantes os demais parâmetros dos materiais conforme a seção típica. Adicionalmente, são comparados os resultados com e sem a consideração do efeito da compactação, tanto no modelo numérico quanto nos cálculos analíticos.

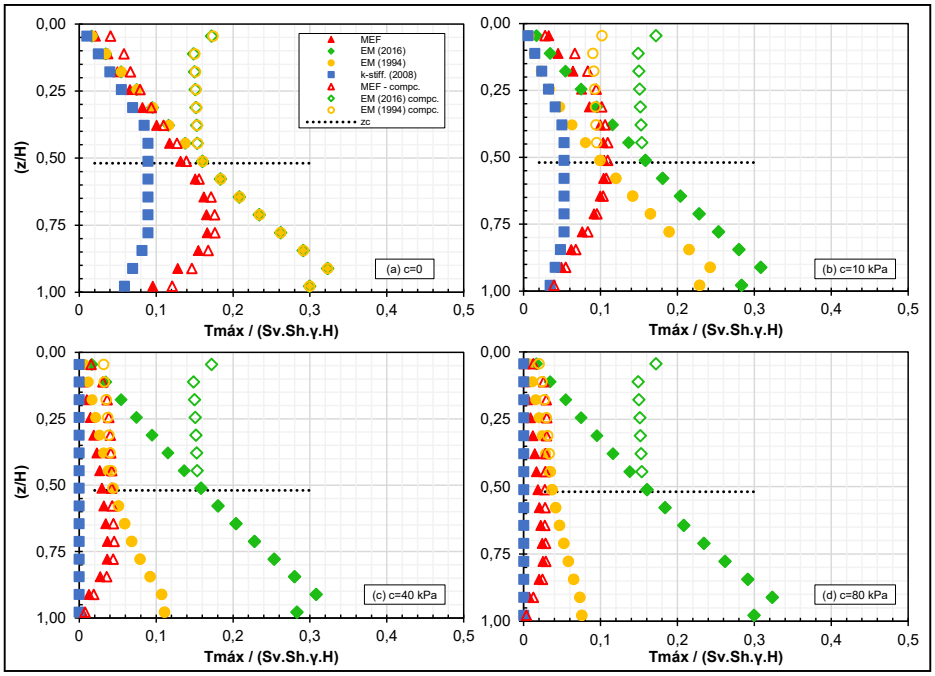


Figura 3. Comparativo de distribuição de tração nas geogrelhas em função da profundidade normalizada (z/H): (a) c=0; (b) c=10 kPa; (c) c=40 kPa; (d) c=80 kPa

Para o caso de coesão nula (c = 0), observou-se que os métodos Ehrlich e Mitchell (1994) e Ehrlich e Mirmoradi (2016) conduzem a previsões muito próximas. Esse resultado está de acordo com Ehrlich e Mirmoradi (2016), que indicaram, a partir de estudos paramétricos, que quando a coesão é desprezada as diferenças na previsão de Tmax entre o método original e o método simplificado tendem a ser reduzidas (inferiores a 5%).

Entretanto, à medida que a coesão aumenta, passam a surgir discrepâncias, uma vez que, no procedimento simplificado de Ehrlich e Mirmoradi (2016), a coesão não é considerada no dimensionamento. Nesse cenário, as previsões de Ehrlich e Mitchell (1994) apresentaram boa concordância com as simulações numéricas, sobretudo nas camadas mais próximas ao topo do muro (acima da profundidade de influência da compactação, Zc). As maiores diferenças concentraram-se nas camadas próximas à base, o que pode ser atribuído, em parte, à maior influência das restrições de deslocamento no pé do muro, que afeta a resposta tensão–deformação local e, consequentemente, a mobilização de tração nos reforços.

Por outro lado, para o método de Ehrlich e Mirmoradi (2016), verificou-se que o aumento da coesão levou a uma tendência de superestimação das trações mobilizadas nas geogrelhas quando comparadas aos resultados do MEF. Esse comportamento é consistente com a formulação do método, uma vez que o procedimento simplificado não incorpora explicitamente a contribuição da coesão, o que pode resultar em previsões mais conservadoras para solos coesivos.

Em relação ao método *K-Stiffness* (Bathurst et al., 2008), de forma geral, observou-se uma previsão de tração inferior à obtida na simulação numérica, sendo a discrepância ainda mais pronunciada com o aumento da coesão. Para valores elevados de coesão (c = 40 kPa e c = 80 kPa), o procedimento conduziu a valores negativos de tração nos reforços. Do ponto de vista físico, esse resultado indicaria ausência de solicitação dos reforços, sugerindo que o muro poderia permanecer estável mesmo sem geogrelhas. Por essa razão, e por não haver interpretação física para tração negativa em geogrelhas, adotou-se tração nula nessas situações.

A Figura 4 sintetiza, por meio dos somatórios de tração mobilizada nos reforços, a influência da coesão nas previsões das metodologias analíticas e do modelo numérico, incluindo a comparação entre simulações com e sem o efeito da compactação.

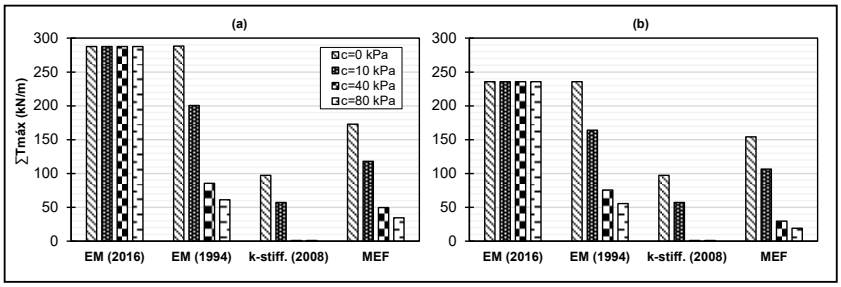


Figura 4. Somatório de tração máxima nas geogrelhas: (a) Com compactação; (b) Sem compactação

A Figura 4 mostra que, para a metodologia de Ehrlich e Mirmoradi (2016), os valores mobilizados de tração permanecem constantes com a variação da coesão, uma vez que esse parâmetro não é considerado no procedimento. Já os somatórios de tração estimados pelo método de Ehrlich e Mitchell (1994) são, em geral, superiores aos obtidos nas simulações numéricas. Essas diferenças estão associadas principalmente à forma de distribuição de tração nas camadas próximas à base da estrutura, conforme evidenciado na Figura 3.

Para o método *K-stiffness*, os somatórios de tração foram inferiores aos obtidos no MEF e, para valores elevados de coesão, a metodologia conduz a resultados que indicariam, teoricamente, ausência de solicitação das geogrelhas. Adicionalmente, observa-se que os somatórios de tração pelo *K-stiffness* são idênticos com ou sem a consideração da compactação, o que se explica pelo fato de que esse efeito não é incorporado explicitamente na formulação do método.

De forma complementar à comparação das trações máximas mobilizadas, avaliou-se a deformação específica equivalente mobilizada nos reforços a partir da relação ($\varepsilon = T_{máx}/EA$), considerando a rigidez axial (EA = 700 kN/m) adotada para a geogrelha no modelo numérico. Para os métodos analíticos, essa deformação deve ser interpretada como uma estimativa equivalente associada à tração prevista, enquanto, no MEF, representa a resposta compatível com a rigidez do elemento de reforço. Observou-se que as maiores deformações ocorreram para o caso de coesão nula (c = 0), atingindo aproximadamente 4,4% para os métodos de Ehrlich e Mitchell (1994) e Ehrlich e Mirmoradi (2016). Para uma pequena coesão (c = 10 kPa), a deformação máxima estimada reduziu para cerca de 3,5% pelo método de Ehrlich e Mitchell (1994). Nas demais análises, as deformações mobilizadas nas camadas de reforço foram inferiores a 3%, indicando níveis compatíveis com desempenho satisfatório em condição de trabalho. Esse resultado é coerente com Bathurst et al. (2008), que, ao analisarem uma base de dados de muros de solo reforçado com geossintéticos, observaram que estruturas com bom desempenho apresentaram deformações nos reforços tipicamente inferiores a 3% ao final da construção.

A redução das deformações equivalentes com a introdução de uma pequena parcela de coesão evidencia a sensibilidade da resposta dos reforços à resistência mobilizada do aterro. Em solos finos tropicais sob condição não saturada, a sucção matricial pode contribuir para o desenvolvimento de uma parcela de coesão aparente, ainda que variável e dependente das condições de umidade. Essa contribuição aumenta a resistência ao cisalhamento do solo e reduz a transferência de esforços para as geogrelhas, resultando em menores trações e deformações mobilizadas nos reforços. Esse comportamento é compatível com observações de campo em muros instrumentados com solos finos tropicais, nos quais as forças de tração medidas foram, em geral, inferiores às previstas por métodos teóricos, em razão da contribuição da coesão aparente associada às condições não saturadas do aterro (Riccio, Ehrlich e Dias, 2014; Moratori, 2015).

4 CONCLUSÃO

Com base na seção típica do muro de solo reforçado executado no rebaixamento da linha férrea em Maringá-PR, este trabalho comparou as previsões de tração máxima mobilizada nos reforços (Tmax) obtidas por modelagem numérica (MEF) e por métodos analíticos de uso corrente (Ehrlich e Mitchell, 1994; Ehrlich e Mirmoradi, 2016; Bathurst et al., 2008), avaliando também o papel da coesão e da compactação no nível de solicitação das geogrelhas. Os resultados mostraram que, para coesão nula, os métodos de Ehrlich e Mitchell (1994) e Ehrlich e Mirmoradi (2016) são próximos. Com o aumento da coesão, o método simplificado tende a superestimar as trações por não considerar esse parâmetro. O método de Ehrlich e Mitchell (1994) apresentou resultados mais próximos ao MEF, sobretudo nas camadas superiores, enquanto o *K-Stiffness* tendeu a

subestimar as trações, possivelmente por não considera de forma explícita o efeito da compactação. A análise da deformação específica equivalente dos reforços indicou desempenho compatível com a condição de trabalho, com valores inferiores a 3% na maior parte dos casos avaliados. As exceções ocorreram para as menores coesões analisadas, com deformações máximas de aproximadamente 4,4% para (c = 0) e 3,5% para (c = 10 kPa). Esses resultados evidenciam que mesmo pequenas parcelas de coesão aparente podem reduzir a mobilização de trações e deformações nas geogrelhas, ressaltando a importância de sua representação em solos finos sujeitos a variações de umidade. Como desdobramentos futuros, recomenda-se avaliar cenários de umedecimento e secagem, bem como incorporar dados de monitoramento para refinar a representação da compactação e das condições de contorno, principalmente nas camadas próximas à fundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (2020). AASHTO. *LRFD, Bridge Design Specifications*. 9th edition. Washington, D.C..

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-1. *Muros e taludes em solos reforçados. Parte 1: Solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.

Allen, T. M., Bathurst, R. J. (2018). Application of the simplified stiffness method to design of reinforced soil walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144 (5), 04018024.

Bathurst, R. J., Miyata, Y., Nernheim, A., Allen, A. M. (2008). Refinement of K-stiffness method for geosynthetic-reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 15 (4), 269-295.

Berg, R. R., Christopher, B. R., Samtani, N. C. (2009). *Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute.

Dhanya, K. A., Divya, P. V. (2025). Hydro-mechanical behaviour of composite-geosynthetic-reinforced soil walls with marginal lateritic backfills through instrumented model tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 53 (1), 474-495.

Dyer, M. R.; Milligan, G. E. (1984). A photoelastic investigation of the interaction of a cohesionless soil with reinforcement placed at different orientations. In: *Renforcement en place des sols et des roches. Colloque international*.. p. 257-262.

Ehrlich, M., Mirmoradi, S. H. (2016). A simplified working stress design method for reinforced soil walls. *Géotechnique*, 66(10), 854-863.

Ehrlich, M., Mitchell, J. K. (1994). Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of geotechnical engineering*, 120 (4), 625-645.

Falah, M. W., Muteb, H. H. (2024) Evaluation of mechanically stabilized earth retaining walls for different soil–structure interaction methods: A review. *Open Engineering*, 14 (1), 20220535.

Guler, E., Hamderi, M., Demirkan, M. M. (2007). Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills. *Geosynthetics International*, 14 (6), 330-345.

Hatami, K., Bathurst, R. J. (2005). Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (4), 1066-1085.

Jewell, Richard Auchnleck. (1980). *Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils*. Tese (Doutorado). Cambridge Univ.

Mirmoradi, S. H., Ehrlich, M. (2014). Modeling of the compaction-induced stresses in numerical analyses of GRS walls. *International Journal of Computational Methods*, 11 (2), 1342002.

Miyata, Y. (2025). Geosynthetic MSE walls research and practice: past, present, and future (2023 IGS Bathurst Lecture). *Geosynthetics International*, 32 (1), 62-81.

Moratori, J. (2015) *Monitoração de um Muro de Solo Reforçado com Geogrelhas.* Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Nunes, G. B., Portelinha, F. H. M., Futai, M. M.,Yoo, C. (2022). Numerical study of the impact of climate conditions on stability of geocomposite and geogrid reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 50 (4), 807-824.

Riccio, M., Ehrlich, M., Dias, D. (2014). Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (2), 127-138.

Santos, M. C., Yoo, C., Portelinha, F. H. M. (2025). Influence of rainfall and drying periods on the performance of a large-scale segmental GRS wall model built with poorly draining local soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 53 (4), 847-866.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/37

Estado da Arte de Geossintéticos Biodegradáveis de Juta em Aplicações Geotécnicas

Thais Menezes Santana
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, São Paulo, Brasil, thaisms@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, São Paulo, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Os geossintéticos considerados biodegradáveis são aqueles compostos por matérias-primas que se decompõem naturalmente no contexto em que estão inseridos. Entre os diversos compostos biodegradáveis disponíveis, destaca-se a juta, que é uma fibra têxtil de origem vegetal, natural e orgânica. Este artigo tem como objetivo apresentar as principais aplicações dos geossintéticos de juta, tais como reforço, reabilitação de pavimentos, drenagem, filtração e controle de erosão, além de reunir resultados de ensaios laboratoriais, estudos de campo e avaliação dos parâmetros de resistência, durabilidade e tratamentos químicos disponíveis na literatura relacionados ao tema, considerando as bases Scopus e ScienceDirect. Observa-se uma predominante utilização de geossintéticos biodegradáveis compostos de juta na Índia, onde se concentra a maioria das pesquisas sobre a temática, justificada pela expressiva produção e utilização de juta para aplicações diversas. Conclui-se que o uso de geossintéticos biodegradáveis constitui uma alternativa promissora para a redução do consumo de matérias-primas não renováveis em obras geotécnicas, com ressalvas em aplicações que demandam uma longa vida útil. No contexto brasileiro, o emprego dessas soluções proporcionaria vantagens ambientais e econômicas, algo que infelizmente ainda é incipiente.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras Naturais, Geotêxteis, Sustentabilidade.

ABSTRACT: Biodegradable geosynthetics are those made from raw materials that naturally decompose in the environment in which they are placed. Among the various biodegradable materials available, jute stands out as a natural and organic plant-based textile fiber. This article aims to present the main applications of jute geosynthetics, such as reinforcement, pavement rehabilitation, drainage, filtration and erosion control, as well as to compile results from laboratory tests, field studies, and evaluations of strength parameters, durability, and chemical treatments available in literature, considering the Scopus and ScienceDirect databases. There is a predominant use of biodegradable geosynthetics made from jute in India, where most of the research on the topic is concentrated, justified by the significant production and use of jute for various applications. It is concluded that the use of biodegradable geosynthetics represents a promising alternative for reducing the consumption of non-renewable raw materials in geotechnical works, with caveats for applications that require a long service life. In the brazilian context, the use of these solutions would offer environmental and economic advantages, although their adoption is unfortunately still incipient.

KEYWORDS: Natural Fibers, Geotextiles, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de geossintéticos em obras geotécnicas vêm ganhando destaque nas soluções de engenharia. Por serem materiais manufaturados, possuem maior controle tecnológico em comparação às alternativas que dispõem somente do solo, permitindo a substituição de matérias-primas escassas no entorno da obra e a otimização do espaço, por permitirem desempenhar com excelência as funções designadas, como separação, drenagem, filtração, controle de erosão, reforço e barreira (Palmeira, 2018).

Outra vantagem pertinente para as soluções com geossintéticos em detrimento às alternativas convencionais, é a redução da emissão de gases poluentes como o CO_2, considerando toda a cadeia produtiva (Palmeira, 2018). Porém, é relevante afirmar que a matéria-prima responsável pela fabricação de grande parte dos geossintéticos são polímeros como polietileno (PE) e polipropileno (PP), todos correspondendo a subprodutos do petróleo, recurso não renovável e com longo prazo de degradação no meio ambiente.

Com o aumento das discussões sobre as mudanças climáticas e a procura por alternativas mais sustentáveis, a utilização de geossintéticos biodegradáveis produzidos por fibras naturais para aplicações temporárias torna-se propícia no contexto atual. Entre as principais fibras disponíveis, destaca-se a juta (Figura 1), que possui propriedades compatíveis com as requisitadas em algumas aplicações de geossintéticos.

Apesar de pouco explorada pela maioria dos países, salienta-se sua importância na Índia, que além de deter um grande mercado da fibra para inúmeras utilidades (Barua, 2025), possui uma ampla parcela da contribuição científica no quesito emprego de juta para aplicações geotécnicas (Mandal, 1987; Kaniraj e Rao, 1994; Datta, 2009). Outro país que apresenta bons esforços para o desenvolvimento da técnica é Bangladesh (Kabir *et al*., 1989; Islam *et al*., 2023). Apesar de não ser tão expressivo como as nações mencionadas, há fabricação de juta no Brasil (Barua, 2025). Porém, não possui a prática de utilizar a fibra como alternativa sustentável de matéria-prima para geossintéticos.

(a) (b)





(c) (d)





Figura 1. Juta: (a) planta da qual é extraída a fibra de juta (*Corchorus capsularis*) (The Ferns, 2026), (b) fibra (Sebastain e Divya, 2024), (c) tecido (Siqueira, 2026) e (d) geotêxtil tecido (Mukherjee *et al*., 2025).

Dessa forma, esse artigo tem como objetivo apresentar uma síntese do estado da arte dos geossintéticos biodegradáveis de juta para aplicações geotécnicas, como reforço de aterros e reabilitação de pavimentos, controle de erosão, filtração, drenagem e aceleração do adensamento em camadas de solo mole. Para entender melhor as vantagens e limitações da juta para as aplicações mencionadas, são apresentadas suas principais características e tratamentos empregados para amenizar propriedades desfavoráveis.

2 CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTOS

Para que os geossintéticos biodegradáveis de juta possam substituir geossintéticos convencionais em aplicações temporárias, é necessário que durante o período de solicitação, suas características atendam às requisitadas. Para condições de reforço, o material necessita ser resistente aos esforços de tração, ao passo que aplicações de drenagem e filtração, os parâmetros de permeabilidade são fundamentais.

Na realização de aplicações eficientes desses materiais em obras geotécnicas, é fundamental conhecer sua constituição e quais parâmetros eles influenciam. Kumar, Kandasami e Singh (2022) sintetizaram um conjunto de pesquisas acerca do tema, desenvolvendo um resumo detalhado sobre a relação entre os componentes das fibras de juta e suas propriedades. As fibras naturais são formadas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, sendo que a juta é predominantemente formada de celulose, relativa parcela de hemicelulose e pequena porção de lignina, ditando seu comportamento (Kumar, Kandasami e Singh, 2022). Por ser rica em celulose e relativamente em hemicelulose, as fibras de juta possuem propriedade hidrofílica.

Além disso, a presença desses mesmos componentes fornece alta resistência à tração e rigidez à fibra, em condições secas. Já a lignina fornece às fibras naturais maior resistência à biodegradação e um comportamento hidrofóbico. Dessa forma, a juta exibe facilidade em absorver e reter água, característica que além de diminuir sua resistência, é prejudicial para aplicações hidráulicas. Em relação à sua característica biodegradável, a juta apresenta menor resistência ao ataque microbiano, se comparado com outras fibras naturais que possuem elevada porcentagem de lignina, como a fibra de coco (Kumar, Kandasami e Singh, 2022).

Para combater comportamentos prejudiciais em determinadas aplicações geotécnicas, existem tratamentos que podem ser aplicados às fibras naturais, como a juta, possibilitando melhor desempenho. Kumar, Kandasami e Singh (2022) sintetizaram os principais tratamentos utilizados, alguns deles expostos na Tabela 1. Com as diversas alternativas disponíveis, é possível desenvolver geossintéticos biodegradáveis de juta com melhores parâmetros, sendo assim compatíveis com as aplicações geotécnicas desejadas.

Tabela 1. Principais tratamentos físicos e químicos aplicáveis a fibras naturais em geral.

Tratamento	Descrição	Resultado	Referências
Fervura da fibra	Fervura com temperatura entre 75-100 °C por 0,5-2 horas em pressão atmosférica	Reduz a capacidade de absorção de água das fibras	Bui *et al*. (2020)
Tratamento alcalino	Imersão das fibras em soluções alcalinas	Aumento da rugosidade e interação entre as fibras e o entorno	Gu (2009)
Enxerto de copolimerização	Modificações químicas nas fibras	Melhora resistência à tração, estabilidade térmica e redução da absorção de água	Thakur *et al*. (2015)
Acetilação	Modificação química com anidrido acético ($C_6H_6O_3$)	Reduz a afinidade à água	Bledzki *et al*. (2008)

Fonte: Adaptado de Kumar, Kandasami e Singh (2022).

3 APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Os geossintéticos biodegradáveis de juta podem substituir os convencionais constituídos de polímeros se forem analisadas as seguintes condições: identificação dos seus parâmetros iniciais de projeto e conciliação entre o tempo de degradação desse material e o período requisitado da aplicação, ao passo que o geossintético composto de juta irá se degradar e diminuir seus parâmetros iniciais. Diversas pesquisas provenientes de países como Índia e Bangladesh já submeteram esses materiais a ensaios laboratoriais com objetivo de obter os parâmetros geotécnicos de interesse, realizando simulações laboratoriais de aplicações práticas, como também buscam discussões técnicas sobre obras já executadas com o emprego de geossintéticos biodegradáveis de juta.

A utilização de juta como geossintético é uma prática consolidada há décadas na Índia (Mandal, 1987; Kaniraj e Rao, 1994). Com o decorrer dos anos, estudos de caso de aplicações de juta em obras geotécnicas foram desenvolvidos, como apresentado por Datta (2009), trazendo exemplos práticos de obras de controle de erosão e reforço de pavimento. Com o aprofundamento contínuo dessa temática, os tópicos a seguir detalham as principais aplicações geotécnicas desses materiais e os resultados obtidos.

3.1 Aplicações Hidráulicas

O emprego de geossintéticos biodegradáveis de juta como acelerador do adensamento de camadas de solo mole, através do encurtamento do caminho preferencial da água, é uma aplicação viável para esse tipo de material, por ser uma atividade temporária. Chattopadhyay e Chakravarty (2009) realizaram ensaios de adensamento em amostras com e sem geotêxtil de juta. Os autores chegaram à conclusão de que o geotêxtil em estudo acelerava o recalque ao atuar simultaneamente como dreno e filtro. A alta transmissividade da juta permite o escoamento no plano do geotêxtil, comportando-se como dreno, enquanto há a formação de uma zona de alta permeabilidade entre a interface de solo-geotêxtil, em virtude da filtração. Dessa forma, há a otimização da dissipação da poropressão, contribuindo para a aceleração do adensamento e consequente

aumento na velocidade de recalque. Além disso, desenvolveram uma formulação para o cálculo da rede de geodrenos verticais e horizontais com uso de geotêxteis de juta, determinando o espaçamento entre eles. Chattopadhyay e Chakravarty (2009) também destacam a existência dos tratamentos contra degradação desses materiais, aumentando a vida útil do geotêxtil, caso necessário para o dimensionamento.

No que se refere à aplicação de geotêxteis como camadas filtrantes, é fundamental ensaios para aferir compatibilidade do solo com o material a ser filtrado. Dessa forma, para haver o funcionamento do filtro, os critérios de permeabilidade, filtro e entupimento devem ser verificados (Palmeira, 2018).

Mukherjee *et al*. (2025) realizaram ensaios laboratoriais com quatro amostras de geotêxtil tecido e não-tecido de juta, com e sem aplicação de betume, como camadas filtrantes de uma areia mal graduada. Os autores comentam que geotêxteis de juta não são populares para condições filtrantes e drenantes, em virtude do seu comportamento biodegradável. Apesar disso, Sarsby (2007) comenta que o fluxo de partículas até o geotêxtil cria uma camada filtrante natural, o que previne o carreamento de partículas finas, tornando indiferente, para alguns casos, a presença do geossintético a longo prazo. Em complemento, é possível a realização de tratamentos, como aplicação de betume, permitindo prolongar a vida útil desse material, possibilitando seu uso em alguns contextos (Mukherjee *et al*., 2025). Porém, segundo Mukherjee *et al*. (2025), o tratamento mencionado diminui as propriedades hidráulicas dos geotêxteis, como também ocasiona impactos ambientais negativos, como aumento da emissão de carbono e contaminação, pontos que devem ser levados em consideração, uma vez que o fator principal da utilização de geossintéticos de juta é seu caráter sustentável.

Prambauer *et al*. (2019) destacam que a característica hidrofílica de algumas fibras naturais, como da juta, pode prejudicar as funções drenante e de filtração, em virtude da redução dos poros do material pela absorção de água. Porém, novamente, vale ressaltar a existência de tratamentos que diminuem esse comportamento, como a fervura (Bui *et al*., 2020), acetilação (Bledzki *et al*., 2008) e enxerto de copolimerização (Thakur *et al*., 2015), melhorando o desempenho desses materiais em aplicações hidráulicas.

Uma alternativa promissora é a utilização de geossintéticos de juta em conjunto com outras fibras naturais, possibilitando o proveito dos aspectos positivos de ambas. Na pesquisa desenvolvida por Lee *et al.* (1994), um geodreno composto por juta e fibra de coco foi estudado, com o objetivo de ser empregue na aceleração do adensamento de camadas de argila mole. No decorrer do trabalho, foram realizados ensaios para verificar a capacidade do geodreno de garantir os requisitos de permeabilidade e filtração para uma determinada argila, obtendo resultados satisfatórios. Outra constatação relevante refere-se à resistência do conjunto, sendo proveniente majoritariamente da juta (Lee *et al*., 1994). Por fim, os autores apresentaram exemplos de obras com emprego dos geodrenos de juta e coco, apontando bons resultados.

3.2 Aplicações de Reforço de Solo e Reabilitação de Pavimentos

Os geossintéticos podem desempenhar a função de reforço em diversas aplicações geotécnicas. Para os geossintéticos biodegradáveis, a maioria das pesquisas relatam sua utilização em reabilitação de pavimentos. Kumar, Kandasami e Singh (2022) destacam um grande potencial da juta nessa aplicação, em comparação às outras fibras naturais, como o coco. Isso se deve às suas características mecânicas, como resistência à tração.

No caso da restauração de pavimentos, a inserção de geossintético entre a camada asfáltica antiga e a nova é uma boa solução para diminuir a propagação de trincas existentes. Kumar e Saride (2018) ensaiaram quatro tipos diferentes de geossintéticos, sendo um deles um geotêxtil tecido de juta. Os corpos de prova, compostos por uma camada antiga, geossintético e uma camada nova, foram colados por uma resida de epóxi em uma placa metálica, a qual recebeu esforços de tração. Para simular as rachaduras no pavimento asfáltico antigo, uma fenda de 6 mm foi inserida abaixo da antiga camada. Através de resultados de tensão x deslocamento e por imagens tratadas computacionalmente, algumas observações foram: os corpos de prova com geossintético apresentaram redução na variação da rigidez, com o geossintético absorvendo as tensões, diminuindo a propagação das rachaduras. Foi verificado também que as rachaduras se propagaram paralelamente ao reforço, aumentando a deformação horizontal do conjunto. Apesar de apresentar o menor resultado entre os avaliados, o geotêxtil de juta se mostrou eficaz para essa aplicação (Kumar e Saride, 2018).

Os mesmos autores, em outra pesquisa, avaliaram o comportamento dos espécimes, também contendo corpos de prova com geotêxtil tecido de juta, por meio de ensaios de fadiga por flexão, cisalhamento direto na interface do geossintético e ensaios de adesão entre a pintura de ligação e o geossintético (Saride e Kumar, 2017). Os resultados observados para o geotêxtil de juta também foram inferiores aos demais geossintéticos

testados. Entretanto, apresentam melhorias caso comparado à situação sem reforço. Uma observação pertinente feita por Saride e Kumar (2017) é o maior volume de Binder necessário para a pintura de ligação ao se utilizar o geotêxtil de juta, em virtude da propriedade de absorção desse material.

Sudarsanan, Karpurapu e Amrithalingam (2018) também avaliaram a inserção de geotêxtil tecido de juta entre as camadas asfálticas antigas e novas do pavimento. Porém, o foco da pesquisa era avaliar a adesão entre as duas camadas, propriedade importante para combater a delaminação ocorrente nesse tipo de solução pelo aumento da deformação horizontal do conjunto. Esse fenômeno também pode ser verificado nas pesquisas de Kumar e Saride (2018) e Saride e Kumar (2017), embora tenha sido registrado como uma observação complementar. A partir dos resultados apresentados pelos autores, em relação ao fenômeno da delaminação, a restauração de pavimento antigo sem geotêxtil apresenta melhores resultados. Essa constatação parte do princípio de que será a adesão entre geotêxtil e o agregado que irá governar o mecanismo de aderência. Entre os três geotêxteis estudados, o composto de juta apresentou o segundo melhor resultado, fornecendo melhor aderência que a fibra de coco (Sudarsanan, Karpurapu e Amrithalingam, 2018).

Para garantir a eficácia do sistema de restauração de pavimento mencionado, é necessário assegurar uma boa interação entre a camada asfáltica e geossintético, evitando fenômenos como descolamento e deslizamento (Sudarsanan *et al*., 2018). Para isso, Sudarsanan *et al*. (2018) realizaram uma série de ensaios com geotêxteis tecido e não tecido constituídos de fibras de juta e coco, verificando a resistência à tração, retenção de asfalto e efeitos da temperatura da mistura no geotêxtil, seguindo normativas para estabelecer os limites mínimos necessários para a realização de restauração de pavimento já existente. Sudarsanan *et al*. (2018) observaram que o geotêxtil tecido de juta atende aos requisitos estabelecidos pelas diretrizes da AASHTO M288 (2015) e ASTM D7239 (2013) para propriedades de resistência ao agarre e tração em tiras. Porém, o geotêxtil não tecido de juta registrou resistências mecânicas de 60% a 78% abaixo dos limites mínimos normativos.

Também no âmbito dos geotêxteis de juta para pavimentação, a pesquisa desenvolvida por Ghosh *et al*. (2015) apresenta como inovação um material composto por geotêxteis tecido e não tecido de juta, impregnados com betume, introduzidos entre a camada antiga e nova do pavimento. O processo experimental se inicia com a fabricação dos geotêxteis, selecionando as fibras de juta de forma coerente com as práticas comuns de mercado. Ao realizarem os ensaios de fadiga por flexão e simulação de tráfego com 20.000 cargas cíclicas, Ghosh *et al*. (2015) constataram que a presença da juta aumenta a vida útil do pavimento.

Para além da pavimentação, outro emprego notável dos geossintéticos biodegradáveis de juta são os reforços de aterros sobre solos moles, pois com o desenvolvimento do adensamento, a camada de solo mole ganha resistência, descartando a necessidade do reforço, que será degradado pelo meio ambiente (Sarsby, 2007). Sob outra perspectiva de aplicação de juta em obras sobre solos moles, Pandey, Rajesh e Chandra (2021) estudaram a utilização de geotêxteis de juta para encamisamento de colunas de areia drenante, com o objetivo de diminuir o fenômeno da deformação radial excessiva que essas estruturas sofrem ao serem inseridas em solos muito moles. Os autores comentam que ao evitar esse processo, menos esforços são transferidos para a camada de argila mole, diminuindo o excesso de poropressão gerada. Visto que a demanda por drenagem das camadas de areia encamisadas é temporária, a utilização de geotêxtil de juta, material que possui alta resistência inicial à tração, é uma alternativa promissora.

Validando o ganho de resistência que os geossintéticos de juta atribuem ao solo, Azhar *et al*. (2025) avaliaram a resistência ao cisalhamento de amostras de areia reforçadas com geotêxtil de juta, realizaram ensaios de compressão triaxial UU, variando as tensões confinantes em 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Ao analisar os resultados alcançados por Azhar *et al*. (2025), a inserção do geotêxtil de juta melhora o comportamento mecânico devido ao aumento da coesão aparente do solo, causado pela interação dos grãos de areia com o geotêxtil. Além disso, essa interação transfere esforços de tração ao geotêxtil, aumentando a tensão desviadora necessária para o rompimento dos corpos de prova.

3.3 Aplicações de Controle de Erosão

A utilização de materiais biodegradáveis para aplicações de proteção contra erosão é uma alternativa plausível de solução temporária, amenizando a erosão em taludes até o período de crescimento da vegetação, responsável pela proteção à longo prazo (Koerner, 2005). Ghosh, Bhattacharyya e Mondal (2017) destacaram as vantagens em utilizar geotêxtil de juta nesse tipo de aplicação, como redução da velocidade de escoamento superficial, garantia do crescimento de vegetação entre as aberturas do material e melhor absorção da água.

Porém, é importante assegurar que o geossintético de juta permaneça com as condições mínimas especificadas até o crescimento da vegetação. Para isso, Midha, Kumar e Sharma (2014) avaliaram o comportamento de geossintéticos de juta tratados com transesterificação, tratamento químico que muda as propriedades da fibra, tornando-a hidrofóbica e, consequentemente, melhorando a durabilidade (Saha *et al*., 2012). Midha, Kumar e Sharma (2014) realizaram ensaios laboratoriais, simulando a incidência de chuvas intensas em um talude protegido por geossintético de juta, comparando o material tratado quimicamente com a fibra sem tratamento. Além disso, verificaram a germinação da vegetação nas duas condições e, posteriormente, avaliaram a degradação por meio salino, com variação do pH. Os autores chegaram à conclusão que, além de garantir melhor controle da erosão por redução da rigidez e aumento da região coberta, os elementos de proteção de juta tratados mantiveram 72% da sua resistência após 120 dias em solução salina, enquanto as amostras não tratadas, em mesmas condições, resultaram em somente 19% da sua resistência (Midha, Kumar e Sharma, 2014). Sob a perspectiva geotécnica, a aplicação desse tratamento químico garante a integridade de toda a estrutura de controle de erosão em taludes e encostas, assegurando que o geossintético desempenhe sua função de proteção durante o período crítico de desenvolvimento das plantas.

Para além da proteção dos taludes, Marczak *et al*. (2020) avaliaram o aproveitamento da característica hidrofílica da juta, ao considerar a aplicação de geossintéticos como ferramentas de absorção de água, contribuindo com a gestão do abastecimento hídrico das plantas, favorecendo o crescimento da vegetação e, consequentemente, melhoria no controle de erosão. Sob a mesma perspectiva, Prasad *et al*. (2023) comentam que a capacidade de absorção dos geotêxteis de fibras naturais atua diretamente na redução do escoamento superficial, em virtude da absorção direta da água, pelo comportamento hidrofílico, redução da velocidade do fluxo superficial, pela rugosidade da superfície formada pelo geotêxtil de juta, e consequentemente, aumentando a parcela de infiltração, minimizando drasticamente os impactos de precipitações volumosas.

4 CONCLUSÕES

O emprego de geossintéticos de juta mostra-se uma alternativa viável para obras geotécnicas temporárias, uma vez que o processo de degradação da fibra pode acompanhar o período de solicitação desses materiais em obras provisórias. Esses materiais aliam desempenho mecânico ao apelo sustentável exigido pela engenharia atualmente. Ao aproveitar suas características positivas e superando suas vulnerabilidades naturais frente a ambientes agressivos através de tratamentos específicos, eles podem desempenhar as funções:

- hidráulicas, permitindo o escoamento da água de camadas de solo mole durante do processo de adensamento e atuando como elemento de drenagem. Os dados levantados demonstram que os geotêxteis de juta avaliados atendem de forma satisfatória aos parâmetros de permeabilidade e filtração. A transmissividade do material, com permeabilidade na ordem de 10^{-2} a 10^{-4} m/s, permite a dissipação da poropressão (Lee *et al*. 1994; Chattopadhayay e Chakravarty, 2009). Em relação à abertura aparente (AOS) para os geotêxteis estudados, seu valor oscila entre 0,17 mm e 0,39 mm, criando um filtro natural eficiente que permite a passagem da água, mas retém os finos do solo sem gerar colmatação prematura (Mukherjee *et al*., 2025);
- de reforço de solos e reabilitação de pavimentos. Em revestimentos asfálticos, a juta mitiga a propagação de fissuras do antigo pavimento ao suportar elevadas tensões de instalação e operação, apresentando resistência ao agarre superior a 1400 N (Sudarsanan *et al*., 2018). Da mesma forma, no reforço de aterros sobre solos moles, o material resiste a esforços de tração que evitam a ruptura, conferindo coesão aparente (Azhar *et al*., 2025). Dessa forma, é garantida a estabilidade mecânica temporária até o ganho de resistência das camadas de solo mole após o adensamento;
- controle de erosão, na proteção do talude até o desenvolvimento da vegetação e contribuir com a absorção de água, que auxilia no crescimento das plantas e controle do escoamento superficial.

As soluções discutidas neste trabalho evidenciam aplicações viáveis no contexto brasileiro, dado que o país possui extensas áreas com camadas de solo mole, uma vasta malha rodoviária e inúmeros taludes suscetíveis à erosão. Nesse sentido, o emprego de geossintéticos biodegradáveis de juta apresenta capacidade de aproveitamento no Brasil, seguindo o exemplo de países como Índia e Bangladesh.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela bolsa e pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2015) AASHTO M288: *Standard specification for geotextile specification for highway applications*. Washington, DC.

ASTM International (2013) ASTM D7239: *Standard specification for hybrid geosynthetic paving mat for highway applications*. West Conshohocken, PA.

Azhar, M., Ansari, M. I., Chaubey, A. K., Bhushan, M., Suman, S., Ahmad, S. (2025) Triaxial Analysis of Jute Geotextile Reinforced Sand. *Structural Integrity and Interactions of Materials in Civil Engineering Structures* (SIIMCES), p.199-206.

Barua, K. (2025) *Which Country is the Largest Producer of Jute in the World? List of Top 5 Countries*. Disponível em: <https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/largest-jute-producing-countries-in-the-world-1749409127-1>. Acesso em: 27 nov. 2025.

Bledzki, A. K., Mamun, A. A., Lucka-Gabor, M., Gutowski, V. S. (2008) The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites. *Express Polymer Letters*, Vol. 2, No. 6, p. 413-422.

Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Levacher, D. (2020) Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials. *Fibers*, Vol. 8, No. 6, p. 37.

Chattopadhyay, B. C., Chakravarty, S. (2009) Application of jute geotextiles as facilitator in drainage. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 27.

Datta, U. (2009) Application of Jute Geotextiles. *Journal of Natural Fibers*, Vol 4(3), p. 67-82.

Ghosh, S. K., Bhattacharyya, R., Mondal, M. M. (2017) Potential Applications of Open Weave Jute Geotextile (Soil Saver) in Meeting Geotechnical Difficulties. *3rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World* (ICNF), p. 21-23.

Ghosh, S. K., Bhattacharyya, R., Mondal, M. M., Sanyal, T. (2015) Development of an Innovative Betuminized Jute Paving Fabric (BJPF) Along with its Commercial Field Trials for Potential Application in the Field of Geotechnical Construction with an Eye Towards Global Concern. *Journal of Natural Fibers*, p. 457-480.

Gu, H. (2009) Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. *Materials & Design*, Vol. 30, No. 9, p. 3931-3934.

Islam, S., Islam, M. S., Elahi, T. E., Khan, A. J. (2023) Creep Response of Untreated and Additive Treated Jute Geotextiles in Isothermal Condition. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 41, p. 4095-4118.

Kabir, M. H., Zakaria, M., Abedin, M. Z., Saha, G. P. (1989) Jute Fabric Reinforced Unpaved Road Design. *Construction & Building Materials*, Vol. 3, No. 2.

Kaniraj, S. R., Rao, G. V. (1994) Trends in the Use of Geotextiles in India. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 13, p. 389-402.

Koerner, R. M. (2005*) Designing with geosynthetics*, 5th ed, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.

Kumar, N., Kandasami, R. K., Singh, S. (2022) Effective utilization of natural fibres (coir and jute) for sustainable low-volume rural road construction – A critical review. *Construction and Buildings Materials*, No. 347.

Kumar, V. V., Saride, S. (2018) Evaluation of cracking resistance potential of geosynthetic reinforced asphalt overlays using direct tensile strength test. *Construction and Building Materials*, No. 132, p. 37-47.

Lee, S. L., Karunaratne, G. P., Ramaswamy, S. D., Aziz, M. A., Das Gupta, N. C. (1994) Natural Geosynthetic Drain for Soil Improvement. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 13, p. 457-474.

Mandal, J. N. (1987) Geotextiles in India. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 6, p. 253-274.

Marczak, D., Lejcuś, K., Grzybowska-Pietras, J., Biniaś, W., Lejcuś, I., Misiewicz, J. (2020) Biodegradation of sustainable nonwovens used in water absorbing geocomposites supporting plants vegetation. *Sustainable Materials and Technologies*, No. 26.

Midha, V. K., Kumar, S. S., Sharma, A. (2014) Performance of transesterified jute rolled erosion-control products. *Geosynthetics International*, Vol. 21, No. 5, p. 301-309.

Mukherjee, S., Shivakumar, T., Kalore, S., Babu, G. L. (2025) Experimental and Probabilistic Analysis of Jute Geotextile Filters. *Indian Geotechnical Journal*.

Palmeira, E. M. (2018) *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*, 1ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

Pandey, B. K., Rajesh, S., Chandra, S. (2021) Performance enhancement of encased stone column with conductive natural geotextile under k0 stress condition. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 49, p. 1095-1106.

Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J., Burgstaller, C. (2019) Biodegradable geotextiles – An overview of existing and potential materials. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 47, p. 49-59.

Prasad, V. V. B., Ishwarya, M. V. S., Jayakrishnan, P., Sathyan, D., Muthukumar, S. (2023) Applications of natural geotextile in geotechnical engineering. *Materials Today: Proceedings*.

Saha, P. Roy, D., Manna, S., Adhikari, B., Sen, R., Roy, S. (2012) Durability of transesterified jute geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 35, p. 69-75.

Saride, S., Kumar, V. V. (2017) Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 45, p. 184-196.

Sarsby, R. W. (2007) Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, No. 25, p. 302-310.

Sebastain, S., Divya, P. V. (2024) Natural Fibres: A Sustainable Material for Geotextile Applications. *Indian Geotechnical Journal*.

Siqueira (2026) *Juta Cru*. Disponível em: <https://www.siqueiratecidosgr.com.br/sintetico/juta-1-50-de-largura-cru>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2026.

Sudarsanan, N., Karpurapu, R., Amrithalingam, V. (2018) An investigation on the interface bond strength of geosynthetic-reinforced asphalt concrete using Leutner shear test. *Construction and Building Materials*, No. 186, p. 423-437.

Sudarsanan, N., Mohapatra, S. R., Karpurapu, R., Amirthalingam, V. (2018) Use of Natural Geotextiles to Retard Reflection Cracking in Highway Pavements. Jo*urnal of Materials in Civil Engineering.*

Thakur, K., Kalia, S., Kaith, B. S., Pathania, D., Kumar, A. (2015) Surface functionalization of coconut fibers by enzymatic biografting of syringaldehyde for the development of biocomposites. *RSC Advance*s, Vol. 5, No. 94, p. 76844-76851.

The Fern (2026) *Tropical Plants Database – Corchorus capsularis*. Disponível em: <https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Corchorus+capsularis>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2026.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/38

Estudo Comparativo de Técnicas de Espectrofotometria por Infravermelho para Avaliação da Degradação em Geotêxteis Tecidos

Júlia de Sousa Dourado
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, julia.d4277@ufob.edu.br

Jaedson Alves Ferreira
Graduando, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jaedson.f3593@ufob.edu.br

Sérgio Macedo Soares
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sergio.soares@ufob.edu.br

José Domingos Santos da Silva
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jose.silva@ufob.edu.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: A espectrometria no infravermelho tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a caracterização de geossintéticos, especialmente quanto à avaliação de sua durabilidade frente a processos de degradação. Este estudo tem como objetivo comparar e discutir resultados à luz de análises conduzidas em geotêxteis tecidos utilizando a Espectroscopia de absorção na região Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR, em inglês) pela tradicional técnica de transmissão e com aplicação do módulo de Reflectância Total Atenuada (ATR, em inglês). Para tanto, foram selecionadas sete amostras de geotêxteis submetidas a condições controladas de degradação de campo e laboratório. Nesse sentido, os espectros obtidos permitiram avaliação das variações em bandas importantes como a carbonila em 1712 cm^{-1} e metil 1377 cm^{-1} para a comparação dos resultados entre as duas metodologias de ensaio. Nos espectros obtidos com o módulo ATR foi possível observar o aparecimento de bandas mais suaves e definidas, refletindo maior representatividade das ligações poliméricas das amostras e menor influência de irregularidades superficiais. Em contrapartida, os dados obtidos por transmissão evidenciaram bandas de maior intensidade e menor estabilidade espectral, associado a elevada densidade do material, gerando ruídos na interpretação espectral. Por fim, demonstrou-se que o uso do módulo ATR confere maior consistência às análises de geotêxteis tecidos onde a densidade do material é maior e os ruídos intensos, tornando essa técnica mais adequada para essas condições, enquanto o FTIR tradicional poderia contribuir mais à medida que novos elementos químicos são formados.

PALAVRAS-CHAVE: Espectroscopia, Geotêxtil tecido, Durabilidade, Caracterização, Infravermelho.

ABSTRACT: Infrared spectrometry has established itself as an essential tool for the characterization of geosynthetics, particularly regarding the evaluation of their durability against degradation processes. This study aims to compare and discuss results considering analyses conducted on woven geotextiles using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy via the traditional transmission technique and with the application of the Attenuated Total Reflectance (ATR) module. To this end, seven geotextile samples were selected and subjected to controlled field and laboratory degradation conditions. In this sense, the spectra obtained allowed for the evaluation of variations in important bands such as carbonyl at 1712 cm^{-1} and methyl at 1377 cm^{-1} for the comparison of results between the two assay methodologies. In the spectra obtained with the ATR module, it was possible to observe the appearance of smoother bands and defined, reflecting greater representativeness of the sample's polymeric bonds and less influence from surface irregularities. In contrast, the data obtained by transmission showed peaks of higher intensity and lower spectral stability, associated with the high density of the material, generating noise in the spectral interpretation. Finally, it was demonstrated that the use of the

ATR module provides greater consistency for the analysis of woven geotextiles where material density is higher and noise is intense, making this technique more suitable for these conditions, while traditional FTIR could contribute more as new chemical elements are formed.

KEYWORDS: Spectroscopy, Woven geotextile, Durability, Characterization, Infrared.

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de três décadas os geossintéticos vêm sendo empregados de maneira significativa na construção civil brasileira, visto que fornecem diversas vantagens técnicas e financeiras em obras como estradas, barragens, túneis e estruturas de contenção (COSTA, et al, 2008). Nesse contexto, os geotêxteis tecidos ocupam uma posição de destaque devido à sua estrutura de filamentos ortogonais (urdume e trama), a qual lhes confere elevada resistência mecânica e eficiência em funções de filtração, separação, reforço, drenagem e proteção (SALAH, 2020). Fabricados predominantemente a partir de polímeros como o polipropileno (PP) e o poliéster (PET), esses materiais são selecionados por sua inércia química e propriedades físicas otimizadas. Por sua vez, a manutenção de suas propriedades ao longo do tempo é condicionada pela estabilidade molecular frente aos processos de degradação ambiental, tornando a avaliação de sua durabilidade um fator crítico para a segurança das estruturas.

Apesar de sua reconhecida resistência, esses materiais poliméricos enfrentam degradação química durante a sua vida útil, as quais induzem alterações em sua cadeia polimérica por fenômenos como oxidação, cisão de cadeia e formação de novos compostos (BARBEŞ et al, 2014). Dessa forma, a incidência de radiação ultravioleta (UV), aliada a variações térmicas e ao contato com solos de pH extremo ou íons metálicos, desencadeia processos de degradação físico-química complexos. Segundo a ISO 13438 (2018), materiais compostos por poliolefina, como o PP, são mais sensíveis à oxidação quando comparados aos compostos por tereftalato de PET. Além disso, esse fenômeno é frequentemente acompanhado por redução na ductilidade e resistência mecânica dos geossintéticos, podendo desencadear a falha prematura dessas estruturas. Diante desse cenário, o monitoramento do avanço da degradação polimérica torna-se indispensável para prever o comportamento desses materiais em campo e assegurar a longevidade das obras de engenharia.

O FTIR é a técnica mais utilizada para a identificação de materiais orgânicos e não-orgânicos (ASTM E1252, 2013). No contexto de investigação das alterações estruturais em nível molecular, a espectroscopia FTIR consolidou-se como a ferramenta analítica por excelência na caracterização. O método fundamenta-se na absorção seletiva da radiação infravermelha na região média (4000 a 500 cm^{-1}) pelos modos vibracionais das ligações químicas, gerando um espectro de absorbância que atua como uma "impressão digital" única para cada material. No contexto da engenharia de materiais, essa técnica destaca-se por sua sensibilidade em detectar o surgimento de novos grupos funcionais, com ênfase nas bandas de carbonila (1820 a 1660 cm^{-1}), marcador químico fundamental do estágio de foto-oxidação e envelhecimento do material.

Tradicionalmente, a análise por infravermelho de polímeros sólidos tem sido realizada por meio da técnica de transmissão, a qual exige que o feixe de radiação atravesse a amostra para atingir o detector. Segundo a ASTM E1252 (2013): "A espessura da amostra deve ser adequada para causar uma diminuição na potência de radiação que atinge o detector nas frequências de absorção usadas na análise". No entanto, para geotêxteis tecidos, essa abordagem apresenta limitações analíticas devido à elevada densidade e opacidade das fibras. Amostras de alta gramatura costumam causar a absorção total de bandas importantes ou o desvio da linha de base devido ao espalhamento de luz nas irregularidades superficiais do tecido (*scattering*). Além disso, a necessidade de preparação de pastilhas de brometo de potássio (KBr) ou prensagem a quente para a formação de filmes finos torna o método laborioso e introduz riscos de contaminação por umidade e ruídos espectrais que podem comprometer a estabilidade dos dados. Almond et al. (2020) propõem que a eventual saturação das bandas leva a uma linha de base distorcida e ao alargamento das bandas nos espectros obtidos, além do fato de que as medições dessa técnica não são possíveis em materiais de estrutura mais espessa.

Atualmente, o módulo ATR é o acessório de amostragem FTIR mais utilizado na investigação acerca da transformação de diferentes grupos funcionais da estrutura polimérica desses geossintéticos (BARBEŞ et al., 2014). Essa técnica, também conhecida como FTIR-ATR, utiliza um cristal de alta densidade óptica que promove a interação da radiação apenas com a superfície da amostra (fenômeno da onda evanescente), em profundidades que variam tipicamente de 0,2 µm a 2,0 µm. Essa especificidade torna a técnica ATR uma

ferramenta ágil para a caracterização da interface e para a detecção de processos de degradação que se iniciam na superfície dos geotêxteis, uma vez que se trata de um método não destrutivo, o qual requer pouca ou nenhuma preparação da amostra (ALMOND et al., 2020). Em contrapartida, a técnica de transmissão clássica permanece como um método de referência para investigar as propriedades volumétricas (*bulk*) e a composição interna das fibras, sendo frequentemente empregada quando se exige a representação da massa total do polímero. Dessa maneira, ambas as modalidades apresentam condições distintas para respaldo confiável: enquanto a técnica FTIR-ATR depende da qualidade do contato mecânico entre o tecido e o cristal para evitar perdas de sinal, a transmissão exige uma preparação criteriosa para mitigar fenômenos de espalhamento de luz inerentes a materiais densos.

Diante da complexidade estrutural dos geotêxteis tecidos, o presente estudo tem como objetivo comparar e discutir o desempenho analítico da espectroscopia FTIR nas modalidades de transmissão e o ATR. Pretende-se investigar a sensibilidade de cada método na detecção de novos grupos funcionais, ponderando as contribuições da amostragem superficial do módulo ATR frente à representatividade volumétrica da transmissão. Em última análise, este trabalho visa fornecer um referencial técnico para a seleção fundamentada da técnica espectroscópica em ensaios de durabilidade, auxiliando na padronização de protocolos de caracterização para a previsão da vida útil de geossintéticos.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo fundamenta-se na análise comparativa entre dados espectroscópicos secundários (obtidos pela técnica de transmissão) e dados experimentais primários (obtidos por ATR). As etapas do processo de pesquisa, desde a seleção dos materiais à correlação dos índices de degradação, estão esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 1.



Figura 1. Fluxograma esquemático da metodologia de pesquisa

A pesquisa foca na comparação entre duas técnicas distintas voltadas para a análise do estado de degradação em um geotêxtil tecido de PP. O estudo abrange amostras intactas e amostras submetidas a dois regimes de degradação controlada distintos: envelhecimento natural em campo (6, 12 e 24 meses) e envelhecimento acelerado em laboratório (100, 130, 270 e 600 ciclos), permitindo o monitoramento das bandas de carbonila sob diferentes condições de exposição.

A constituição da base de dados secundária apoiou-se na extração e reanálise dos registros experimentais publicados por Dias Filho et al. (2019). Focado na validação da espectrofotometria como ferramenta para caracterização da durabilidade de geotêxteis tecidos, o trabalho forneceu os parâmetros espectrais por meio da técnica de transmissão para amostras submetidas a rigorosos protocolos de envelhecimento: exposição natural em campo (até 24 meses) e degradação acelerada em laboratório (até 600 ciclos - ASTM D4355). A investigação experimental (dados primários) aplicou a técnica ATR nas mesmas classes de amostras, permitindo uma comparação direta entre as respostas do material sob as diferentes condições de ensaio.

2.1 Materiais

Para a obtenção dos dados secundários foi selecionado um geotêxtil tecido em monofilamento de PP de 500 g/m², gerando a denominação PP500, cujas características são apresentadas na Tabela 1. As amostras ensaiadas para a composição da base de dados primária correspondem às mesmas utilizadas no estudo de referência, no qual não foram submetidas a processos de preparação destrutivos.

Tabela 1. Propriedades do geotêxtil intacto.

Propriedade	PP500
Resistencia à Tração (kN/m)	106,2 ± 2,0
Gramatura (g/m²)	500 ± 9
Espessura (mm)	1,53 ± 0,04

2.2 Transmissão

A espectroscopia por transmissão baseia-se na passagem de um feixe de infravermelho através da amostra, com um detector fazendo a medição da intensidade da radiação que sobrevive ao percurso óptico. Dessa forma, o método permite a análise da composição volumétrica total da fibra, a qual resulta de uma média entre o estado da superfície e do núcleo amostral. Para geotêxteis tecidos, que são materiais de alta gramatura, opacidade e espessura considerável, a transmissão direta é dificilmente viável sem uma preparação extensiva da amostra. No entanto, no contexto desse estudo, os ensaios foram realizados com as amostras em seu estado original, sem alteração de seu estado físico, permitindo a avaliação da degradação.

Os ensaios realizados dentro do espectro correspondente ao infravermelho vibracional (4000-500 cm^{-1}) foram executados em um espectrofotômetro Shimadzu IRAffinity-1.

2.3 Reflectância Total Atenuada (ATR)

O princípio do método ATR baseia-se na reflexão interna total do feixe de infravermelho dentro de um cristal de alto índice de refração, denominado Elemento de Reflexão Interna (IRE). Assim que esse feixe atinge a interface entre o cristal e o geotêxtil, uma onda evanescente é gerada, penetrando a amostra em profundidades que podem variar entre 0,2 µm a 2,0 µm. Dessa forma, a técnica permite leituras superficiais, avaliando com maior precisão o estado inicial de degradação polimérica.

Os ensaios experimentais realizados por meio desse método foram executados em um espectrofotômetro Shimadzu IRAffinity-1S com acoplamento do módulo QATR 10 *Single-Reflection ATR Accessory*, equipado com um cristal de diamante com área de contato de 1,8 mm e ângulo de incidência de 45º. As amostras foram analisadas em triplicata por espectros de absorbância na região do infravermelho médio, nos quais foram realizadas correções de linha de base por meio do software *LabSolutions IR*, disponibilizado pela fabricante. Nesse sentido, a fim de garantir que as áreas e alturas das bandas representem verdadeiramente as concentrações na superfície da amostra, cinco ferramentas de correção foram utilizadas em todos os espectros obtidos: *background* (BKG), pré-processamento espectral responsável por eliminar interferências atmosféricas e/ou instrumentais; *arithmetic*, elimina desvios e interferências de fundo para estabilidade; *normalize*, padroniza a intensidade; *baseline correction*, elimina inclinações, ruídos de fundo e deslocamentos; *smoothing*, suaviza o ruído sobre a linha de base.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Perfil espectral

A caracterização molecular do PP500 por meio das duas técnicas de infravermelho permitiu identificar as bandas e bandas de absorção típicos do polímero. Em todos os espectros, destacam-se as faixas de absorção e intensidade características para estiramentos $C-H$ (2870-2960 cm^{-1}), as deformações angulares e assimétricas dos grupos metileno CH_2 e metil CH_3 em 1456 cm^{-1} e as deformações simétricas do grupo metila CH_3 em 1377 cm^{-1}. O monitoramento dessas bandas é crucial, pois elas atuam como indicadores precoces da cisão de cadeia antes do surgimento nítido de bandas de oxidação.

3.2 Comparação entre as técnicas: ATR e Transmissão

A comparação visual entre os métodos revela discrepâncias significativas na qualidade do sinal. Os espectros obtidos via FTIR-ATR (Figuras 2a e 3a) apresentam linhas de base planas e bandas bem definidas, características resultantes do caminho óptico controlado pela onda evanescente (0,2 µm a 2,0 µm), a qual interage apenas com a superfície da amostra (BARBEŞ et al., 2014). Em contrapartida, a técnica de transmissão (Figuras 2b e 3b) exibiu acentuada instabilidade espectral similar a Almond et al., 2020. Pode-se observar um desvio nas linhas de base e um aumento no ruído de fundo, fenômenos que podem ser atribuídos ao espalhamento de luz (*scattering*) provocado pela geometria das fibras e pela alta densidade do tecido.

3.3 O fenômeno da saturação na Transmissão

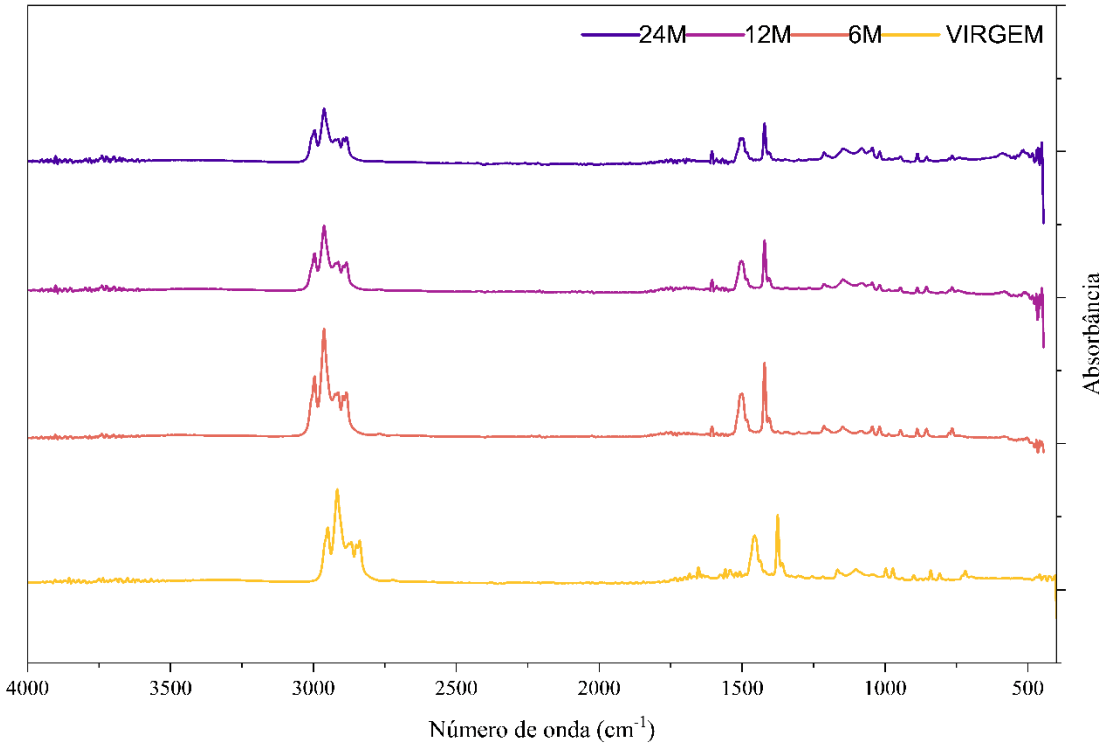
É possível inferir, a partir das Figuras 2b e 3b, que houve saturação por meio dos resultados dos ensaios de transmissão para as amostras: intacta (virgem) e às submetidas a degradação em laboratório a 100 ciclos (100C) e a 130 ciclos (130C), bem como degradação em campo com 6 meses (6M). Nesses espectros, os valores de absorbância excederam o intervalo indicado pela ASTM E1252 para as bandas mais fortes (entre 1 a 2 AU), ultrapassando os limites de linearidade do detector presente no espectrofotômetro utilizado. Além disso, nessas mesmas curvas foram observados valores negativos de absorbância, os quais podem estar relacionados ao *scattering* (ALMOND et al., 2020; DIAS FILHO et al., 2019).

A saturação ocorre a partir da absorção total de importantes bandas devido a espessura e a densidade óptica do geotêxtil PP500 excederem o caminho óptico ideal para transmissão, o qual se insere no intervalo de 10 a 50 µm, a fim de garantir uma leitura precisa. Quando o sinal atinge a saturação, o espectro pode apresentar bandas com "topo achatado" que impossibilitam a quantificação real da degradação. O módulo ATR contorna essa limitação técnica ao isolar a análise à camada superficial (BARBEŞ et al., 2014), mantendo os sinais dentro da escala dinâmica de medição, conforme pode ser observado pelas Figuras 2a e 3a.

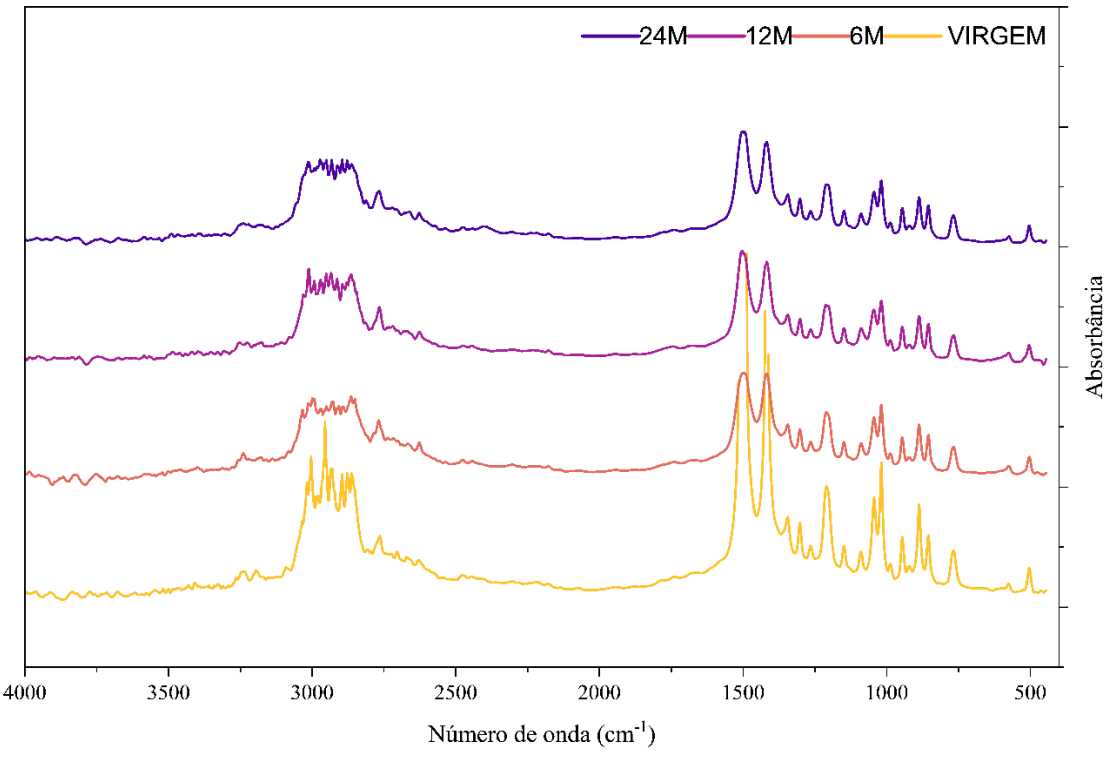
3.4 Monitoramento do avanço da degradação

A formação de carbonila e metil podem ser um indicador relevante na análise da durabilidade de geotêxteis. Com a comparação entre os dados de estresse ambiental obtidos no estudo de Dias Filho et al. (2019), adaptados e apresentados na Tabela 2, é possível observar uma correlação direta entre o tempo de exposição e a formação de grupos carbonila. Com o emprego da técnica de transmissão, a amostra 600C, correspondendo a aproximadamente 4800 horas de exposição, apresentou o maior índice de carbonila, evidenciado pelo crescimento da banda em 1712 cm^{-1}. A amostra exposta por 24 meses (24M), por sua vez, submetida a cerca de 17.280 horas de radiação natural, exibiu alterações estruturais similares.

O monitoramento e técnica utilizada via FTIR-ATR permitiu detectar melhor a evolução da carbonila e metil, onde o modo de transmissão, devido ao ruído e à saturação das bandas adjacentes, pode promover falha de interpretação e cálculo. Nas amostras virgens, a existência do grupo carbonila é mínima. À medida em que o tempo de degradação aumenta, a altura e a área dessa banda aumentam discretamente, indicando a foto-oxidação causada pela radiação UV. Além da oxidação química, a simultânea redução na intensidade da banda de metil (1377 cm^{-1}) serve como indicador da cisão de cadeias moleculares, com posterior fragilização mecânica das fibras, que precede falhas em campo.

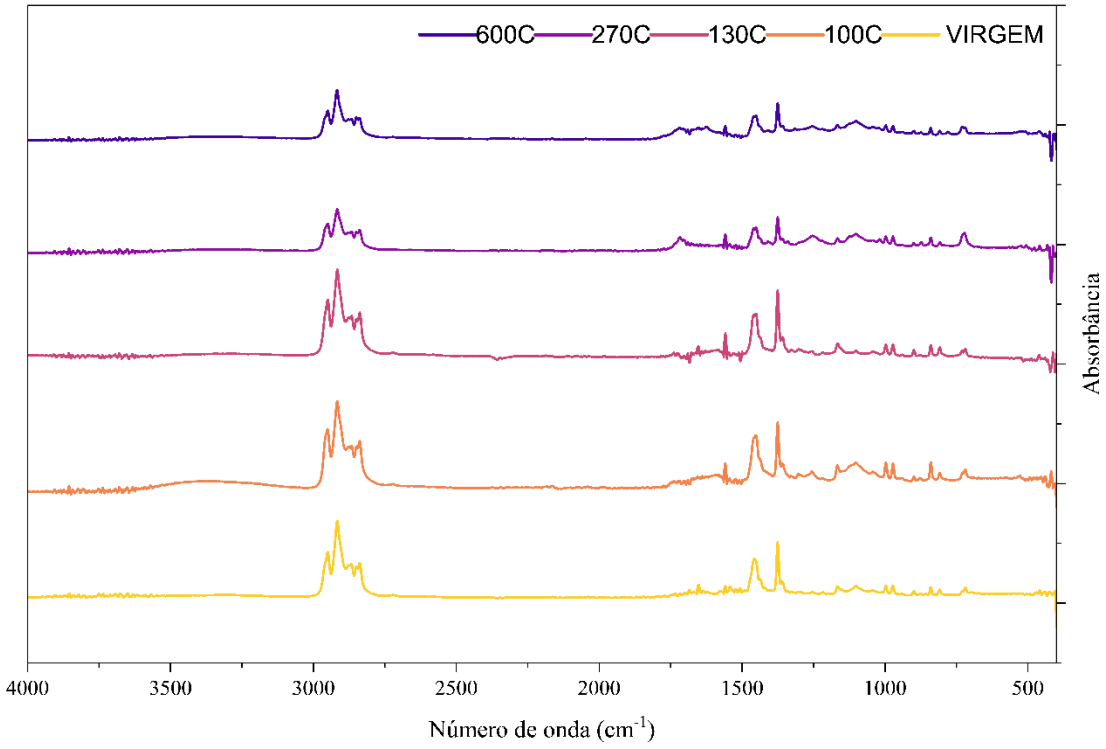


(a) ATR

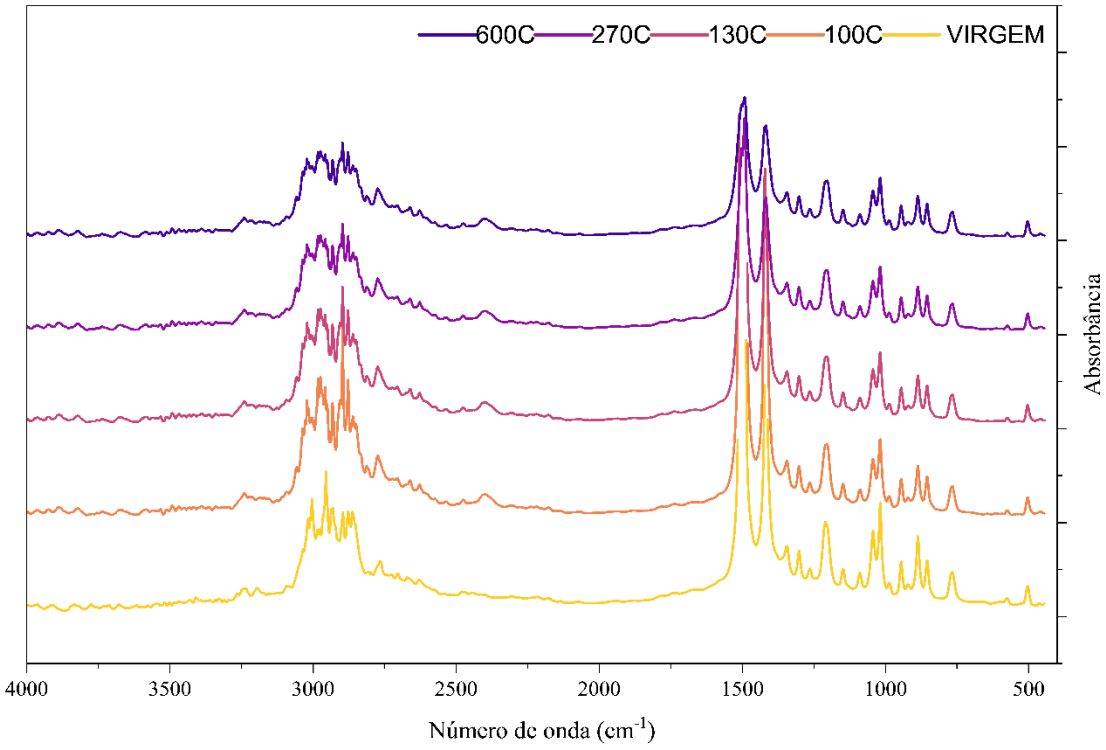


(b) Transmissão

Figura 2. Espectros das amostras intacta e degradadas em campo.



(a) ATR



(b) Transmissão

Figura 3. Espectros das amostras intacta e degradadas em laboratório.

Tabela 2. Parâmetros de tempo de degradação da amostra PP500

Condição	Amostra	Tempo		Absorbância	
		Dias	Horas	Carbonila (%)	Metil (%)
Exposição em campo	6M	180	4320	8,69	39,00
	12M	360	8640	18,21	94,04
	24M	720	17280	26,65	141,18
Exposição em laboratório	100C	33,33	800	13,41	19,14
	130C	43,33	1040	17,56	27,34
	270C	91,00	2160	23,38	43,74
	600C	200,00	4800	27,53	84,73

4 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que, embora a transmissão seja um método clássico para a análise volumétrica, sua aplicação em geotêxteis tecidos, como o PP500, é limitada pelo excesso de absorção e consequente saturação das bandas mais fortes, já que a gramatura do material pode comprometer a análise. A técnica de transmissão com o módulo ATR provou ser mais adequada para este estudo, garantindo estabilidade espectral e sensibilidade necessária para detectar precocemente os primeiros sinais de degradação induzidas pela radiação UV e pela temperatura, para poder seguir com análises quantitativas.

O ATR provou ser uma ferramenta eficaz para caracterizar alterações limitadas à superfície do material, causadas pela exposição a agentes degradantes, principalmente quando comparadas a técnica tradicional de transmissão. As análises qualitativas, comparando os resultados dos espectros, permitiram uma melhor visualização da evolução da oxidação com o tempo de degradação nas bandas de carbonila e metil.

O FTIR-ATR destaca-se também pela rapidez no procedimento experimental e pela preservação da integridade da amostra, sendo recomendado para triagens rápidas. Dessa forma, a metodologia apresentada com o atenuador permite o monitoramento evolução da degradação dos geotêxteis e confirma que é possível avaliar materiais de maior gramatura sem que ocorram ruídos e interpretação equivocada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ. Os autores agradecem também o apoio da UFOB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almond, Jasmine; Sugumaar, Piriya; Wenzel, Margot N.; Hill, Gavin; Wallis, Christopher (2020) Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. *e-Polymers*, v. 20, p. 369–381.

ASTM International (2013). ASTM E1252: *Standard practice for general techniques for obtaining infrared spectra for qualitative analysis.*

Barbeş, L.; Rădulescu, C.; Stihi, C. (2014) ATR-FTIR spectrometry characterisation of polymeric materials. *Romanian Reports in Physics*, v. 66, n. 3, p. 765–777.

Costa, Carina M. L. (2008) Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 158–169.

Dias Filho, J.L.E., Maia, P.C.A., Xavier, G.C. (2019) "Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles". *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, n. 4, 577–585.

International Organization for Standardization (2018). ISO 13438: *Geosynthetics - Screening test method for determining the resistance of geotextiles and geotextile-related products to oxidation.*

Salah, H. (2020) Technical specifications of geotextile and applications in marine works. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 7, n. 1, p. 385–395.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/39

Estudo da aderência na interface de mistura asfáltica reforçada com geossintéticos

Bruno Andrade de Freitas
Pesquisador, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, brunoandraderc@hotmail.com

Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena
Professor, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, luenafb@uol.com.br

Ashray Saxena
Pesquisador Assistente, University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos, saxena_ashray@utexas.edu

Jorge Gabriel Zornberg
Professor, University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos, zornberg@mail.utexas.edu

RESUMO: A adesão na interface tem um papel crítico no desempenho estrutural e durabilidade de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos. Uma ligação insuficiente entre as camadas pode levar a redução da vida útil do pavimento, particularmente sob temperaturas elevadas. Este estudo investiga a resistência ao cisalhamento na interface (ISS) de sistemas asfalto–asfalto e asfalto–geossintético–asfalto, com foco na influência da temperatura de ensaio, da taxa de aplicação da pintura de ligação e do tipo de ligante asfáltico. Três geocompostos de reforço comumente utilizados na restauração de pavimentos foram avaliados em combinação com um ligante asfáltico convencional (PG 64-22) e um ligante modificado por polímero (AC-15P), aplicados como pintura de ligação em diferentes taxas. Ensaios monotônicos de cisalhamento foram realizados utilizando o equipamento Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST) nas temperaturas de ensaio 10°C, 25°C e 40°C. Os resultados demonstram uma redução acentuada da ISS com o aumento da temperatura, confirmando a elevada sensibilidade térmica da interface. O ligante modificado por polímero apresentou desempenho ligeiramente superior ao ligante asfáltico convencional sob condições críticas de temperatura. Os resultados fornecem subsídios práticos para a construção de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos, especialmente em regiões sujeitas a variações térmicas.

PALAVRAS-CHAVE: geossintéticos; aderência na interface; resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: Interface adhesion plays a critical role in the structural performance and durability of asphalt overlays reinforced with geosynthetics. Insufficient bonding between layers may lead to a reduction in pavement service life, particularly under elevated temperatures. This study investigates the interface shear strength (ISS) of asphalt–asphalt and asphalt–geosynthetic–asphalt systems, focusing on the influence of testing temperature, tack coat application rate, and asphalt binder type. Three geocomposite reinforcements commonly used in pavement rehabilitation were evaluated in combination with a conventional asphalt binder (PG 64-22) and a polymer-modified binder (AC-15P), applied as tack coats at different application rates. Monotonic interface shear tests were performed using the Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST) at temperatures of 10°C, 25°C, and 40°C. The results demonstrate a pronounced reduction in ISS with increasing temperature, confirming the high thermal sensitivity of the interface. The polymer-modified binder exhibited slightly better performance than the conventional asphalt binder under critical temperature conditions. The findings provide practical insights into the construction of geosynthetic-reinforced asphalt overlays, particularly in regions subjected to thermal variations.

KEYWORDS: geosynthetics; interface adhesion; shear strength.

1 INTRODUÇÃO

As crescentes demandas por tráfego têm intensificado a necessidade de estratégias na restauração de pavimentos duráveis e economicamente viáveis. Os recapeamentos asfálticos permanecem como uma das soluções mais comumente adotadas para a restauração da capacidade estrutural e da funcionalidade superficial de pavimentos deteriorados. No entanto, a eficácia dos recapeamentos asfálticos é frequentemente comprometida pelo rápido desenvolvimento de fissuração refletida, escorregamento entre camadas e descolamento prematuro, fatores que reduzem significativamente a vida útil do pavimento e aumentam os custos de manutenção.

Para enfrentar esses desafios, os geossintéticos têm sido cada vez mais incorporados aos sistemas de recapeamento asfáltico. Quando adequadamente projetados e instalados, os geossintéticos podem retardar a propagação de fissuras, melhorar a distribuição de cargas e aumentar a durabilidade do pavimento (Zornberg, 2017). Esses benefícios têm sido demonstrados em estudos de campo (Kumar *et al*. 2022) e laboratoriais (Saride e Kumar, 2019; Solatiyan *et al*. 2021; Saxena *et al*. 2025), tornando os recapeamentos reforçados com geossintéticos uma solução atrativa para projetos de reabilitação de pavimentos em todo o mundo.

Apesar de suas vantagens, a inclusão de geossintéticos introduz uma interface crítica na estrutura do pavimento. A interface entre a camada asfáltica existente, o reforço geossintético e o novo revestimento passa a constituir um potencial plano de fraqueza caso não seja alcançada uma aderência adequada (Correia *et al*. 2022). A adesão insuficiente na interface pode resultar em escorregamento horizontal, redução da integridade estrutural e aceleração dos mecanismos de deterioração do pavimento. Essas falhas tornam-se particularmente críticas em altas temperaturas de serviço, nas quais os ligantes asfálticos apresentam significativa redução de rigidez e coesão (Sufian *et al*. 2020; Sagnol *et al.* 2018).

A adesão na interface é governada por uma interação complexa de fatores, incluindo as propriedades mecânicas e físicas do geossintético, as características reológicas do ligante da pintura de ligação, a quantidade de ligante aplicada, as práticas construtivas e as condições ambientais (Silva *et al*. 2024). Entre essas variáveis, a temperatura desempenha um papel fundamental devido à natureza termo viscoelástica dos materiais asfálticos (Safavizadeh *et al*. 2020). À medida que a temperatura aumenta, o ligante se torna mais viscoso, reduzindo sua resistência à deformação por cisalhamento e enfraquecendo a ligação adesiva na interface.

Estudos experimentais anteriores (Bae *et al*. 2010; Safavizadeh *et al*. 2020) investigaram a resistência ao cisalhamento na interface por meio de diversos equipamentos laboratoriais e protocolos de ensaio. Embora esses estudos tenham fornecido contribuições relevantes, muitos se concentram em parâmetros isolados ou em faixas restritas de temperatura. Além disso, uma parcela significativa da literatura existente enfatiza a modelagem estatística em detrimento de uma interpretação prática de engenharia, o que limita a aplicabilidade direta dos resultados para o projeto e a execução de pavimentos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo fornecer uma avaliação experimental abrangente da adesão na interface em misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos, com ênfase particular nos efeitos da temperatura, da taxa de aplicação da pintura de ligação e do tipo de ligante sobre a resistência ao cisalhamento na interface, tanto em sistemas reforçados quanto não reforçados. Os resultados são discutidos sob uma perspectiva de engenharia, com o propósito de subsidiar um projeto mais confiável e sensível à temperatura de recapeamentos asfálticos reforçados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Agregados e mistura asfáltica

A mistura asfáltica utilizada neste estudo foi preparada de acordo com a metodologia SUPERPAVE, visando condições de tráfego médio a elevado, representativas de pavimentos urbanos e rodoviários. Como agregados graúdos, foram selecionados agregados de brita dolomítica com dimensões máximas nominais de 12,5 mm e 9,5 mm, enquanto a areia dolomítica foi empregada como agregado miúdo. A curva granulométrica dos agregados (apresentada na Figura 1) foi escolhida de modo a atender aos requisitos de uma mistura de revestimento densa (TY-D), comumente adotada pelo Departamento de Transportes do Texas (TxDOT).

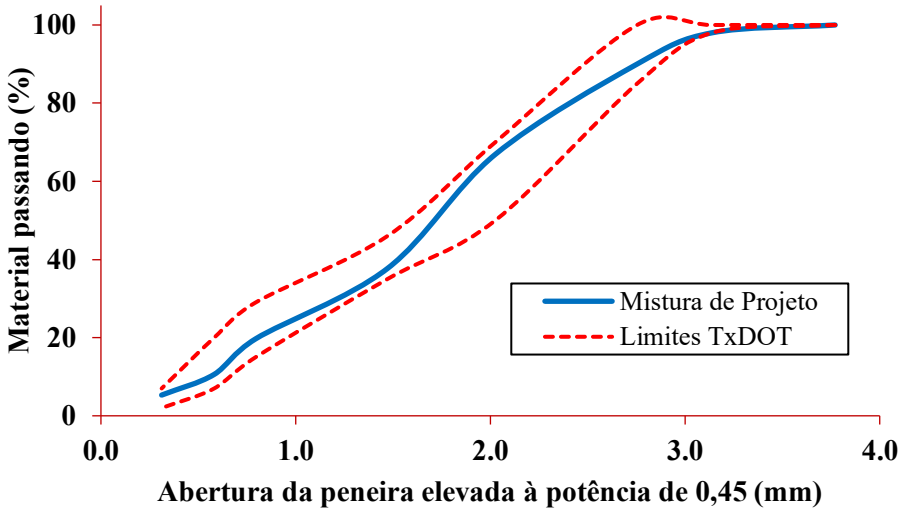


Figura 1. Composição granulométrica da mistura asfáltica.

A mistura projetada incorporou 5,2% de ligante asfáltico, em relação à massa total da mistura. Esse teor de ligante foi selecionado com o objetivo de atingir um teor de vazios de ar de aproximadamente 4% no número de giros de projeto. Antes dos ensaios de interface, a mistura foi avaliada para confirmar a integridade mecânica adequada e a resistência aos danos por umidade. A resistência à tração por compressão diametral e de dano por umidade induzida (Lottman modificado) da mistura asfáltica foram de 0,59 MPa e 81%, respectivamente, conforme determinado de acordo com as normas ASTM D6931 (2025) e ASTM D4867/D4867M-22 (2024). Esses resultados comprovaram que a mistura era adequada para a produção de corpos de prova reforçados e não reforçados, consistentes e representativos.

2.2 Ligantes para pintura de ligação

Dois ligantes asfálticos foram empregados como materiais de pintura de ligação. O primeiro foi um ligante convencional classificado por desempenho, PG 64-22, amplamente utilizado em aplicações de pavimentação asfáltica. O segundo foi um ligante asfáltico modificado por polímero, AC-15P, selecionado com o objetivo de avaliar os potenciais benefícios da modificação polimérica na aderência da interface e na sensibilidade à temperatura.

O ligante convencional representa a prática padrão adotada em muitas regiões, enquanto o ligante modificado por polímero é comumente recomendado para proporcionar desempenho superior sob altas temperaturas e condições de tráfego pesado. Ambos os ligantes foram aplicados a quente, assegurando contato direto e interação efetiva com o reforço geossintético e com as camadas asfálticas.

A seleção das taxas de aplicação da pintura de ligação foi orientada pela capacidade de retenção asfáltica dos ligantes dos geossintéticos, resumida na Tabela 1. Os valores de retenção de ligante medidos atingiram até 494 g/m², com valor médio de 432 g/m² para os ligantes avaliados. Com base nesses resultados, foi adotada uma taxa de aplicação de referência de 500 g/m², correspondente aproximadamente à capacidade máxima de retenção de ligante. Para investigar a influência da dosagem de ligante, foram selecionadas duas taxas adicionais: 350 g/m², representando cerca de 70% da capacidade máxima de retenção, e 650 g/m², correspondente a aproximadamente 130% da capacidade máxima de retenção. Esse intervalo foi escolhido para representar condições de aplicação insuficiente, ótima e excessiva de ligante na interface.

2.3 Geossintéticos

Foram investigados três reforços geocompostos especificamente desenvolvidos para aplicações em pavimentos asfálticos. Cada geocomposto consistiu em uma geogrelha acoplada a um geotêxtil não tecido ultraleve e revestida com material betuminoso, com o objetivo de melhorar a aderência e facilitar a instalação.

Embora os reforços apresentem diferenças quanto ao tipo de polímero e à rigidez, todos foram projetados para proporcionar controle de trincas e reforço estrutural em camadas de recapeamento asfáltico. A Figura 2 apresenta os geocompostos utilizados neste estudo, enquanto a Tabela 1 resume as propriedades físicas e mecânicas dos geocompostos.



Figura 2. Geossintéticos utilizados no estudo: a) GC1; b) GC2 e c) GC3.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas dos geocompostos avaliados.

Propriedades	GC1	GC2	GC3
Abertura da malha, mm	38 (T) X 32 (L)	39 (T) X 33 (L)	32 (T) X 29 (L)
Massa total por unidade de áreas (g/m²)	275	271	378
Espessura do elemento longitudinal (mm)	1,2	1.1	1,5
Espessura do elemento transversal (mm)	0,75	0,7	0,9
Largura do elemento longitudinal (mm)	3,8	3,6	5,4
Largura do elemento transversal (mm)	8,5	8,4	8,8
Capacidade de retenção de asfalto – PEN 50/70 (g/m²)	400	398	405
Capacidade de retenção de asfalto -AC-15P (g/m²)	455	441	494
Resistência à tração última - Transversal (kN/m) - MD/CMD*	50/50	50/50	50/50
Resistência à tração a 3% de deformação (kN/m) -MD*	≤12%	≤6%	≤3%
Deformação na resistência máxima a tração-MD*	400	733	1667

T = transversal; L = longitudinal; MD = direção de fabricação (machine direction); CMD = direção transversal à fabricação (cross-machine direction).

Os geossintéticos selecionados representam uma faixa de diferentes níveis de rigidez e mecanismos de reforço, possibilitando a avaliação do comportamento da interface sob distintas características dos materiais. Sua ampla utilização em projetos de reabilitação de pavimentos torna os resultados deste estudo relevantes para aplicações práticas.

2.4 Preparação dos corpos de prova

Corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica, com diâmetro nominal de 150 mm, foram preparados utilizando um compactador giratório SUPERPAVE. A camada inferior de mistura asfáltica (representando a camada asfáltica antiga ou pré-existente) foi compactada inicialmente e mantida em resfriamento à temperatura ambiente por 24 horas, a fim de garantir a estabilidade dimensional. Em seguida, o ligante de pintura de ligação foi aquecido até a temperatura adequada de aplicação e aplicado uniformemente sobre a superfície da camada inferior, de acordo com as taxas de aplicação previamente definidas.

Imediatamente após a aplicação da pintura de ligação, o reforço geossintético foi cuidadosamente posicionado sobre a superfície revestida com ligante (no caso dos corpos de prova reforçados). Esse procedimento foi adotado para minimizar a variabilidade associada ao tempo de instalação e assegurar a impregnação consistente do geossintético. Posteriormente, a camada superior de mistura asfáltica (representando o recapeamento) foi compactada sobre a interface, tanto nos corpos de prova reforçados quanto nos não reforçados, formando um corpo de prova de duas camadas, com o reforço posicionado na meia altura (no caso dos corpos de prova reforçados).

Após a compactação, todos os corpos de prova foram condicionados à temperatura ambiente por mais 24 horas. Em seguida, as dimensões dos corpos de prova foram medidas para verificar a conformidade com as tolerâncias recomendadas para os ensaios de cisalhamento na interface. A Figura 3 ilustra as etapas seguidas para a preparação dos corpos de prova.

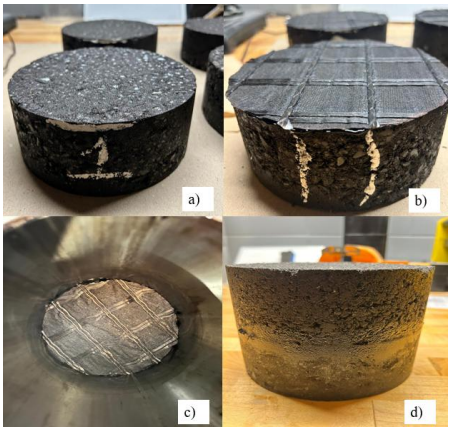


Figura 3. Preparação da interface reforçada: a) Camada inferior de mistura asfáltica compactada; b) Geossintético instalado; c) Primeira camada posicionada no molde; d) Corpo de prova pronto para ensaio.

2.5 Procedimento de ensaio de cisalhamento na interface

A resistência ao cisalhamento na interface dos corpos de prova foi avaliada utilizando o Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST), equipamento desenvolvido especificamente para a determinação da resistência ao cisalhamento entre camadas asfálticas. A Figura 4 apresenta o dispositivo de ensaio, composto pelo equipamento LISST (Figura 4a), pelo pórtico de carregamento utilizado para aplicação da força (Figura 4b) e por uma curva típica tensão cisalhante × deslocamento cisalhante obtida durante o ensaio (Figura 4c).

Os ensaios foram realizados sob controle de deslocamento, com velocidade constante de 2,54 mm/min. Durante o ensaio, a camada inferior do corpo de prova permaneceu rigidamente confinada ao dispositivo, enquanto um deslocamento horizontal foi imposto à camada superior até a ruptura da interface. A força aplicada e o deslocamento correspondente foram registrados continuamente, permitindo a obtenção da curva tensão cisalhante–deslocamento.

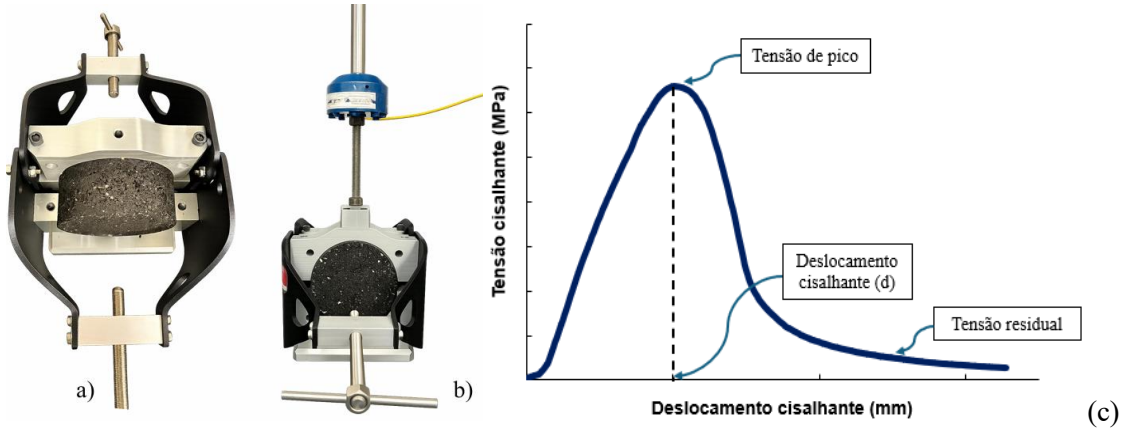


Figura 4. Dispositivo de ensaio de resistência ao cisalhamento na interface (ISS) utilizado neste estudo: a) Equipamento LISST; b) Pórtico (estrutura) de carregamento empregado e Curva típica do ensaio de cisalhamento na interface.

Os corpos de prova foram ensaiados em três temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C representativas de condições de serviço frias, moderadas e elevadas. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram condicionados na temperatura-alvo por, no mínimo, 24 horas, a fim de garantir a uniformidade do equilíbrio térmico em todo o corpo de prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da temperatura na ISS

A temperatura exerceu influência significativa sobre a resistência ao cisalhamento na interface, tanto para os corpos de prova reforçados quanto não reforçados (ver Figuras 5, 6 e 7).

Na temperatura de 10 °C (Figura 5), foram observados valores elevados e consistentes de resistência ao cisalhamento na interface, refletindo uma aderência intensa entre as camadas e a elevada rigidez do ligante asfáltico. Essas condições são representativas do desempenho em períodos de inverno ou em climas frios, nos quais a ocorrência de deslizamento intercamadas é pouco provável.

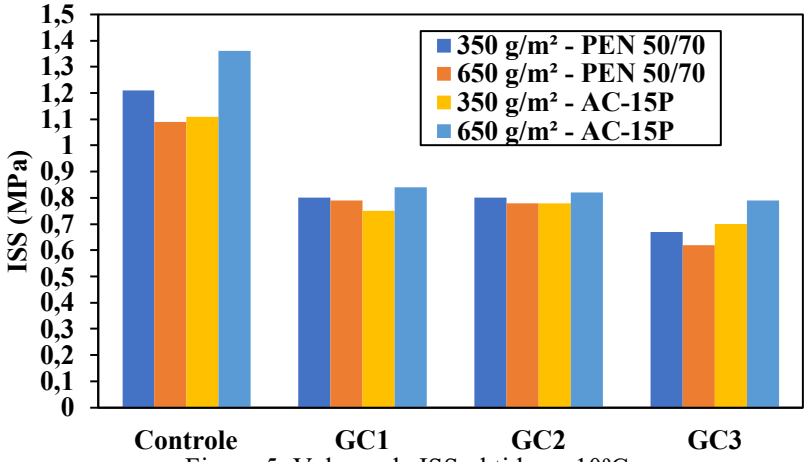


Figura 5. Valores de ISS obtidos a 10ºC.

Na temperatura de 25 °C (500 g/m²) (ver Figura 6), os valores de resistência ao cisalhamento na interface apresentaram redução significativa, porém permaneceram dentro de faixas geralmente consideradas aceitáveis para camadas asfálticas aderidas. Essa faixa de temperatura é representativa das condições típicas de serviço e evidencia a importância de uma preparação adequada da interface, de modo a assegurar aderência satisfatória entre as camadas.

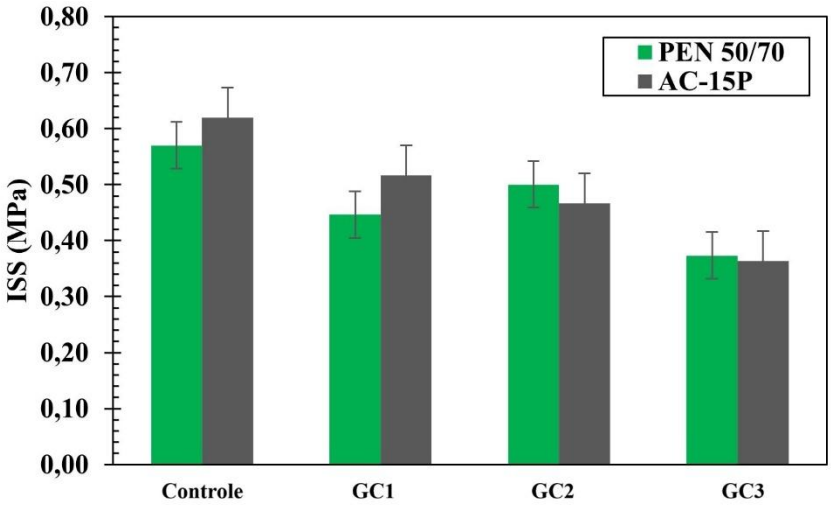


Figura 6. Valores de ISS obtidos a 25ºC.

Na temperatura de 40 °C (Figura 7), os valores de resistência ao cisalhamento na interface foram significativamente reduzidos para todas as configurações avaliadas. Nessas condições, o ligante asfáltico apresentou menor resistência à deformação por cisalhamento, aumentando a probabilidade de deslizamento entre camadas. Esse resultado é particularmente relevante para pavimentos localizados em regiões quentes e tropicais, onde as temperaturas superficiais frequentemente ultrapassam 40°C.

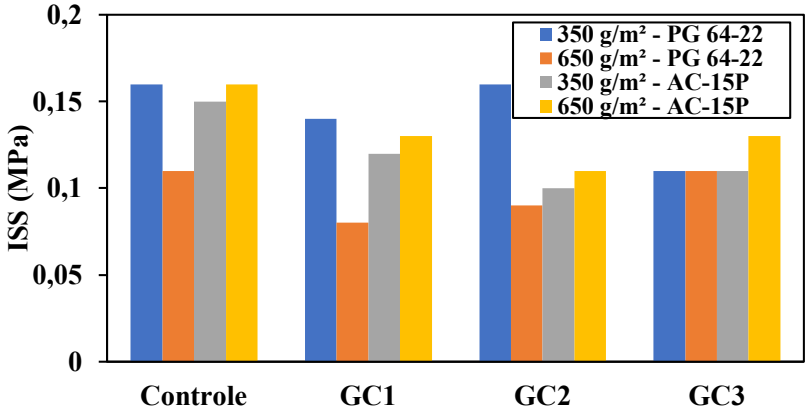


Figura 7. Valores de ISS obtidos a 40ºC.

3.2 Influência da taxa de aplicação

As Figuras 5, 6 e 7 mostraram o efeito da taxa de aplicação da pintura de ligação sobre a resistência ao cisalhamento na interface. Taxas de aplicação reduzidas estiveram associadas a aderência insuficiente, especialmente em temperaturas elevadas, em razão da cobertura incompleta e da impregnação limitada do reforço geossintético.

Com o aumento da taxa de aplicação, a resistência ao cisalhamento na interface apresentou, de modo geral, incremento até uma faixa intermediária, a partir da qual novos aumentos passaram a proporcionar benefícios limitados ou, em alguns casos, redução da resistência ao cisalhamento. O excesso de ligante pode atuar como uma camada lubrificante, favorecendo o deslizamento entre camadas sob carregamento de cisalhamento. Essas observações ressaltam a importância da seleção de uma taxa de aplicação adequada, que equilibre cobertura eficiente e desempenho mecânico na interface.

3.3 Influência do tipo de ligante empregado como pintura de ligação

O ligante modificado por polímero apresentou valores ligeiramente superiores de resistência ao cisalhamento na interface quando comparado ao ligante convencional, especialmente em temperaturas elevadas (ver Figura 7). Esse comportamento pode ser atribuído à maior elasticidade e viscosidade do ligante modificado, que contribuem para o aumento da coesão e da resistência ao escoamento sob carregamento de cisalhamento.

Embora as diferenças observadas tenham sido modestas, o ligante modificado por polímero demonstrou maior robustez ao longo da faixa de temperaturas ensaiada. Esses resultados indicam que a modificação polimérica pode fornecer margens adicionais de segurança em ambientes de alta temperatura, ainda que não elimine a necessidade de práticas construtivas adequadas.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a resistência ao cisalhamento na interface de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos sob diferentes condições de temperatura. Com base nos resultados experimentais obtidos, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

1. A resistência ao cisalhamento na interface diminui significativamente com o aumento da temperatura, confirmando a elevada sensibilidade térmica das interfaces asfalto–geossintético.
2. A taxa de aplicação da pintura de ligação apresenta um comportamento não linear, sendo que taxas intermediárias tendem a proporcionar uma aderência mais estável.
3. O ligante de pintura de ligação modificado por polímero apresentou ligeiramente maior robustez em temperaturas elevadas quando comparado ao ligante convencional.
4. As interfaces reforçadas apresentaram menores valores de resistência ao cisalhamento em relação às interfaces não reforçadas, porém mantiveram desempenho aceitável em temperaturas moderadas.

5 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS PARA O PROJETO DE PAVIMENTOS

Os resultados experimentais deste estudo fornecem importantes subsídios práticos para o projeto e a construção de recapeamentos asfálticos reforçados com geossintéticos. Primeiramente, a temperatura deve ser reconhecida como um parâmetro determinante no desempenho da interface. Os projetistas devem considerar a redução potencial da resistência ao cisalhamento na interface em temperaturas elevadas, especialmente em regiões de clima quente ou com alta incidência de radiação solar.

Em segundo lugar, a taxa de aplicação da pintura de ligação deve ser selecionada com cautela, de modo a garantir aderência adequada sem favorecer o deslizamento entre camadas. Taxas intermediárias, próximas à capacidade de retenção de ligante do geossintético, tendem a apresentar o desempenho mais confiável. A aplicação em campo deve ser acompanhada por rigoroso controle de qualidade, assegurando a distribuição uniforme do ligante.

Por fim, embora os geossintéticos possam reduzir a resistência ao cisalhamento na interface em comparação com sistemas não reforçados, sua contribuição global para o desempenho do pavimento deve ser avaliada de forma holística. Benefícios como a mitigação de trincas e o aumento da vida útil podem compensar eventuais reduções na resistência de interface, desde que sejam adotadas práticas adequadas de projeto e execução.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bae, A.; Button, J. W.; Little, D. N. Laboratory evaluation of the effects of temperature on interface shear strength of emulsified tack coats. *Transportation Research Record*, v. 2180, n. 1, p. 102–109, 2010.

Correia, N. S.; Souza, T. R.; Silva, M. P. S.; Kumar, V. V. Investigations on interlayer shear strength characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt overlay sections at Salvador International Airport. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 6, p. 1542–1558, 2022. DOI: 10.1080/14680629.2022.2092021.

Kumar, V. V.; Roodi, G. H.; Subramanian, S.; Zornberg, J. G. Influence of asphalt thickness on performance of geosynthetic-reinforced asphalt: full-scale field study. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, n. 5, p. 1052–1059, 2022.

Safavizadeh, S. A.; Cho, S. H.; Kim, Y. R. Interface shear strength and shear fatigue resistance of fibreglass grid-reinforced asphalt concrete test specimens. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 8, p. 2531–2542, 2022. DOI: 10.1080/10298436.2020.1861447.

Sagnol, L.; Quezada, J. C.; Chazallon, C.; Stöckner, M. Effect of glass fibre grids on the bonding strength between two asphalt layers and its contact dynamics method modelling. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, n. 5, p. 1164–1181, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1439764.

Saride, S.; Kumar, V. V. Reflection crack assessment using digital image analysis. In: *Frontiers in geotechnical engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 139–156.

Saxena, A.; Kumar, V. V.; Zornberg, J. G. Investigations on cracking characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt using DIC. In: *GeoAsia 8*. Anais… 2025.

Silva, M. P. S.; Zornberg, J. G.; Correia, N. S. Predictive model for the interface bond strength of geosynthetic-reinforced asphalt layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 52, p. 841–854, 2024.

Solatiyan, E.; Bueche, N.; Carter, A. Laboratory evaluation of interfacial mechanical properties in geogrid-reinforced bituminous layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, n. 4, p. 895–909, 2021.

Sufian, A. A.; Swiertz, D.; Bahia, H. U.; Mohammad, L.; Akentuna, M. Factors affecting the interlayer shear strength of laboratory and field samples. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 4, p. 234–244, 2020.

Zornberg, J. G. Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Procedia Engineering*, v. 189, p. 298–306, 2017.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/40

Estudo Laboratorial da Capacidade de Suporte Superficial de Solo Argiloso Reforçado com Geogrelhas

Luigi Tavares Gomes
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, goomes_8@hotmail.com

André Bagordakis Concatto
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, concattoandre@gmail.com

Angelo Dotto Ragagnin Prior
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, angelodrprior@hotmail.com

Patrícia Rodrigues Falcão
Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Magnos Baroni
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

RESUMO: Este trabalho apresenta resultados de um estudo experimental em escala reduzida conduzido para avaliar o aumento da capacidade de suporte de fundações superficiais sobre solo argiloso reforçado com geogrelhas. Os ensaios foram realizados em modelos físicos construídos em caixa rígida com dimensões de 1,0 × 1,0 × 0,45 m, por meio de provas de carga utilizando placas circulares de 15 cm e 30 cm de diâmetro. Foram avaliados oito modelos experimentais, comparando o comportamento do solo argiloso reconstituído sem reforço com duas estratégias de melhoria: (i) utilização de uma camada de areia compactada de 7,5 cm como elemento de redistribuição de tensões e (ii) associação dessa camada com geogrelhas de diferentes resistências nominais à tração (110, 200 e 400 kN/m). A interpretação das curvas tensão–recalque foi realizada por meio de regressão linear segmentada para determinação da tensão de inflexão e pelo método de extrapolação proposto por Aoki para estimativa da tensão de ruptura. A eficiência do reforço foi avaliada por meio da Relação da Capacidade de Suporte. Os resultados indicaram que a utilização apenas da camada de areia apresentou valores de aumento de capacidade de carga próximos de 1,1, enquanto os modelos reforçados com geogrelhas apresentaram ganhos mais expressivos, com valores de até aproximadamente 1,60 para a tensão de inflexão e 1,67 para a tensão de ruptura. Observou-se ainda que o desempenho do sistema é fortemente influenciado pela relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação. Para menores relações, verificou-se limitação na mobilização da resistência das geogrelhas mais rígidas, associada a condições de ancoragem insuficientes.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Físico, Geossintético, Prova de Carga; Regressão Linear, Extrapolação.

ABSTRACT: This study presents the results of a reduced-scale experimental investigation to evaluate the improvement in bearing capacity of shallow foundations on clayey soil reinforced with geogrids. The tests were performed using physical models built in a rigid box with internal dimensions of 1.0 × 1.0 × 0.45 m, through plate load tests employing circular plates with diameters of 15 cm and 30 cm. Eight experimental models were evaluated, comparing the behavior of reconstituted clayey soil without reinforcement with two improvement strategies: (i) a 7.5 cm thick compacted sand layer acting as a stress distribution layer, and (ii) its combination with geogrids of different nominal tensile strengths (110, 200, and 400 kN/m). The stress–settlement curves were interpreted using segmented linear regression to determine the inflection stress, and the extrapolation method proposed by Aoki to estimate the ultimate bearing capacity. Reinforcement efficiency was evaluated using the Bearing Capacity Ratio (BCR). The results showed that the sand layer alone led to BCR values close to 1.1, whereas the geogrid-reinforced models achieved higher improvements, reaching approximately 1.60 for the inflection stress and 1.67 for the ultimate bearing capacity. The system performance was strongly influenced by the ratio between reinforcement length and foundation width. For lower ratios, limited mobilization of geogrid tensile strength was observed due to insufficient anchorage.

KEYWORDS Physical Model, Geosynthetic, Plate Load Test, Linear Regression, Extrapolation.

1 INTRODUÇÃO

As fundações superficiais são amplamente utilizadas em obras de engenharia civil para transmitir ao solo as cargas provenientes das estruturas. O desempenho dessas fundações depende diretamente das propriedades mecânicas do solo de suporte, especialmente de sua resistência ao cisalhamento e deformabilidade. Em solos argilosos ou compressíveis, a baixa capacidade de suporte e a ocorrência de recalques excessivos podem comprometer a estabilidade e a funcionalidade das estruturas, tornando necessária a adoção de técnicas de melhoria do terreno (TERZAGHI, 1943; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2023).

Entretanto, em diversas situações de engenharia, o solo de fundação apresenta baixa capacidade de suporte e elevada deformabilidade, o que pode resultar em recalques excessivos ou mesmo em mecanismos de ruptura. Nessas condições, técnicas de melhoria de solo tornam-se necessárias para garantir o desempenho adequado das fundações. Entre as alternativas disponíveis destacam-se a substituição de solo, a estabilização química e o uso de materiais granulares compactados. Contudo, tais soluções podem apresentar limitações associadas a custos, prazos executivos ou restrições construtivas, o que tem incentivado o desenvolvimento de técnicas alternativas baseadas no uso de geossintéticos (MITTAL, 2014).

A inclusão de geogrelhas no maciço de fundação promove a redistribuição de tensões e permite a mobilização de esforços de tração no reforço, contribuindo para o aumento da capacidade de carga e para a redução de recalques. Estudos pioneiros conduzidos por Binquet e Lee (1975) demonstraram que a presença de reforços horizontais pode aumentar significativamente a capacidade de suporte de fundações superficiais, introduzindo o conceito de Bearing Capacity Ratio (BCR), definido como a razão entre a capacidade de carga do solo reforçado e a do solo não reforçado. Estudos experimentais e numéricos demonstram que o reforço com geogrelhas pode produzir incrementos significativos na capacidade de suporte e modificações importantes na resposta tensão–recalque do sistema solo–fundação (HELIS et al., 2023; HOU et al., 2023).

Diversos fatores influenciam o desempenho de fundações superficiais reforçadas com geossintéticos, incluindo o número de camadas de reforço, a profundidade de instalação, o espaçamento entre camadas e as propriedades mecânicas do material utilizado. Entre esses parâmetros, destaca-se a relação adimensional entre o comprimento do reforço (L) e a largura da área carregada (B), expressa por L/B, que representa o grau de ancoragem do reforço em relação à zona de influência das tensões (FRAGASZY; LAWTON, 1984; PALMEIRA, 2018).

Pesquisas recentes têm buscado compreender de forma mais detalhada os mecanismos de interação entre solo e geogrelha e sua influência no desempenho de fundações reforçadas. Resultados experimentais indicam que configurações adequadas de reforço podem elevar a capacidade de suporte em mais de 60% e reduzir significativamente os recalques do sistema, evidenciando o potencial dessa técnica para aplicação em solos de baixa resistência (Tawfeeq & Salih, 2025). Além disso, estudos experimentais e numéricos recentes também destacam a importância da geometria do reforço e da profundidade de instalação para a mobilização eficiente da resistência à tração da geogrelha e para a modificação do mecanismo de ruptura do solo (Wu et al., 2024).

Apesar do avanço das pesquisas na área, ainda existem lacunas relacionadas à interação entre propriedades do reforço e parâmetros geométricos do sistema, especialmente em relação ao papel da rigidez da geogrelha e da relação L/B no comportamento tensão–recalque de fundações superficiais reforçadas.

Nesse contexto, o presente trabalho investiga experimentalmente o comportamento de fundações superficiais reforçadas com geogrelhas instaladas em camada intermediária de areia compactada sobre solo argiloso reconstituído com índices naturais de campo. Foram realizados ensaios de prova de carga em modelos físicos, avaliando diferentes resistências nominais à tração do reforço e distintas relações L/B, obtidas por meio da variação do diâmetro das placas de carregamento. A análise concentrou-se na influência desses parâmetros na capacidade de suporte do sistema e na rigidez do conjunto solo–reforço, por meio da interpretação das curvas tensão–recalque e da determinação da Relação da Capacidade de Suporte (BCR).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Como material de fundação foi empregado um solo argiloso laterítico proveniente do município de Cruz Alta, no estado do Rio Grande do Sul. Esse material foi previamente caracterizado por Falcão (2021), que realizou a determinação dos índices físicos e parâmetros geotécnicos representativos do solo em condições

naturais de campo. Como material de preenchimento da camada de transferência de tensões foi utilizada uma areia fina a média, caracterizada por Gomes (2025).

A Tabela 1 apresenta os principais índices físicos do solo, incluindo os valores médios obtidos em campo e suas respectivas faixas de variação. Esses parâmetros foram utilizados como referência para a reconstituição das camadas de solo nos modelos físicos, de modo a reproduzir condições representativas de campo. Adicionalmente, apresenta-se nessa os parâmetros de caracterização da areia utilizada.

Tabela 1. Índices físicos, granulometria e parâmetros de resistência do solo de fundação e da areia utilizada.

Propriedade	Parâmetro	Valor médio	
		Solo argiloso	Areia fina a média
Índices físicos	Massa específica real dos grãos - γ_s (g/cm³)	2.75	2.6
	Massa específica aparente natural - γ_n (g/cm³)	1.526	1.65
	Teor de umidade natural -*w* (%)	31.81	8
	Índice de vazios - e_0	1.41	0.7
Granulometria	% argila	65	0
	% silte	16	0
	% areia	19	100
Parâmetros de resistência	Intercepto coesivo - c' (kPa)	9.75	0
	Ângulo de atrito interno - ϕ' (º)	28	37

Nota: Para o solo argiloso, os valores médios apresentados correspondem às condições de campo reportadas por Falcão (2021). Os desvios padrão dos índices físicos são: γn = 0,099 g/cm³, w = 7,2 % e e₀ = 0,15.

O reforço foi constituído por geogrelhas poliméricas da mesma família Fortrac, apresentando geometria de malha semelhante, porém diferentes resistências nominais à tração. Foram utilizadas três geogrelhas com resistências nominais de 110 kN/m, 200 kN/m e 400 kN/m, permitindo avaliar a influência da rigidez do reforço no desempenho das fundações superficiais reforçadas.

2.2 Modelos experimentais e procedimento de ensaio

Os ensaios foram realizados em modelos físicos reduzidos construídos em uma caixa rígida com dimensões internas de 1,0 m × 1,0 m × 0,45 m. O solo de fundação foi disposto em camadas sucessivas e compactado de modo a reproduzir os índices físicos representativos observados em campo.

Foram avaliados oito modelos experimentais distintos. O primeiro modelo corresponde ao solo natural reconstituído, utilizado como referência para comparação. No segundo modelo foi introduzida uma camada de areia compactada com espessura de 7,5 cm, posicionada imediatamente abaixo da placa de carregamento, atuando como elemento de redistribuição de tensões.

Nos demais modelos foi utilizada a associação entre a camada de areia compactada e uma camada de geogrelha instalada no interior dessa camada granular. Foram empregadas as três geogrelhas com diferentes resistências nominais à tração. A Figura 1 apresenta as configurações dos modelos físicos executados.

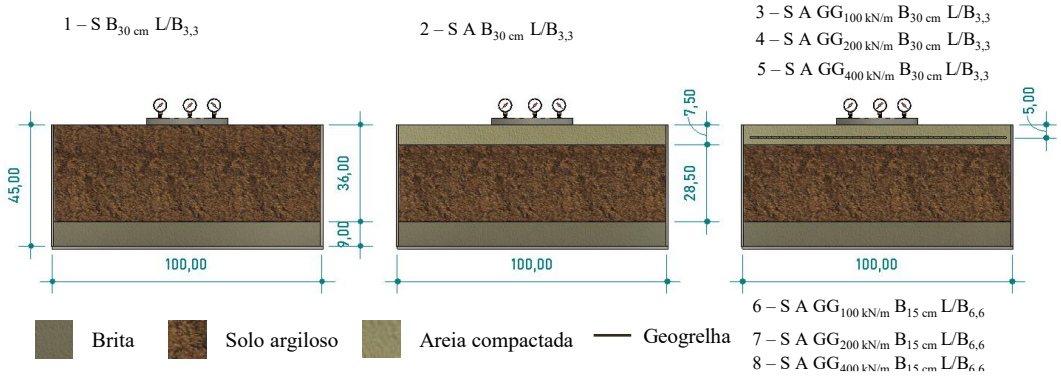


Figura 1. Configuração dos modelos físicos utilizados nos ensaios de prova de carga.

A influência da relação entre o comprimento do reforço (L) e a largura da área carregada (B) foi avaliada por meio da utilização de placas circulares de carregamento com diâmetros de 15 cm e 30 cm.

Os ensaios de prova de carga superficial foram realizados seguindo os preceitos estabelecidos na NBR 6489, adotando a metodologia de carregamento rápido. As leituras de recalque foram obtidas por meio de

extensômetros posicionados sobre a placa de carregamento, permitindo a obtenção das curvas tensão–recalque para cada modelo.

2.3 Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados baseou-se na análise das curvas tensão–recalque obtidas nos ensaios de prova de carga.

Inicialmente, foi aplicado o método de regressão segmentada (Eq. 1) para identificar o ponto de inflexão das curvas, correspondente à tensão característica associada à transição entre o comportamento predominantemente elástico e o início do processo de plastificação do solo. Esse ponto foi adotado como a tensão de inflexão (σ_ψ).

$$\rho=\beta_0+\beta_1\cdot\sigma+\Delta\beta\cdot(\sigma-\sigma_\psi)_+ \quad (1)$$

onde ρ representa o recalque, σ é a tensão aplicada (kPa), β_0 é o intercepto, β_1 corresponde à inclinação da reta no trecho anterior à tensão de inflexão, $\Delta\beta$ representa a variação da inclinação após esse ponto e ψ corresponde à tensão de inflexão da curva. O termo $(\sigma-\sigma\psi)_+$ assume valor nulo para $\sigma \leq \sigma_\psi$.

Para estimativa da tensão de ruptura (σ_{rup}), foi aplicado o método de extrapolação proposto por Aoki (1976), apresentado na Equação 2. Esse procedimento consiste no ajuste de uma função matemática aos dados experimentais, permitindo a extrapolação da curva tensão–recalque até a condição de ruptura.

$$\sigma = \sigma_{rup.} \cdot (1 - e^{-(a\rho+b)}) \quad (2)$$

sendo a e b parâmetros de ajuste do modelo de regressão.

Com base nesses parâmetros, foi calculada a Relação da Capacidade de Suporte (*Bearing Capacity Ratio* – BCR), definida como a razão entre a tensão característica do solo reforçado e a tensão correspondente obtida no modelo de referência sem reforço.

3 RESULTADOS

3.1 Parâmetros dos modelos construídos por camadas reconstituídas

A Figura 2 apresenta os valores de peso específico natural (γ_n), teor de umidade (w) e índice de vazios (e) obtidos nas camadas reconstituídas durante a construção dos modelos experimentais.

Observa-se que os valores determinados nos modelos apresentam boa consistência entre as camadas e se mantêm compatíveis com aqueles observados para o solo em campo, apresentados na Seção 2.1. De modo geral, os índices físicos obtidos indicam que o procedimento de reconstituição adotado permitiu reproduzir satisfatoriamente os índices encontrados em campo.

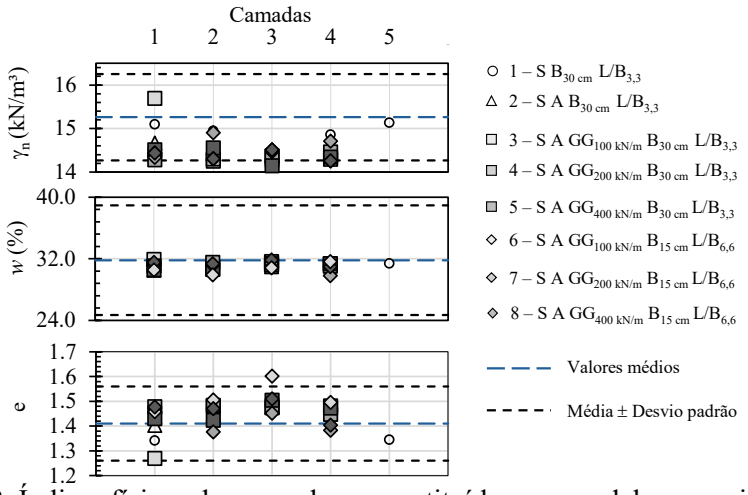


Figura 2. Índices físicos das camadas reconstituídas nos modelos experimentais.

3.2 Curvas tensão-recalque e definição das tensões características

A Figura 3 apresenta as curvas tensão–recalque obtidas para os oito modelos avaliados. Além dos dados experimentais, são apresentadas as curvas ajustadas por meio do modelo de regressão segmentada e do modelo de extrapolação utilizados para estimar as tensões características dos ensaios, correspondentes à tensão de inflexão (σ_{ψ}) e à tensão de ruptura (σ_{rup}).

De modo geral, ambos os modelos apresentaram adequados ajustes aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,943 e 0,999, indicando elevada confiabilidade na representação do comportamento observado nos ensaios. A regressão segmentada mostrou-se adequada para identificar a transição entre o regime predominantemente elástico e o início do processo de plastificação do solo, enquanto o modelo de extrapolação permitiu estimar de forma consistente a tensão de ruptura associada ao mecanismo de colapso progressivo.

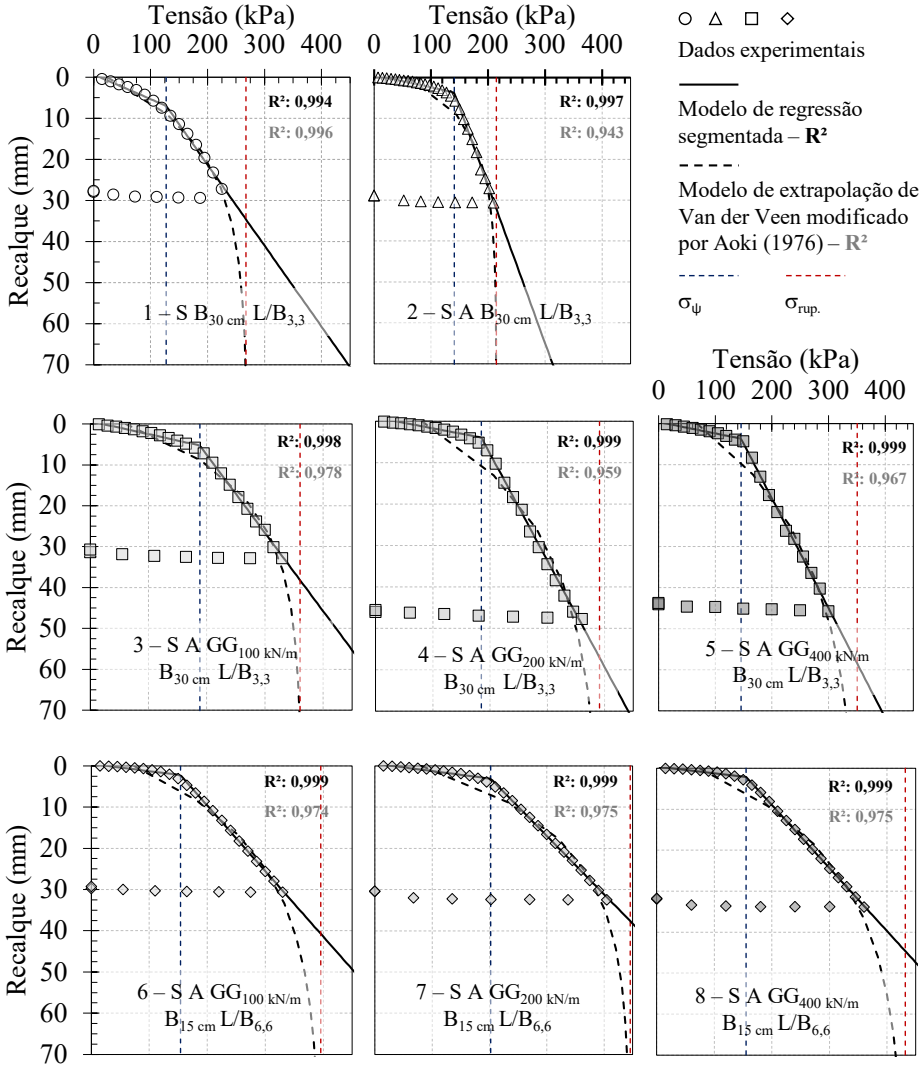


Figura 3. Curvas tensão–recalque dos modelos avaliados com ajustes por regressão segmentada e modelo de extrapolação para estimativa das tensões características.

O modelo de referência, correspondente ao solo sem reforço, apresentou tensão de inflexão de aproximadamente 127 kPa e tensão de ruptura de 268 kPa. A introdução da camada de areia compactada promoveu aumento da rigidez inicial do sistema, resultando em incremento da tensão de inflexão da ordem de 10%. Entretanto, a tensão de ruptura obtida para essa condição foi inferior à do solo natural, indicando

mudança no mecanismo de ruptura do sistema. Sendo para esse modelo, desenvolvido o mecanismo de ruptura geral, proporcionado pela elevada rigidez incrementada ao sistema pela adição da camada de areia compactada.

Para os modelos reforçados com a associação entre camada de areia e geogrelhas, observam-se aumentos expressivos nas tensões características. Os valores de tensão de inflexão variaram entre 146 e 202 kPa, correspondendo a incrementos entre 15% e 59% em relação ao modelo de referência. Já as tensões de ruptura variaram entre 350 e 445 kPa, representando aumentos de até 67%. Além do aumento das tensões mobilizadas, observa-se também alteração na forma das curvas tensão–recalque, com maior rigidez no trecho inicial e transição mais gradual para o regime plástico, indicando a atuação do reforço na redistribuição das tensões e na restrição das deformações do solo.

3.3 Influência do reforço na capacidade de suporte (BCR)

A Figura 4 apresenta os valores da Relação da Capacidade de Suporte para os diferentes modelos avaliados, considerando tanto a tensão de inflexão quanto a tensão de ruptura, sempre em relação ao modelo de referência sem reforço.

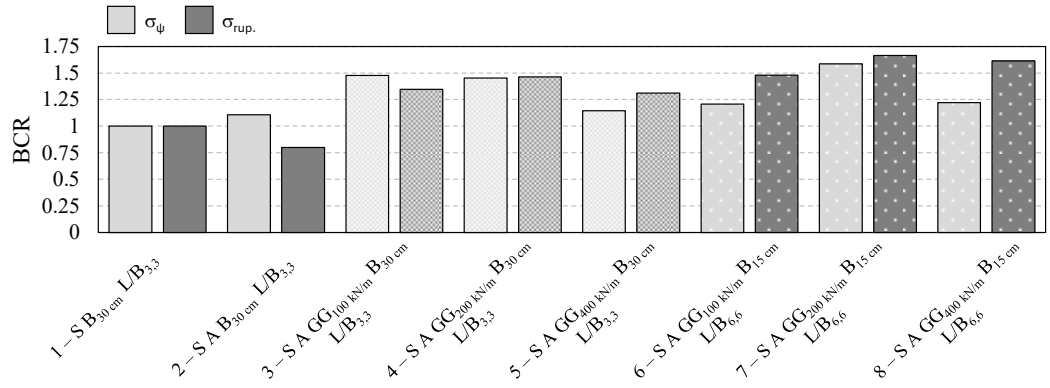


Figura 4. Relação da capacidade de suporte (BCR) dos modelos reforçados em relação ao solo de referência, considerando as tensões de inflexão e de ruptura.

Observa-se inicialmente que a simples introdução da camada de areia compactada resultou em valores de tensão de inflexão superiores ao modelo de referência, indicando aumento da rigidez inicial do sistema da ordem de 10%. Entretanto, para a tensão de ruptura, os valores obtidos foram inferiores aos do solo natural. Esse comportamento pode ser associado ao desenvolvimento de um mecanismo de ruptura generalizada, caracterizado por elevada rigidez para pequenas deformações, seguida por rápida redução da rigidez no trecho de plastificação.

Para os modelos reforçados com geogrelhas, os ganhos de capacidade de suporte foram significativamente maiores, atingindo valores de BCR de até 1,60 para a tensão de inflexão e 1,67 para a tensão de ruptura, observados no Modelo 7.

Outro aspecto relevante refere-se aos modelos ensaiados com placa de B = 30 cm. Nesses casos, observa-se que os valores de BCR apresentam tendência inversamente proporcional à rigidez das geogrelhas, de modo que reforços com menor resistência nominal apresentaram ganhos relativamente maiores de capacidade de suporte. Esse comportamento pode ser associado às condições de ancoragem do reforço. Para placas de maior diâmetro, a relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação (L/B) torna-se menor, reduzindo a extensão da zona de ancoragem disponível para mobilização da resistência à tração da geogrelha. Nessas condições, reforços mais rígidos exigem maiores deslocamentos para mobilizar plenamente sua resistência.

Quando foram utilizadas placas com diâmetro de 15 cm, aumentando-se consequentemente a relação L/B, observou-se alteração nesse comportamento. O maior comprimento relativo de ancoragem favoreceu a

interação solo–reforço e permitiu maior mobilização da resistência das geogrelhas. Ainda assim, nos níveis de deformação associados à tensão de inflexão, os ganhos de BCR decorrentes do aumento da rigidez do reforço permanecem limitados, indicando que a mobilização completa da resistência à tração ocorre apenas para níveis de deformação mais elevados.

3.4 Rigidez inicial do sistema solo-reforço

A influência da rigidez do reforço e da geometria do sistema pode ser analisada de forma mais clara a partir da Figura 5, que apresenta a relação entre a tensão de inflexão e o recalque correspondente para cada modelo ensaiado.

Observa-se que os modelos reforçados mobilizam tensões mais elevadas para níveis equivalentes de recalque quando comparados ao solo sem reforço, indicando aumento da rigidez inicial do sistema solo–fundação. Em média, a rigidez inicial dos modelos reforçados foi aproximadamente 1,5 vezes maior que a observada no modelo de referência para os ensaios realizados com placa de 30 cm, atingindo valores maiores a 2,0 vezes para os modelos ensaiados com placa de 15 cm.

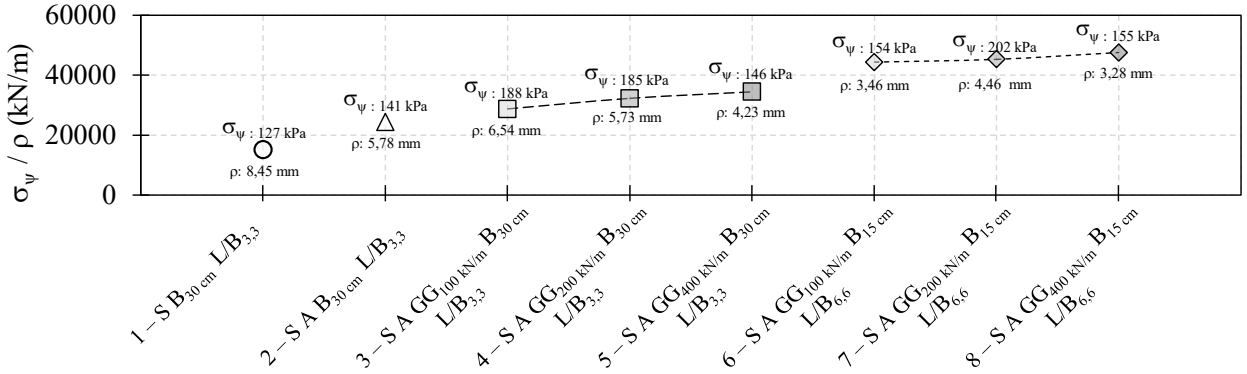


Figura 5. Relação entre a tensão de inflexão (σ_ψ) e o recalque correspondente para os modelos ensaiados.

Além disso, verifica-se que tanto o aumento da rigidez da geogrelha quanto o aumento da relação L/B contribuem para o incremento da rigidez inicial do sistema. Relações L/B mais elevadas favorecem o desenvolvimento de uma zona de ancoragem mais extensa, permitindo mobilização mais eficiente da resistência à tração do reforço e maior interação entre o solo, a camada de areia e a geogrelha.

De forma geral, os resultados indicam que o desempenho de fundações superficiais reforçadas depende não apenas da rigidez do geossintético, mas também das condições geométricas do sistema, particularmente da relação L/B, que controla o grau de mobilização da resistência do reforço.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo experimental em escala reduzida com o objetivo de avaliar a influência da utilização de uma camada de areia compactada e da inserção de geogrelhas no desempenho de fundações superficiais sobre um solo argiloso reconstituído. De modo geral, os procedimentos adotados para a reconstituição das camadas permitiram reproduzir de forma satisfatória as condições físicas representativas do solo em campo, garantindo condições consistentes para a avaliação do comportamento dos diferentes modelos analisados.

Os resultados experimentais indicaram que a introdução da camada de areia compactada altera o comportamento tensão–recalque do sistema solo–fundação, promovendo aumento da rigidez inicial do conjunto. Quando associada à utilização de geogrelhas, observou-se melhora significativa no desempenho do sistema, evidenciando a contribuição do reforço na redistribuição das tensões aplicadas e na restrição das deformações do solo.

Verificou-se ainda que o desempenho das fundações reforçadas não depende exclusivamente da rigidez do geossintético, mas também das condições geométricas do sistema. Em particular, a relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação (L/B) mostrou-se um parâmetro determinante para a mobilização efetiva da resistência à tração das geogrelhas. Modelos com menores relações L/B apresentaram limitações na mobilização do reforço, enquanto o aumento dessa relação favoreceu o desenvolvimento de uma zona de ancoragem mais eficiente e, consequentemente, maiores ganhos de capacidade de suporte.

Por outro lado, observou-se que geogrelhas com maior rigidez tendem a proporcionar maior rigidez inicial ao sistema solo–fundação, resultando em menores deformações para níveis de carregamento associados às condições de serviço. Dessa forma, os resultados evidenciam que a eficiência do reforço em fundações superficiais depende da combinação entre a rigidez do geossintético e as condições de ancoragem do sistema, sendo a relação L/B um parâmetro fundamental para a mobilização efetiva da resistência do reforço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo o apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489. *Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro.

Binquet, J., Lee, K. L. (1975) Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101 (GT12), p. 1241–1255.

Camapum de Carvalho, J., Gitirana Junior, G. F. N., Machado, S. L., Mascarenha, M. M. A., Silva Filho, F. C., Rodrigues, R. A. (orgs.) (2023). Solos não saturados no contexto geotécnico. 2ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS.

Falcão, P. (2021). Avaliação do impacto da inundação na resistência e deformabilidade de um solo laterítico e colapsível: estudo experimental e numérico. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS.

Fragaszy, R. J., Lawton, E. (1984) Bearing capacity of reinforced sand subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110 (10), p. 1500–1507.

Gomes, L. T. (2025). Mitigação do potencial de colapso em solos lateríticos por meio de reforço com geogrelhas. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS.

Helis, R., Mansouri, T., Abbeche, K. (2023) Behavior of a circular footing resting on sand reinforced with geogrid and grid anchors. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13 (1), p. 10216–10222.

Hou, J., Wang, Y., Zhang, Z., Li, C. (2023) Bearing capacity and mechanism of H–V geogrid reinforced foundations. *Polymers*, 15 (12), p. 2606.

Mittal, S. (2014) *An Introduction to Ground Improvement Engineering*. Scientific International Pvt. Ltd., New Delhi.

Palmeira, E. M. (2018) *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*. Oficina de Textos, São Paulo.

Tawfeeq, R. S., Salih, B. M. M. (2025) Advanced geogrid reinforcement strategies for improving bearing capacity and settlement control in shallow foundations. *Civil Engineering Journal*, 11 (2).

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

Wu, J., Liu, H., Zhang, Y. (2024) Bearing capacity and reinforcement mechanisms of horizontal–vertical geogrid in reinforced foundations. *Buildings*, 14 (6).

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/41

Exploring the Feasibility of Cohesive Soils in Reinforced Walls: A Review of Performance and Environmental Implications

Gabriel da Silva Silverio
PhD Student, São Carlos School of Engineering - University of São Paulo, São Carlos, Brazil, gabrielsilverio@usp.br

Nicole Hansen
PhD Student, São Carlos School of Engineering - University of São Paulo, São Carlos, Brazil, nicolehansen@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Associate professor, São Carlos School of Engineering - University of São Paulo, São Carlos, Brazil, jefferson@sc.usp.br

ABSTRACT: In the 1970s, geosynthetics began to be used as reinforcement elements, providing a viable alternative to concrete structures, mainly due to the lower costs of using soil as a construction material. However, for technical, geographical, and historical reasons, most studies on geosynthetic-reinforced walls have focused on using granular soils as backfill material. As a result, design guidelines and technical standards were developed with specific recommendations regarding the type of soil to be used, generally limiting the use of soils with fines. Often, however, in the areas where these structures are implemented, there is little or no availability of granular material, necessitating the transport of granular material—which increases costs and environmental impacts. In this context, the scarcity of granular materials due to increased demand from urban growth has highlighted the need for research on using cohesive soils in reinforced walls. Thus, this paper aims to review the technical literature to explore the performance of walls constructed with cohesive soils, the main environmental benefits of this usage, and the methods that consider soil cohesion in predicting the demand for reinforcements.

KEYWORDS: Geosynthetic-reinforced walls, cohesive soils, design methods, environmental benefits.

1 INTRODUCTION

Reinforced walls with geosynthetics (GRW) are defined as retaining solutions composed of compacted soil, facing elements, and drainage systems. The inclusion of passive geosynthetic reinforcements enhances stability through direct interaction with the soil. Since their inception, GRW have been recognised as efficient retaining solutions, offering economic and environmental benefits over the short, medium, and long term (Basu; Lee, 2021).

Over the past decades, the successful use of GRW in large-scale civil and infrastructure projects has spurred numerous studies comparing the economic viability of this solution with conventional systems involving concrete and steel. Results under various conditions have shown that GRW can be 25%–70% less expensive than traditional retaining walls, depending on factors such as foundation soil, backfill material, and wall height. A significant contributor to this cost efficiency is that geosynthetic reinforcements are more affordable than steel, accounting for only 15%–30% of the total structural cost (Christopher et al., 1990; Berg et al., 2009; Gupta et al., 2024).

As final decisions are often based on resource optimisation, many studies focus on highlighting the economic benefits of GRW while neglecting their environmental impact. However, with growing concerns about climate change and global climate agendas, sustainable development has become a key consideration in engineering projects (Damians et al., 2017; Zhu et al., 2022; Dąbrowska et al., 2023)

In this context, this paper aims to evaluate the use of geosynthetics combined with cohesive soils as an environmentally friendly alternative to conventional materials in retaining structures. The study explores and reviews the technical applicability of cohesive backfills, highlighting their environmental advantages, mechanical behavior, and the design methods required for reinforced walls using these materials.

2 APPLICABILITY OF COHESIVE SOILS AND ENVIRONMENTAL ADVANTAGES

To promote more sustainable and cost-effective practices, the use of local soils in the construction of geosynthetic-reinforced walls — even when these soils contain fine particles — has become a significant topic of discussion within the technical community. According to Malekmohammadi and Damians (2024), most of the published studies on reinforced walls originate from countries in the Northern Hemisphere, as shown in Figure 1, which illustrates the global distribution of research on geosynthetic-reinforced walls from 1990 to 2024.

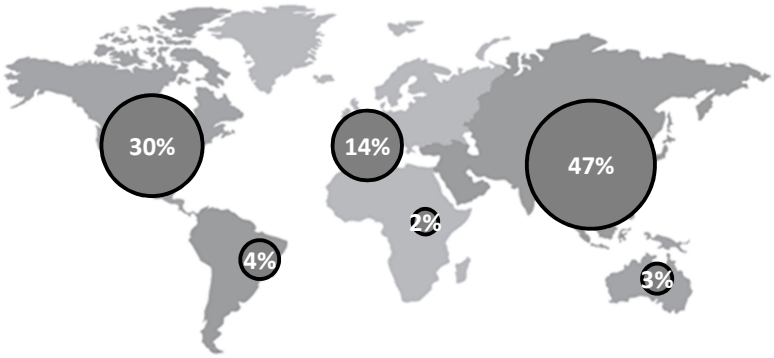


Figure 1. Distribution of scientific production about reinforced walls (1990-2024) according to Malekmohammadi and Damians (2024).

The figure shows that nearly all research has been conducted in regions with temperate climates and abundant granular soils. As a result, many countries have developed requirements for using soils as backfill materials, (Table 1. Standard recommendations for the backfill soil) presents some of these specifications drawn from design standards and guidelines.

Table 1. Standard recommendations for the backfill soil

Country	Material passing #200 (0.75mm)	Plasticity index	Reference
Australia	≤ 15%	≤ 12	(RTA, 2011)
Canada	≤ 12%	≤ 6	(CGS, 2023)
Hong Kong	≤ 10% (0.63mm)	≤ 20	(GEO, 2017)
UK	≤ 15% (0.63mm)	-	(BSI, 2010)
India	≤ 15%	≤ 6	(RTA, 2011)
	≤ 15%	≤ 6	(Berg et al., 2009)
USA	≤ 35%	≤ 20	(NCMA, 2010)
	≤ 15%	≤ 6	(FHWA, 2018)

However, in countries outside the Northern Hemisphere — especially tropical regions — the availability of clean, purely granular soils are more limited. As shown in Figure 2, there is a greater abundance of fine-grained or fine-granular soils. Thus, in many construction sites, whether in the Southern Hemisphere or even in some parts of the Northern Hemisphere, the soils encountered do not meet the specifications required by current design guidelines. Consequently, granular backfill often needs to be transported from distant locations, and in such cases, transportation costs can represent 50%–70% of the total

project cost. Therefore, using local marginal soils offers economic benefits and helps reduce greenhouse gas emissions associated with material transportation (Koerner; Koerner, 2011).

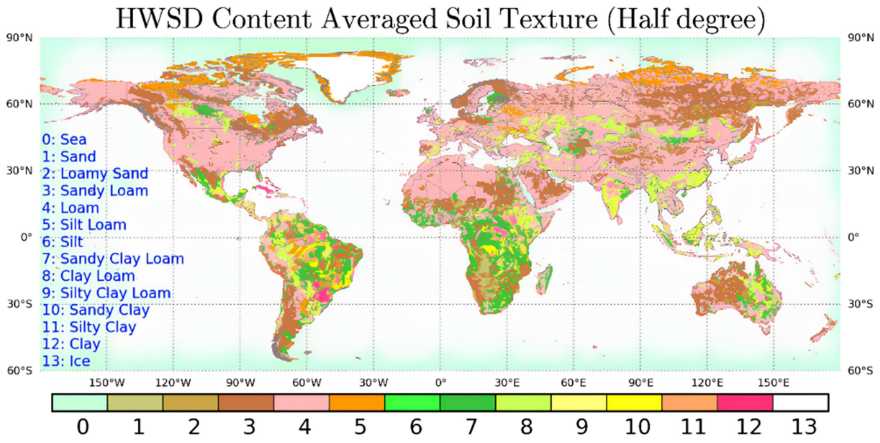


Figure 2. Global distribution of soil based on Harmonized World Soil Database (HWSD) estimated by averaging the contents of clay, sand, and silt (Koiral, 2013).

In light of growing concerns about climate change and the environmental impact of engineering projects, some authors have investigated how using marginal soils can make retaining structures more sustainable (Stucki et al., 2011; Koerner et al., 2019; Basu; Lee, 2021; Morsy; Thakeb, 2022; Zhu et al., 2022; Gupta et al., 2024). These studies concluded that geosynthetic-reinforced walls can contribute to 9 of the 17 United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), as shown in Table 2. Relationship Between Geosynthetic-Reinforced Walls and Sustainability. Due to the use of local soils and the lower energy required for installation compared to conventional concrete structures, GRW can reduce carbon footprint by 24% to 69%.

Regarding the global distribution of soil types, some researchers have discussed why fine-grained soils are often overlooked in the literature. One key reason is their lower drainage capacity, which can reduce shear strength and lead to significant deformations. Additionally, reinforcements may offer limited advantages due to soil cohesion since the drained shear strength governs the soil-reinforcement interface behaviour. Another important factor is that geosynthetics were originally developed to interact with granular soils. Early studies were conducted mostly in regions where such soils were readily available, and the resulting design methods and standards have since focused primarily on granular materials as suitable backfill (Zornberg et al., 1994; Gofar; Hanafiah, 2018).

Table 2. Relationship Between Geosynthetic-Reinforced Walls and Sustainability (Morsy; Thakeb, 2022).

SDG Goal	Contributions
Goals 3 (Good Health and Well-Being)	Reducing air pollution by minimising photochemical ozone production, acidification and eutrophication.
Goal 6 (Water)	Contribute to reduce water depletion.
Goal 7 (Energy)	This solution requires low energy for installation.
Goal 9 (Industry, Innovation and Infrastructure)	Contributes to lower CO_2 emissions and ODP values, supporting sustainable development.
Goal 11 (Sustainable Cities and Communities)	It is the most sustainable retaining solution, contributing positively to economic, social, and environmental outcomes.
Goal 12 (Responsabile Consumption and Production)	Contributes to the sustainable use of natural resources.
Goal 13 (Climate Action)	Promotes green initiatives and raises awareness about the applicability of new technologies and policies in combating climate change.

Goal 14 (Life Below Water)	Reducing water eutrophication and acidification.
Goal 14 (Life on Land)	Reducing land eutrophication and acidification.

3 MECHANICAL BEHAVIOUR AND DESIGN METHODS OF REINFORCED WALLS WITH COHESIVE SOILS

With the growing emphasis on sustainability and circular economy principles in civil engineering, professionals have been encouraged to develop solutions that minimize environmental impacts and optimize available materials (Palmeira et al., 2021). Despite this shift, the existing literature on geosynthetic-reinforced structures still presents gaps, such as the mechanical behaviour of reinforced walls with cohesive soils and the incorporation of soil cohesion into design methodologies. These challenges highlight the need for advancements in design approaches, especially those capable of estimating reinforcement loads under non-standard soil conditions used as backfill material (Giglio et al., 2023; Miyata, 2023).

Studies on the mechanical behaviour of geosynthetic-reinforced walls using marginal soils as backfill have shown that the drainage system is the most critical component of the structure, particularly during the rainy season (Koerner; Koerner, 2011; Koerner et al., 2019). In this regard, Koerner and Koerner (2011) emphasized the importance of proper drainage control methods in structures with cohesive backfill soils. According to the authors, among 82 wall failure cases due to excessive deformation or collapse, 68% were attributed to problems with either the internal drainage system (46%) or the external drainage system (22%).

Similarly, an assessment by Koerner and Koerner (2013), which analyzed 171 walls in the United States that experienced significant deformations, found that nearly 60% of those that reached failure or serviceability limits exhibited issues related to drainage. As supported by Yang et al. (2018), water in the reinforced zone leads to two main effects: increased pore water pressure and soil thrust against the facing, and a reduction in soil-geosynthetic interface strength due to loss of matric suction. Both effects contribute to global and local deformations.

In this sense, walls with an efficient drainage system and a backfill compacted to at least 95% of the maximum dry unit weight benefit from the development of matric suction, which enhances performance, often making it comparable or even superior to walls constructed with granular materials (Benjamim et al., 2007; Vahedifard et al., 2016). Marginal cohesive soils can exhibit a wide range of properties. Those with lower fine content typically show greater shear strength than soils with higher fine content. According to international guidelines (Table 1), the ideal backfill material should have low plasticity and a low percentage of fines. Although these recommendations are common globally, they may not always reflect local soil distributions. For instance, tropical soils—characterized by high fine content and low plasticity—can perform well mechanically when properly compacted, in contrast to soils formed in temperate regions (Raja et al., 2012).

Regarding the role of compaction in wall performance, Vahedifard et al. (2016) and Raja et al. (2012) noted that well-compacted fine-grained soils placed near optimum moisture content generate suction, resulting in a relatively strong interaction between the fill and geosynthetic reinforcement. Besides increasing soil strength, compaction also influences service performance. A numerical study by Meireles et al. (2022) on cohesive reinforced walls showed that increasing the heavy compaction distance from the face reduces reinforcement stresses, shifts maximum reinforcement tension points inward, and decreases horizontal face deformations. On the same topic, Riccio et al. (2014) monitored a highly instrumented 4.2 m-high block-faced geogrid wall built with fine-grained tropical soils. The study assessed reinforcement tension induced by soil compaction, matric suction, and horizontal face displacements. Results revealed that induced stresses from compaction, soil cohesion, and stiffness should not be neglected.

The numerical study by Guler et al. (2007) investigated the influence of cohesion on reinforcement loads, showing reduced reinforcement demands without localized shear-induced deformations. Similarly, Anderson et al. (2018) found that typical cohesive strengths around 10 kPa can reduce reinforcement stresses by 50% to 75%. Another critical mechanism is crack formation in the backfill soil caused by tensile stresses. Cracks may result from low tensile resistance, wetting-drying cycles, desiccation, or weathering. While geosynthetics help limit crack development, the presence of cracks can significantly compromise stability (Utili, 2013).

These findings demonstrate the complex mechanical behaviour of geosynthetic-reinforced walls due to interactions between multiple materials. Several methods have been developed to verify internal stability and determine the required reinforcement load to prevent rupture and sufficient length to avoid pullout. However, early methods considered only granular backfill soils, excluding fine-cohesive soils. As noted by some authors (Allen et al., 2003; Raja et al., 2012; Mandloi; Hegde, 2022), this oversight can lead to overdesigned structures or less optimized economic and environmental alternatives and full-scale instrumented walls and numerical models support analytical developments to address this gap. These approaches include limit equilibrium, service limit stress methods, and plasticity-based limit analysis to incorporate the beneficial effects of soil cohesion and matric suction.

Based on the traditional limit equilibrium approach, Zhang et al. (2021) proposed a stability analysis for geosynthetic-reinforced soil walls with cohesive soils, determining reinforcement loads and connection strength at the limit state. A parametric study evaluated the influence of design parameters (e.g., cohesion, friction angle, wall inclination, reinforcement length) and validated results against experiments and simulations, showing good agreement. Findings indicate that cohesive soils as backfill reduce required reinforcement strength and horizontal displacements, thus alleviating bulging. A small wall inclination (about 10°) significantly reduces reinforcement demands but increases connection strength, particularly at the base. Extending reinforcement length helps prevent compound failure and reduces lateral deformations and reinforcement stress.

Still within the limit state framework, Vahedifard et al. (2016) observed that measured reinforcement loads in the field are lower than predicted, largely due to design conservatism. This is attributed to factors such as toe resistance, soil dilation, underestimated shear strength, and suction effects. The authors aimed to quantify this discrepancy by incorporating suction stress into active earth pressure coefficients under unsaturated steady flow. Using a limit equilibrium-based effective stress model, the study compared results for marginal and high-quality backfills under various rainfall events and surcharge conditions. Ignoring suction led to overestimations—up to threefold for marginal soils and sevenfold for high-quality soils. Thus, suction stress plays a key role in increasing interface strength and reducing mobilized reinforcement loads. Similarly, Vahedifard et al. (2014) included lateral earth pressure thrusts from unstable slopes composed of c-ϕ soils under pseudo-static seismic loading. Their formulation incorporated tensile cracks, slope inclination, and batter effects, assuming a log-spiral failure surface. Comparisons with alternative limit equilibrium and upper-bound limit analysis methods showed that cracks could significantly decrease stability, while cohesion helps reduce reinforcement loads.

Using a service limit state approach, Ehrlich and Mitchell (1994) presented an internal design method incorporating cohesion, reinforcement stiffness, compaction effects, and soil stress–strain behaviour. Another method, by Allen and Bathurst (2015), builds upon FHWA (2018) by introducing a normalized cohesion coefficient, calibrated with instrumented walls, to reduce reinforcement loads proportionally to cohesion and unit weight.

Limit analysis of plasticity is another widely used approach. It determines required reinforcement by equating external work (due to self-weight and surcharge) with internal energy dissipation from soil, reinforcement, and facing elements. Cohesion contributes by increasing dissipation, thus reducing the reinforcement demand. In slope stability analysis, Abd and Utili (2017), applied the kinematic limit analysis method to cohesive slopes with geosynthetic reinforcement and cracks from climatic or collapse mechanisms. The results highlight the benefit of cohesion in reducing reinforcement needs and the destabilizing impact of cracks. Using the same kinematic approach, Chen et al (2018) analyzed 3D reinforced structures accounting for pore water pressures and cohesion. Results showed that well-drained, narrow-width structures, or those with higher cohesion, exhibit more stable behaviour than 2D design assumptions. Similarly, Xu et al (2019) explored 3D analyses with fine-granular soils under seismic excitation, demonstrating that plane-strain designs are often conservative.

Addressing crack presence, Utili (2013) employed kinematic limit analysis to provide rigorous upper bounds on collapse, considering slope inclination, crack depth and location, and water presence. Rigid rotational failure mechanisms showed up to 85% reduction in stability factors compared to planar models. Porbaha et al (2000) applied a similar approach to centrifuge models of reinforced walls, optimizing critical heights using the Constrained Simplex method. In the context of design optimization, Franco et al (2023) incorporated cohesion and face elements in a semi-analytical method based on limit analysis. A parametric

study on cohesion, friction angle, face batter, reinforcement length, and interface properties revealed that accounting for cohesion and facing elements could reduce reinforcement needs by 57% to 82%. However, tension cracks in highly cohesive soils remain critical due to their negative impact on stability. The study also found that the adopting common reinforcement lengths employed in the design of reinforced soil walls (0.6H and 07.H), resulted mostly in two types of critical failure modes: internal failure with rupture of all layers of reinforcement and compound failure with the crossed layers failing in tensile rupture and pullout.

To assess unsaturated conditions and suction effects, Chehade et al. (2019) developed a method using the upper-bound theorem of limit analysis under pseudodynamic seismic loading. The parametric study showed that required reinforcement strength varies with friction angle, water table, suction distribution, and soil type. A comparison between saturated and unsaturated conditions revealed a significant decrease in reinforcement demand in unsaturated soils. In line with this, Chehade et al. (2020) proposed a method considering cracks under seismic action and evaluated their effect on reinforcement quantity.

3 CONCLUSIONS

The scarcity of granular material directly affects the construction of geosynthetic-reinforced walls since, even when this type of soil is available, the distance between the borrow site and the application location is generally large, resulting in additional costs and an increased carbon footprint due to transportation. Thus, the need arises to incorporate cohesive soils into constructing reinforced walls to maintain competitive advantages, which requires a revision of design practices.

Therefore, through the brief review proposed in this study, some conclusions regarding the use of cohesive soils in geosynthetic-reinforced walls are:

i. GRW demonstrate significant economic advantages, with costs up to 70% lower compared to conventional solutions. They also reduce the carbon footprint by up to 69%, aligning with the United Nations' sustainability goals.

ii. Using marginal and cohesive soils can reduce costs associated with material transportation and greenhouse gas emissions, provided they are properly designed and supported by an efficient drainage system.

iii. Existing methods, primarily developed for granular soils, do not adequately incorporate cohesive soil properties, such as cohesion and suction, creating opportunities for further optimization and improvement in design practices.

iv. The failure to ensure a robust drainage system is a key factor contributing to the collapse of GRWs using cohesive soils, emphasizing the importance of proper design and sufficient soil compaction.

v. Integrating analytical solutions, numerical studies, and full-scale wall monitoring is essential to validating the use of cohesive soils in GRWs and ensuring safe, cost-effective, and sustainable designs.

REFERENCES

Abd, A. H., Utili, S. (2017) Design of Geosynthetic-Reinforced Slopes in Cohesive Backfills. Geotextiles and Geomembranes, 45 (6), p. 627-641.

Allen, T. M., Bathurst, R. J. (2015) Improved Simplified Method for Prediction of Loads in Reinforced Soil Walls. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141 (11), p. 1-14.

Allen, T. M., et al. (2003) A New Working Stress Method for Prediction of Reinforcement Loads in Geosynthetic Walls. Canadian Geotechnical Journal, 40 (5), p. 976-994.

Anderson, D. G., et al. (2008) Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes, and Embankments. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Basu, D., Lee, M. A. (2021) Sustainability Considerations in Geosynthetic Applications. In: Shukla, S. K. (ed.). ICE Handbook of Geosynthetic Engineering: Geosynthetics and Their Applications. 3rd ed., Ice Publishing, Fitchburg, USA, p. 427-457.

Benjamim, C. V. S., et al. (2007) Field Monitoring Evaluation of Geotextile-Reinforced Soil-Retaining Walls. Geosynthetics International, 14 (2), p. 100-118.

Berg, R. R., et al. (2009) Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I. Federal Highway Administration, [S.l.], 306 p.

British Standards Institute (BSI) (2010). BS 8006-1:2010: Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills. UK.

Chehade, H., et al. (2019) Seismic Analysis of Geosynthetic-Reinforced Retaining Wall in Cohesive Soils. Geotextiles and Geomembranes, 47 (3), p. 315-326.

Chehade, H., et al. (2020) Upper Bound Seismic Limit Analysis of Geosynthetic-Reinforced Unsaturated Soil Walls. Geotextiles and Geomembranes, 48 (4), p. 419-430.

Chen, Y., et al. (2018) Required Unfactored Geosynthetic Strength of Three-Dimensional Reinforced Soil Structures Comprised of Cohesive Backfills. Geotextiles and Geomembranes, 46 (6), p. 860–868.

Christopher, B. R., et al. (1990) Reinforced Soil Structures: (Vol. 1: Design and Construction Guidelines). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Springfield, USA, 306 p.

Dąbrowska, J., et al. (2023) Sustainability of Geosynthetics-Based Solutions. Environments, 10 (4), p. 64.

Damians, I. P., et al. (2017) Environmental Assessment of Earth Retaining Wall Structures. Environmental Geotechnics, 4 (6), p. 415-431.

Ehrlich, M., Mitchell, J. K. (1994) Working Stress Design Method for Reinforced Soil Walls. Journal of Geotechnical Engineering, 120 (4), p. 625–645.

Federal Highway Administration (FHWA) (2018). FHWA-HRT-17-080: Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems. USA.

Franco, Y. B., et al. (2023) Design of Reinforced Cohesive Soil Walls Accounting for Wall Facing Contribution to Stability. Géotechnique, 73 (8), p. 667-688.

Geotechnical Engineering Office (GEO) (2017). Geoguide 6: Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design. Civil Engineering and Development Department, Hong Kong.

Giglio, C., et al. (2023) A Scientometric Study of LCA-Based Industrialization and Commercialization of Geosynthetics in Infrastructures. Applied Sciences, 13 (4), p. 2328.

Gofar, N., Hanafiah (2018) Contribution of Suction on the Stability of Reinforced-Soil Retaining Wall. MATEC Web of Conferences, 195, p. 03004.

Guler, E., et al. (2007) Numerical Analysis of Reinforced Soil-Retaining Wall Structures with Cohesive and Granular Backfills. Geosynthetics International, 14 (6), p. 330-345.

Gupta, A. K., et al. (2024) Life Cycle Assessment (LCA) of MSE Wall vis-à-vis Conventional Retaining Wall: A Comparative Study. International Journal of Environmental Science and Technology, 21 (12), p. 8141-8156.

Koerner, R., et al. (2019) Relative Sustainability (i.e., Embodied Carbon) Calculations with Respect to Applications Using Traditional Materials Versus Geosynthetics. Geosynthetic Institute, Folsom, p. 1-16.

Koerner, R. M., Koerner, G. R. (2011) The Importance of Drainage Control for Geosynthetic Reinforced Mechanically Stabilized Earth Walls. Journal of Geoengineering, 6 (1), p. 3-13.

Koerner, R. M., Koerner, G. R. (2013) A Data Base, Statistics and Recommendations Regarding 171 Failed Geosynthetic Reinforced Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls. Geotextiles and Geomembranes, 40, p. 20-27.

Koiral, S. (2013) Soil Texture Map. Available at: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~sujan/research/gswp3/soil-texture-map.html. Accessed at: 28 Nov. 2024.

Malekmohammadi, K., Damians, I. P. (2024) A Bibliometric Review of Reinforced Soil Wall Research Topics. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10 (3), p. 1–16.

Mandloi, P., Hegde, A. (2022) Performance Evaluation of Reinforced Earth Walls with Sustainable Backfills Subjected to Railway Loading. Frontiers in Built Environment, 8, p. 1-13.

Meireles, L., et al. (2022) Numerical Evaluation of the Influence of Compaction and Soil Strength Parameters on GRSW. Soils and Rocks, 45 (4), p. 1–11.

Miyata, Y. (2023) Research and Practice on Geosynthetic MSE Walls: Past, Present and Future (Bathurst Lecture). In: Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet, CRC Press, p. 46-69.

Morsy, K. M., Thakeb, H. (2022) Comparative Evaluation of the Environmental Impacts of Geosynthetic Mechanically Stabilized Earth Walls. Journal of Cleaner Production, 374, p. 133912.

National Concrete Masonry Association (2010). Design Manual for Segmental Retaining Walls. Herndon, USA.

Palmeira, E. M., et al. (2021) Sustainable Solutions with Geosynthetics and Alternative Construction Materials—A Review. Sustainability, 13 (22), p. 12756.

Porbaha, A., et al. (2000) Upper Bound Estimate of Scaled Reinforced Soil Retaining Walls. Geotextiles and Geomembranes, 18 (6), p. 403-413.

Raja, J., et al. (2012) Designing with Marginal Fills: Understanding and Practice. In: European congress of Geosynthetics, 5., Valencia. Proceedings... International Geosynthetics Society (IGS), p. 1-7.

Riccio, M., et al. (2014) Field Monitoring and Analyses of the Response of a Block-Faced Geogrid Wall Using Fine-Grained Tropical Soils. Geotextiles and Geomembranes, 42 (2), p. 127-138.

Roads and Traffic Authority (RTA) (2011). R57: Design of Reinforced Soil Walls. 2nd ed., Roads and Traffic Authority, Australia.

Stucki, M., et al. (2011) Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional Construction Materials. European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM), Uster.

The Canadian Geotechnical Society (CGS) (2023). Canadian Foundation Engineering Manual. 5th ed., Canada.

Utili, S. (2013) Investigation by Limit Analysis on the Stability of Slopes with Cracks. Géotechnique, 63 (2), p. 140–154.

Vahedifard, F., et al. (2014) Impact of Cohesion on Seismic Design of Geosynthetic-Reinforced Earth Structures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140 (6), p. 1–12.

Vahedifard, F., et al. (2016) Role of Suction Stress on Service State Behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures. Transportation Geotechnics, 8, p. 45-56.

Xu, J., et al. (2019) Stability Analysis of 3D Geosynthetic–Reinforced Earth Structures Composed of Nonhomogeneous Cohesive Backfills. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 126, p. 105768.

Yang, K.-H., et al. (2018) Numerical Evaluation of Reinforced Slopes with Various Backfill-Reinforcement-Drainage Systems Subject to Rainfall Infiltration. Computers and Geotechnics, 96, p. 25-39.

Zhang, F., et al. (2021) Analytical Method to determine reinforcement loads of geosynthetic-reinforced retaining wall. Jornal of Central South University, 52 (12), p. 4238-4251.

Zhu, Y., et al. (2022) Embodied Energy and Carbon Emissions Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Structures. Journal of Cleaner Production, 370, p. 133510.

Zornberg, J. G., et al. (1994) Reinforced Soil Structures with Poorly Draining Backfills. Part I: Reinforcement Interactions and Functions. Geosynthetics International, 1 (2), p. 103-147.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/42

Geocélulas em Infraestrutura Rodoviária: Avanços, Desafios e Oportunidades

Renan Barbosa Neves
Universidade de São Paulo – Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos/SP.

Jefferson Lins da Silva
Universidade de São Paulo – Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos/SP.

Clever Aparecido Valentin
Universidade de São Paulo – Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos/SP.

RESUMO: Geocélulas têm sido utilizadas no reforço de pavimentos rodoviários para melhorar o desempenho de camadas granulares sobre subleitos fracos e viabilizar materiais reciclados. Este estudo revisa criticamente estudos recentes (2021-2026), organizando as evidências por escala de ensaio, mecanismo de atuação, material de preenchimento e limitações de projeto. A literatura evidencia a redução de trilha de roda, redistribuição de tensões e aumento da rigidez aparente em bases com agregados naturais, *RAP*, areia dragada, *RCD/CDW* e materiais alternativos. Todavia, o desempenho é condicionado pela compactação, cobertura, altura e geometria das células, condição do subleito, extensão lateral, durabilidade das juntas e interação solo-geocélula, restringindo a transferência direta entre laboratório, escala real e campo.

PALAVRAS-CHAVE: Geocélulas; Pavimentação; Carregamento repetido; Materiais reciclados; Limitações de projeto.

ABSTRACT: Geocells have been used in road pavement reinforcement to improve granular layer performance over weak subgrades and enable recycled materials. This paper critically reviews recent studies (2021-2026), organizing the evidence by testing scale, reinforcement mechanism, infill material and design limitations. The literature shows rutting reduction, stress redistribution and increased apparent stiffness in bases with natural aggregates, reclaimed asphalt pavement (*RAP*), dredged sand, construction and demolition waste and alternative materials. However, performance is governed by compaction, cover thickness, cell height and geometry, subgrade condition, lateral extension, junction durability and soil-geocell interaction, limiting direct transfer among laboratory, full-scale and field conditions.

KEYWORDS: Geocells; Pavement reinforcement; Repeated loading; Recycled materials; Design limitations.

1 INTRODUÇÃO

Subleitos fracos ou expansivos, maiores cargas de tráfego e restrições ao uso de agregados naturais intensificam as deformações permanentes e reduzem a vida útil dos pavimentos. Nesse contexto, as geocélulas atuam como sistemas tridimensionais de confinamento, aumentando a rigidez aparente de camadas granulares, ampliando a distribuição de tensões e restringindo deslocamentos laterais do preenchimento (Han *et al.,* 2011; Thakur *et al.,* 2012; Suku *et al.,* 2016; Gedela *et al.,* 2021).

Apesar dos ganhos reportados, o desempenho de sistemas reforçados depende do subleito, geometria da geocélula, preenchimento, compactação, cobertura, extensão lateral e condições ambientais (Khan e Puppala, 2023; Banerjee *et al.,* 2024a, 2024b, 2024c; Banerjee *et al.,* 2025; Badiger *et al.,* 2026; Priyadarshee *et al.,* 2026). Assim, este artigo revisa criticamente o uso de geocélulas em infraestrutura rodoviária, discutindo implicações para projeto, execução e sustentabilidade.

2 METODOLOGIA DA REVISÃO

A revisão foi estruturada a partir de estudos sobre geocélulas em bases, sub-bases e sistemas rodoviários submetidos a carregamentos estáticos, repetidos ou móveis. Os trabalhos foram classificados por: (i) escala de avaliação — laboratório, grande escala/ensaios acelerados de pavimentos (*APT*, *Accelerated Pavement Testing*) e campo instrumentado; (ii) material de preenchimento — agregados naturais, material asfáltico reciclado (*RAP*, *Reclaimed Asphalt Pavement*), areia dragada, resíduos de construção e demolição (*RCD*; *CDW*, *Construction and Demolition Waste*), agregados reciclados e materiais locais; e (iii) indicadores de desempenho — trilha de roda, deformação permanente, tensão no subleito, rigidez/módulo, fatores de melhoria e sustentabilidade. Devido às diferenças de geometria, condições do subleito, número de ciclos, critério de ruptura e instrumentação, os resultados foram interpretados como tendências comparativas, evitando-se a transferência direta de fatores de benefício.

3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DAS GEOCÉLULAS

O desempenho de bases com geocélulas resulta da mobilização combinada de mecanismos dependentes do nível de deformação e da rigidez do sistema geocélula-preenchimento. O confinamento lateral ocorre desde pequenas deformações; a dispersão de tensões e a resposta tipo laje dependem da rigidez composta; e o efeito membrana tende a ser relevante apenas em deformações elevadas. Assim, a melhoria decorre da resposta integrada entre subleito, geossintético, material de preenchimento, cobertura e qualidade de execução (Avesani Neto *et al.,* 2013; Gedela *et al.,* 2021; Banerjee *et al.*, 2024c).

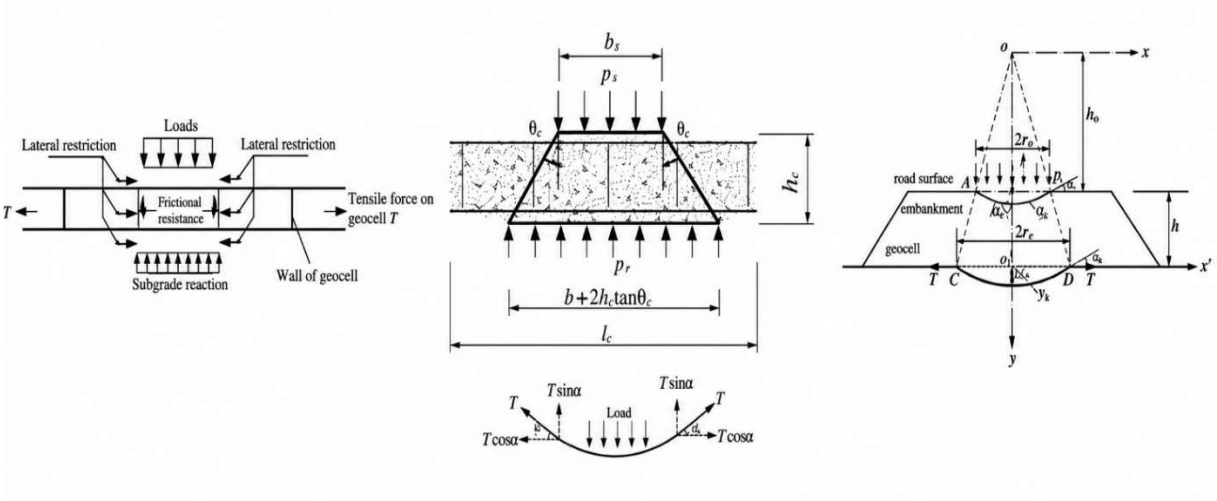


Figura 1. Mecanismos de reforço por geocélulas (Biswas e Krishna, 2017).

Confinamento e interação solo-geocélula

O mecanismo predominante é o confinamento tridimensional promovido pelas paredes celulares, que restringem a dilatação lateral do preenchimento e mobilizam atrito na interface solo-parede. Sua eficiência aumenta com compactação adequada, granulometria compatível com a abertura das células e parede suficientemente rugosa. Em *RAP, RCA e CDW*, a heterogeneidade, o ligante asfáltico e a suscetibilidade à quebra podem elevar a deformabilidade, tornando o controle executivo determinante (Thakur *et al.,* 2012; Khan e Puppala, 2023; Badiger *et al.,* 2026).

Dispersão de tensões (efeito laje/raft)

A dispersão de tensões resulta do comportamento do conjunto geocélula-preenchimento como camada semirrígida, capaz de ampliar a área carregada e reduzir tensões no subleito. Ensaios de placa com DIC

indicaram que altura e rugosidade da geocélula controlam o ângulo de dispersão e permitem estimar o espalhamento por relações geométricas (Gedela *et al.,* 2021). Altura, formato, resistência das juntas e textura superficial também afetam a eficiência de confinamento e a distribuição de tensões (Banerjee *et al.,* 2024b; Banerjee *et al.,* 2026).

Membrana e flexão sob deformações maiores

Sob deformações elevadas, a camada reforçada pode apresentar resposta tipo laje e, posteriormente, comportamento semelhante ao de membrana tensionada, transferindo parte do carregamento por tração nas paredes celulares. Essa mobilização não deve ser assumida automaticamente no dimensionamento, pois depende da deformação acumulada, espessura da base, nível de carregamento e integridade das juntas. Em bases de RAP, Thakur *et al.* (2012) observaram resposta tipo laje em seções espessas e mobilização progressiva do efeito membrana em seções delgadas.

4 EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS E DE CAMPO

A interpretação das evidências deve considerar escala e critério de comparação. Ensaios laboratoriais isolam variáveis como altura, preenchimento e cobertura; ensaios em grande escala/*APT* reproduzem melhor o tráfego; e estudos de campo incorporam variabilidade construtiva, clima e manutenção. A Figura 2 resume essa organização.



Figura 2. Escalas de avaliação considerada na revisão deste estudo.

Laboratório – ensaios de placa e carregamento repetido

Ensaios de placa e carregamento repetido evidenciam redução de deformações resilientes/permanentes e de tensões na interface base-subleito, com possibilidade de redução de espessura quando mantido desempenho equivalente (Suku *et al.,* 2016; Thakur et al., 2012). A resposta é controlada pela altura da geocélula, geotêxtil separador, geometria, arranjo em camadas e preenchimento, incluindo *RAP, CDW/RAP* e fibras naturais (Sheikh e Shah, 2020; Banerjee *et al.,* 2024a, 2024b; Raveendran *et al*., 2025; Badiger *et al*., 2026).

Escala real/APT – carga móvel e tráfego acelerado

Ensaios em escala real e *APT* confirmam essas tendências sob condições mais representativas de carregamento móvel. Em bases com *RAP*, Han *et al.* (2011) demonstraram que a comparação entre seções exige compactação equivalente, enquanto Pokharel *et al.* (2011) observaram desempenho equivalente ou superior de bases

reforçadas mais delgadas sobre subleitos fracos. Em areia dragada, Tabatabaei Aghda *et al.* (2019) verificaram aumento de capacidade e redução de trilha de roda com cobertura granular adequada. Estudos recentes ampliaram a análise para solos expansivos, camadas in situ e geocélulas recicladas, incluindo custo, módulo e emissões (Khan e Puppala, 2023; Avesani Neto *et al.,* 2025; Banerjee *et al.,* 2025; Banerjee *et al.,* 2026).

Campo instrumentado – monitoramento de desempenho

Os estudos de campo, embora menos numerosos, são essenciais para validar a técnica sob umidade variável, compactação real, tráfego acumulado e manutenção. Khan *et al.* (2020) observaram menores tensões verticais médias em bases de *RAP* reforçadas sobre subleito expansivo. Em três anos de monitoramento, Khan e Puppala (2023) reportaram redução mínima de 36% na deformação permanente, aumento de 20% no módulo da camada com *RAP* e redução estimada de custo e emissões. Banerjee *et al.* (2025) indicaram desempenho superior da combinação entre geocélula e subleito tratado com cal em solo expansivo.

Tabela 1. Estudos sobre geocélulas em infraestrutura rodoviária e limitações associadas.

Ano	Autor(es)	Tema principal	Conclusão principal
2019	Tabatabaei Aghda *et al.*	Escala real com areia dragada	Aumentou capacidade e reduziu trilha de roda; resposta dependente da cobertura granular.
2020	Sheikh e Shah	RAP sobre subleito fraco	Altura da geocélula e geotêxtil controlaram capacidade, tensão no subleito e distribuição de cargas.
2021	Gedela *et al.*	DIC e mecanismo de distribuição	Altura e rugosidade controlaram o ângulo de dispersão; DIC mapeou deslocamentos.
2021	Li *et al.*	RCD/CDW em base composta	Reduziu deslocamentos, elevou módulo resiliente e melhorou difusão de tensões em bases com RCD.
2022	Shafiee-Panah *et al.*	RCA sob cargas de roda	RCA reforçado apresentou maior resistência à trilha de roda.
2023	Khan e Puppala	Campo com RAP e ciclo de vida	Monitoramento de três anos indicou menor deformação, maior módulo e redução de custo/CO2.
2024	Banerjee *et al.*	Geometria e múltiplas camadas	Altura, formato, arranjo e preenchimento controlaram deformações, tensões e rigidez.
2025	Avesani Neto *et al.*	Pista experimental e viga Benkelman	Ensaios in situ indicaram aumento de rigidez, condicionado ao tamanho do bolso.
2025	Banerjee *et al.*	Campo sobre solo expansivo	Geocélula + cal elevou capacidade, módulo e vida de serviço.
2025	Raveendran *et al*.	Geocélula natural de fibra de coco	Sob carga repetida, reduziu deformação acumulada e aumentou módulo resiliente.
2026	Badiger *et al.*	CDW/RCA/RAP em sub-base granular	Reduziu recalque plástico e pressão residual, favorecendo materiais reciclados.
2026	Banerjee *et al.*	Grasspaver-geocell reciclado	Melhorou capacidade, mas ficou abaixo da geocélula convencional por limitações de geometria/junta.
2026	Priyadarshee *et al*.	Revisão de parâmetros e limitações	Destaca escala, juntas, fluência e envelhecimento como lacunas de previsão.

A Figura 3 sintetiza tendências de *TBR* e deformação permanente em estudos selecionados. Como os valores dependem de subleito, espessura, preenchimento, geometria, compactação, número de ciclos e critério de término, devem ser interpretados como indicadores comparativos, e não como parâmetros universais de projeto.

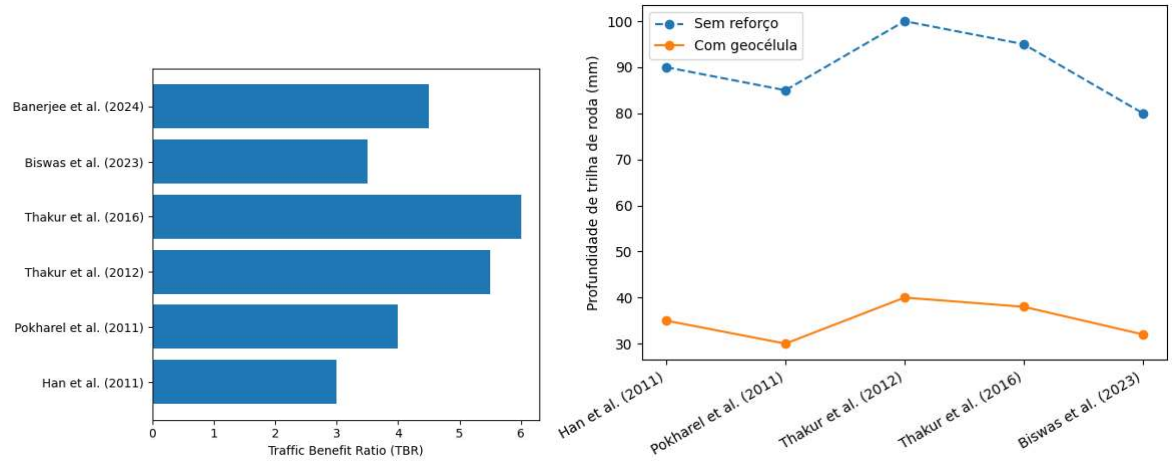


Figura 3 – Síntese comparativa de fatores de benefício ao tráfego (TBR) e de trilha de roda/deformação permanente em bases com e sem geocélulas.

5 MATERIAIS ALTERNATIVOS E SUSTENTABILIDADE

Geocélulas podem viabilizar materiais alternativos e locais quando o preenchimento é compatível com o confinamento celular. A solução deve ser avaliada como sistema composto por geocélula, preenchimento, cobertura, subleito, tráfego e ambiente, e não como simples substituição de agregados naturais.

Recycled Asphalt Pavement (RAP)

O RAP pode apresentar elevada deformação permanente como base não ligada, devido ao ligante asfáltico e à variabilidade granulométrica. Ensaios em caixa, *APT* e campo indicam que o confinamento tridimensional reduz deformabilidade e tensões transmitidas ao subleito, favorecendo seu uso sobre subleitos fracos (Han *et al.,* 2011; Thakur *et al.,* 2012; Thakur *et al.,* 2016; Sheikh e Shah, 2020; Khan e Puppala, 2023). O desempenho, contudo, depende da compactação, espessura da camada reforçada, relação cobertura/altura da geocélula e extensão lateral; Khan e Puppala (2023) recomendaram extensão superior a 0,90 m além da região de carregamento.

Areia dragada, agregados reciclados e materiais locais

Areia dragada, RCA, CDW e solos locais podem se beneficiar do confinamento quando a granulometria permite preenchimento adequado e a compactação é controlada. Tabatabaei Aghda *et al.* (2019) demonstraram aumento de capacidade e menor trilha de roda em areia dragada com geocélula e cobertura granular. Li et al. (2021), Shafiee-Panah *et al.* (2022) e Badiger *et al.* (2026) também observaram melhora da resposta mecânica de bases recicladas, com redução de recalques plásticos e pressões residuais. A principal limitação é a variabilidade de origem, forma dos grãos e resistência à quebra, exigindo caracterização prévia e critérios de aceitação em campo.

Geocélulas naturais/recicladas e avaliação de sustentabilidade

Geocélulas naturais ou recicladas também vêm sendo avaliadas. Raveendran *et al.* (2025) reportaram menor deformação permanente e maior módulo resiliente em subleito arenoso reforçado com geocélulas de fibra de coco, sugerindo aplicação em vias de baixo volume. Banerjee *et al.* (2026) observaram melhora com *grasspaver-geocell* de *HDPE* (*High-Density Polyethylene*) reciclado, embora inferior à geocélula convencional devido à menor altura, resistência de junta e textura superficial. Em termos ambientais, os ganhos devem ser avaliados em ciclo de vida, considerando produção polimérica, redução de agregados, transporte, vida útil e manutenção (Raja *et al.,* 2015; Khan e Puppala, 2023; Dąbrowska *et al.,* 2023).

6 LIMITAÇÕES DOS ESTUDOS E IMPLICAÇÕES PARA PROJETO

Comparabilidade, escala experimental e instrumentação

A principal limitação da literatura é a comparação direta entre resultados de laboratório, APT, ensaios de placa, rodas móveis e campo instrumentado. Em modelos reduzidos, efeitos de borda, relação célula/granulometria, rigidez da caixa e nível de tensão podem superestimar o confinamento. Priyadarshee *et al.* (2026) destacam que escala, durabilidade de juntas, fluência, degradação cíclica e envelhecimento ambiental ainda são pouco representados. Assim, TBR, RIF, MIF e ângulos de dispersão devem ser usados como indicadores internos a cada estudo, não como parâmetros universais.

Execução, geometria e durabilidade

A variabilidade de desempenho está associada ao controle executivo e à geometria do reforço. Compactação equivalente, cobertura, altura da célula, tamanho do bolso, rugosidade, resistência das juntas e extensão lateral são parâmetros determinantes (Han *et al.,* 2011; Gedela *et al.,* 2021; Khan e Puppala, 2023; Banerjee *et al.,* 2024b). Coberturas delgadas podem concentrar tensões, enquanto coberturas excessivas retardam a mobilização do confinamento. A durabilidade das juntas e a perda de rigidez por fluência/envelhecimento devem ser consideradas em aplicações permanentes.

Em projetos, persiste a lacuna entre evidências experimentais e métodos mecanístico-empíricos. Métodos de capacidade de carga com confinamento e dispersão fornecem base conceitual (Avesani Neto *et al.,* 2013), mas exigem calibração para subleito, preenchimento, geometria, tráfego e clima local. Critérios de desempenho - trilha de roda, tensão admissível no subleito, módulo mínimo e durabilidade são mais adequados do que fatores médios de melhoria.

7 OPORTUNIDADES E PERSPECTIVAS FUTURAS

As principais oportunidades envolvem condições em que o confinamento tridimensional atende simultaneamente à demanda estrutural e à disponibilidade de materiais: subleitos fracos ou expansivos, estradas de baixo volume, vias não pavimentadas, acessos industriais, *haul roads*, bases com *RAP* e agregados reciclados. Nesses casos, geocélulas podem viabilizar materiais locais/reciclados, reduzir deformações e diminuir a demanda por agregados naturais.

Pesquisas futuras devem priorizar monitoramento de campo de longo prazo, controle de umidade e temperatura, fluência e fadiga das juntas, comparação entre geocélulas convencionais, naturais e recicladas e análises de ciclo de vida no contexto brasileiro. Também são necessários bancos de dados para calibrar modelos mecanístico-empíricos com parâmetros mensuráveis em obra.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão evidencia que geocélulas melhoram bases granulares e recicladas por confinamento tridimensional, aumento da rigidez aparente e dispersão de tensões. Estudos laboratoriais, *APT* e de campo indicam redução de trilha de roda, menores tensões no subleito e potencial de uso de *RAP*, areia dragada, *RCA, CDW* e materiais locais. Entretanto, os benefícios dependem de preenchimento, compactação, geometria, cobertura, subleito, durabilidade e critério de projeto. A consolidação da técnica requer calibração baseada em desempenho, dados de campo de longo prazo e avaliação de ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

Avesani Neto, J.O., Bueno, B.S., Futai, M.M. (2013) A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell. Geosynthetics International, 20(3), 129-142.

Avesani Neto, J.O., Albuquerque, M.P., Pérez, M.C.I., Zornberg, J.G. (2025) Experimental and analytical evaluation of elastic modulus and MIF in geocell-reinforced granular layers using Benkelman Beam tests. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 11, 64. https://doi.org/10.1007/s40891-025-00670-7.

Badiger, M., Mamatha, K.H., Dinesh, S.V. (2026) Use of geocell for reinforcing CDW in GSB of flexible pavements: An experimental investigation. International Journal of Pavement Research and Technology, 19, 769-791. https://doi.org/10.1007/s42947-024-00490-4.

Banerjee, S., Manna, B., Shahu, J.T. (2024a) Behaviour of geocell reinforcement in a multi-layered flexible pavement under repeated loading. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10, 34. https://doi.org/10.1007/s40891-024-00541-7.

Banerjee, S., Manna, B., Shahu, J.T. (2024b) Experimental investigation of the geometry of geocell on the performance of flexible pavement under repeated loading. Geotextiles and Geomembranes, 52(4), 654-670. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.03.007.

Banerjee, S., Manna, B., Shahu, J.T. (2024c) Geocell as a Promising Reinforcement Technique for Road Pavement: A State of the Art. Indian Geotechnical Journal, 54(4), 1644-1665. https://doi.org/10.1007/s40098-023-00818-0.

Banerjee, S., Manna, B., Shahu, J.T. (2025) Performance evaluation of geocell-reinforced pavements overlying black cotton soil. Geotextiles and Geomembranes, 53(5), 1076-1093. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2025.04.004.

Banerjee, S., Manna, B., Shahu, J.T. (2026) Utilizing grasspaver-geocell as a recycled reinforcement material in flexible pavement base layers: A field investigation. Journal of Materials in Civil Engineering, 38(3), 04026001. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-21390.

Biswas, A., Krishna, A.M. (2017) Geocell-reinforced foundation systems: a critical review. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 3, 17. https://doi.org/10.1007/s40891-017-0093-7.

Dąbrowska, J., Kiersnowska, A., Zięba, Z., Trach, Y. (2023) Sustainability of Geosynthetics-Based Solutions. Environments, 10, 64.

Gedela, R., Kalla, S., Sudarsanan, N., Karpurapu, R. (2021) Assessment of load distribution mechanism in geocell reinforced foundation beds using Digital Imaging Correlation Techniques. Transportation Geotechnics, 31, 100664. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100664.

Han, J., Pokharel, S.K., Yang, X., Manandhar, C., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R.L. (2011) Performance of geocell-reinforced RAP bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(11), 1525-1534. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000286.

Khan, M.A., Biswas, N., Banerjee, A., Puppala, A.J. (2020) Field Performance of Geocell Reinforced Recycled Asphalt Pavement Base Layer. Transportation Research Record, 2674, 69-80. https://doi.org/10.1177/0361198120908861.

Khan, M.A., Puppala, A.J. (2023) Sustainable pavement with geocell reinforced reclaimed-asphalt-pavement (RAP) base layer. Journal of Cleaner Production, 387, 135802. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135802.

Li, W., Han, S., Han, X., Yao, Y. (2021) Experimental and numerical analysis of mechanical properties of geocell reinforced reclaimed construction waste composite base layer. Construction and Building Materials, 304, 124587. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124587.

Pokharel, S.K., Han, J., Manandhar, C., Yang, X., Leshchinsky, D., Halahmi, I., Parsons, R.L. (2011) Accelerated pavement testing of geocell-reinforced unpaved roads over weak subgrade. Transportation Research Record, 2204, 67-75. https://doi.org/10.3141/2204-09.

Priyadarshee, A., Kumar, V., Kumar, V., Kumar, M., Rahul, A.K., Kumar, R. (2026) Influence of key parameters on geocell performance: A review of laboratory investigations. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 9, 132. https://doi.org/10.1007/s41939-025-01149-8.

Raja, J., Dixon, N., Fowmes, G., Frost, M., Assinder, P. (2015) Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics. Geosynthetics International, 22(5), 393-401. https://doi.org/10.1680/jgein.15.00020.

Raveendran, D., Paul, A.G., Noorudheen, F.H., Bilal, M., Kolathayar, S. (2025) Behaviour of the pavement subgrade reinforced with coir geocells under repeated loads. Transportation Infrastructure Geotechnology, 12, 179. https://doi.org/10.1007/s40515-025-00635-3.

Shafiee-Panah, A., Ghanbari, A., Tavakoli Mehrjardi, G. (2022) Evaluation of geocell-reinforced pavement constructed with recycled concrete aggregate subjected to wheel loads. Indian Geotechnical Journal, 52, 905-923. https://doi.org/10.1007/s40098-022-00632-0.

Sheikh, I.R., Shah, M.Y. (2020) Experimental Investigation on the Reuse of Reclaimed Asphalt Pavement over Weak Subgrade. Transportation Infrastructure Geotechnology, 7, 634-650. https://doi.org/10.1007/s40515-020-00115-w.

Suku, L., Prabhu, S.S., Ramesh, P., Babu, G.L.S. (2016) Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading. Transportation Geotechnics, 9, 17-30. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.06.002.

Tabatabaei Aghda, S.T., Ghanbari, A., Tavakoli Mehrjardi, G. (2019) Evaluating the applicability of geocell-reinforced dredged sand using plate and wheel load testing. Transportation Infrastructure Geotechnology, 6, 21-38. https://doi.org/10.1007/s40515-018-00067-2.

Thakur, J.K., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L. (2012) Performance of geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic plate loading. Geotextiles and Geomembranes, 35, 14-24. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.06.004.

Thakur, J.K., Han, J., Parsons, R.L. (2016) Factors influencing deformations of geocell-reinforced recycled asphalt pavement bases under cyclic loading. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(1), 04016240. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001760.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/43

Geossintéticos e Métricas de Sustentabilidade: Emissões de CO_2e e Diretrizes para o Contexto Brasileiro

Maria Alejandra Aparicio-Ardila
Pesquisadora de pós-doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, maparicio@usp.br

Emilia Mendonça Andrade
Gestora de Área de Negócios Ambiental, Huesker LTDA., São José dos Campos, Brasil, emilia@huesker.com

Victor Eduardo Pimentel
Diretor Executivo, Geo Soluções, São Paulo, Brasil, victor.pimentel@geosolucoes.com

Jefferson Lins da Silva
Professor Associado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A sustentabilidade é destacada como um dos principais benefícios do uso de geossintéticos em obras ambientais e de infraestrutura. No entanto, para que essa afirmação deixe de ser discursiva e passe a orientar decisões técnicas, econômicas e regulatórias, é fundamental adotar métricas quantitativas que permitam demonstrar, de forma objetiva, o desempenho ambiental dessas soluções. Entre os indicadores de impacto ambiental, o Potencial de Aquecimento Global (GWP-Total) apresentado em dióxido de carbono equivalente ($KgCO_2e$) é reconhecido internacionalmente como a principal métrica para quantificar impactos associados ao ciclo de vida de produtos e sistemas construtivos. Este trabalho apresenta uma análise consolidada de Declarações Ambientais de Produto (DAPs) de geotêxteis (tecidos e não tecidos) com foco nos módulos A1–A3 (berço ao portão) da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados indicam variações nos valores de GWP-Total associadas ao tipo de polímero, à origem da matéria-prima e às características dos processos produtivos, evidenciando o papel dessas variáveis no desempenho ambiental dos produtos. A análise demonstra a aplicabilidade das DAPs como instrumento técnico para a comparação de soluções geotécnicas e para a incorporação de métricas ambientais em projetos de infraestrutura, contribuindo para o avanço da avaliação de sustentabilidade no contexto brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Sustentabilidade, Impacto ambiental, ACV.

ABSTRACT: Sustainability is often highlighted as one of the main benefits of using geosynthetics in environmental and infrastructure works. However, for this assertion to move beyond a merely discursive level and effectively support technical, economic, and regulatory decision-making, it is essential to adopt quantitative metrics that objectively demonstrate the environmental performance of these solutions. Among environmental impact indicators, the Global Warming Potential (GWP-Total), expressed in kilograms of carbon dioxide equivalent (kg CO_2e), is internationally recognized as the primary metric for quantifying the life-cycle impacts of construction products and systems. This study presents a consolidated analysis of Environmental Product Declarations (EPDs) for geotextiles (woven and nonwoven), focusing on modules A1–A3 (cradle-to-gate) of the Life Cycle Assessment (LCA). The results indicate variations in GWP-Total values associated with polymer type, raw material origin, and manufacturing process characteristics, highlighting the role of these variables in the environmental performance of the products. The analysis demonstrates the applicability of EPDs as a technical tool for comparing geotechnical solutions and for incorporating environmental metrics into infrastructure projects, thereby advancing sustainability assessment in the Brazilian context.

KEYWORDS: Geosynthetics, Sustainability, Environmental impact, LCA.

1 INTRODUÇÃO

A transição para uma economia de baixo carbono exige que o setor de infraestrutura adote metodologias robustas de gestão de emissões e sustentabilidade, baseadas em métricas reconhecidas internacionalmente. O setor da construção civil, responsável por uma parcela significativa do consumo energético global e das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado pesquisas voltadas à ACV de materiais de engenharia, incluindo os geossintéticos (Andrade et al., 2024; Araújo et al., 2025; Bizjak e Lenart ,2018; Pimentel, 2024; Xue et al., 2025; Zornberg et al., 2024).

A ACV operacionalizada por meio de DAPs, constitui atualmente o principal instrumento reconhecido internacionalmente para a mensuração e comunicação padronizada do desempenho ambiental de produtos da construção civil. Apesar da crescente disponibilidade de DAPs para geossintéticos em mercados internacionais, a divulgação dessas informações ainda é incipiente, especialmente no contexto brasileiro.

No Brasil, materiais de construção tradicionais, como cimento, concreto, aço e agregados, já possuem DAPs elaboradas conforme os mesmos referenciais normativos adotados globalmente, em especial as normas NBR ISO 14025 (2015) e a EN 15804 (2019). As DAPs brasileiras utilizam dados representativos da matriz energética nacional, predominantemente hidrelétrica, enquanto DAPs europeias adotam mixes energéticos locais ou regionais. Essa diferença afeta os valores absolutos de impacto ambiental, como o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*), mas não o método de cálculo nem a estrutura da ACV.

Um marco relevante para o setor de geossintéticos foi o estudo encomendado pela *European Association of Geosynthetic Manufacturers* (EAGM), conduzido por Stucki et al. (2011), que realizou uma ACV comparativa entre soluções com geossintéticos e materiais convencionais, como concreto, cimento, cal e cascalho. O estudo abrangeu quatro aplicações típicas: filtração, estabilização de fundações, drenagem em aterros e contenção de taludes (Dixon et al., 2016; Dixon et al., 2017; Ehrenberg et al., 2012). A metodologia utilizada seguiu as normas ISO equivalentes às normas NBR ISO 14040 (2025) e NBR ISO 14044 (2025). Essas normas fundamentam a elaboração de DAP conforme a NBR ISO 14025 (2015), que regulamenta as declarações ambientais Tipo III. As informações geradas por DAPs podem contribuir para a quantificação de emissões indiretas da cadeia de suprimentos, frequentemente consideradas nos inventários corporativos do Escopo 3 do *Greenhouse Gas Protocol Initiative* (2004).

Um dos desafios iniciais nas ACV aplicadas a geossintéticos era a ausência de dados específicos de carbono incorporado (*Embodied Carbon*), o que obrigava o uso de valores genéricos para polímeros como polipropileno e polietileno (Dixon et al., 2017; Raja et al., 2015; Touzé, 2022; Xue et al., 2025). Estudos como o de Raja et al. (2015) avançaram ao calcular dados de EC específicos para diferentes categorias de geossintéticos, geotêxteis não tecidos, geogrelhas e geocompósitos, a partir de dados primários de fabricação.

No contexto brasileiro, o setor de geossintéticos possui forte representatividade técnica e normativa, com atuação destacada de associações como *a International Geosynthetic Society* (IGS) Brasil, o Comitê Técnico de Geossintéticos da Associação Brasileira das Indústrias de Nãotecidos e Tecidos Técnicos (CTG-ABINT) e a Comissão de Estudo Especial de Geossintéticos (CEE-175) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Contudo, a quantificação dos benefícios ambientais dessas soluções ainda é incipiente, principalmente pela escassez de DAPs nacionais de geossintéticos.

Estudos recentes mostram que o impacto ambiental da produção de geossintéticos é fortemente influenciado pela produção das matérias-primas (pellets plásticos) e pelo consumo de eletricidade nos processos de extrusão e conformação (Araújo et al., 2025; Benetto, 2025; Elsin et al., 2012; Fraser et al., 2012; Frischknecht et al., 2013; Xue et al., 2025).

Nesse cenário, torna-se essencial desenvolver metodologias integradas que unam a ACV, os inventários nacionais de carbono e as normas brasileiras mais recentes. O Plano de Ação Climática da ABNT (GC-PAC) tem impulsionado essa convergência por meio da publicação de normas como a NBR ISO 14067 (Pegada de Carbono de Produto, 2023), NBR ISO 14068-1 (Neutralidade de Carbono, 2025) e NBR ISO 59004 (Economia Circular, 2024), promovendo o alinhamento do Brasil às práticas internacionais.

Com base em experiências recentes, como a de Andrade et al. (2024), que demonstrou uma redução de 73% nas emissões de CO_2e ao substituir cortinas atirantadas e muros em concreto (solução tradicional) por muros em solo reforçado com geogrelhas (solução com geossintéticos). As DAPs de geossintéticos permitem que fabricantes demonstrem, com base em dados verificáveis, os benefícios ambientais de suas soluções. A

quantificação do carbono incorporado aos geossintéticos não apenas contribui para a mitigação das emissões no setor de infraestrutura, mas também gera informações essenciais para a tomada de decisão corporativa, apoiando políticas de *Environmental, Social and Governance* (ESG) e inovação de produtos. E para além do âmbito corporativo, essas métricas também podem subsidiar instrumentos de política pública e processos de contratação de obras de infraestrutura, permitindo a incorporação de critérios ambientais objetivos em licitações e programas voltados à redução das emissões de carbono no setor da construção.

Este trabalho apresenta um consolidado de informações provenientes de DAPs de fabricantes internacionais de geossintéticos, disponibilizadas publicamente na plataforma de um único operador de programa. Para evitar associações comerciais diretas, são identificados apenas os países de origem dos fabricantes. A análise foi deliberadamente restrita a um único operador, com o objetivo de assegurar consistência metodológica, homogeneidade nos critérios de verificação e comparabilidade direta dos resultados. O estudo concentra-se nos geotêxteis, selecionados por constituírem o tipo de geossintético mais amplamente comercializado em escala global e por apresentarem ampla diversidade de funções técnicas em obras de infraestrutura. Essa versatilidade funcional, aliada ao elevado volume de produção, torna os geotêxteis particularmente adequados para análises de desempenho ambiental e para o estabelecimento de referências quantitativas que possam subsidiar o desenvolvimento de futuras DAPs no contexto brasileiro.

2 METODOLOGIA

Embora existam DAPs publicadas por diferentes operadores de programa, a análise foi deliberadamente restrita ao *International EPD® System*, de modo a garantir consistência metodológica, homogeneidade nos critérios de verificação e comparabilidade direta dos resultados. Destaca-se que, além de fabricantes europeus, o conjunto de dados inclui um fabricante localizado na Índia, ampliando a representatividade geográfica da amostra.

O indicador ambiental adotado foi o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP)* GWP-Total, expresso em kg CO_2e, que representa o impacto das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do produto. Conforme a EN 15804 (2019), o GWP-Total resulta da soma das contribuições fóssil, biogênica e associada às mudanças no uso do solo (luluc), permitindo uma avaliação integrada do impacto climático. Considerando a natureza predominantemente fóssil dos polímeros utilizados em geossintéticos, o GWP-fóssil tende a ser a parcela dominante; ainda assim, o uso do indicador agregado assegura alinhamento com os padrões internacionais de DAP.

Para garantir indicadores simples e comparáveis, a análise foi limitada aos módulos A1–A3 do ciclo de vida ("berço ao portão"), correspondentes às etapas de extração de matérias-primas, transporte interno e fabricação. Independentemente da fronteira de ACV declarada nas DAPs ("berço ao portão", "berço ao portão com opções" ou "berço ao túmulo").

Os valores de GWP-Total foram normalizados para kg CO_2e/kg. Quando apresentados em kg CO_2e/m^2, os dados foram convertidos para Kg com base na massa por unidade de área ou densidade informada. Ao todo, foram analisadas 16 DAPs de geotêxteis, incluindo produtos tecidos e não tecidos.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta o conjunto de DAPs identificadas para os geotêxteis analisados neste estudo. Destaca-se que algumas DAPs contemplam mais de um produto ou linha comercial, resultando na identificação de 20 produtos distintos apresentados na tabela. Para determinados países, como Itália e Suécia, foram identificadas DAPs de mais de um fabricante, bem como múltiplas DAPs associadas a diferentes linhas de produtos de um mesmo fabricante, refletindo a diversidade de portfólios e de processos produtivos considerados. Os geotêxteis analisados foram fabricados predominantemente a partir de polipropileno (PP) ou poliéster (PET). Todos os valores apresentados referem-se exclusivamente aos módulos A1–A3, independentemente da fronteira declarada nas DAPs.

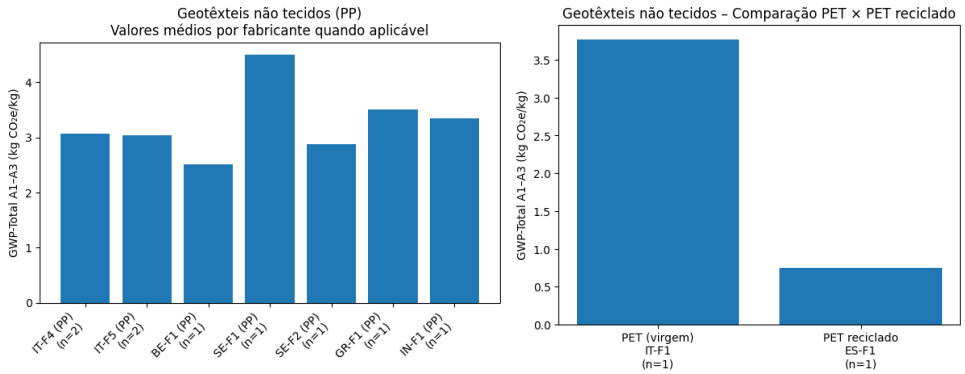
Tabela 1. DAPs de geotêxteis analisadas

ID DAP	Módulos declarados na DAP	Fronteira ACV	País	Fabricante	Tipo de geotêxtil	Polímero	Massa por unidade de área	GWP-Total A1–A3 (kg CO_2e/kg)
BE-F1-T-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	92 g/m²	2,033**
BE-F1-T-PP-02	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	167 g/m²	2,078**
BE-F1-T-PP-03	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	110 g/m²	2,027**
BE-F1-T-PP-04	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	365 g/m²	2,118**
ES-F1-NT-PET-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Espanha	Fabricante 1	Não tecido	PET reciclado	120–500 g/m²	0,745
GR-F1-NT-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Grécia	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	2,520
IN-F1-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, B1, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Índia	Fabricante 1	Não tecido	PP	250 g/m²	4,500
IT-F1-NT-PET-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 1	Não tecido	PET	*	3,770
IT-F1-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	3,720
IT-F2-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 2	Não tecido	PP	201 g/m²	3,144
IT-F3-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 3	Não tecido	PP	*	3,340
IT-F4-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 4	Não tecido	PP	191 g/m²	3,206
IT-F4-NT-PP-02	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 4	Não tecido	PP	556 g/m²	2,946
IT-F5-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 5	Não tecido	PP	*	3,070
IT-F5-NT-PP-02	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 5	Não tecido	PP	*	3,020
LV-F1-T-PET-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Letônia	Fabricante 1	Tecido	PET	230–700 g/m²	7,070
UK-F1-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Reino Unido	Fabricante 1	Não tecido	PP	80–300 g/m²	2,434**

SE-F1-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Suécia	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	2,880
SE-F2-NT-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Suécia	Fabricante 2	Não tecido	PP	*	3,514
SE-F2-T-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Suécia	Fabricante 2	Tecido	PP	*	3,624

* = DAP não associa uma massa por unidade de área específica. **DAP originalmente declarada em m²; valor convertido para kg CO_2e/kg com base na massa por unidade de área ou densidade informada na DAP.

A Figura 1a apresenta a comparação dos valores de GWP-Total para geotêxteis não tecidos fabricados em PP. Sempre que disponíveis duas ou mais DAPs comparáveis para um mesmo fabricante, foi calculado um valor médio de emissão, indicado no gráfico juntamente com o número de DAPs consideradas (n). Nos demais casos, os valores apresentados correspondem a resultados individuais. Considerando exclusivamente os geotêxteis não tecidos produzidos em PP, os valores de GWP-Total variaram entre 2,520 e 4,500 kg CO_2e/kg. O menor valor foi observado para o fabricante localizado na Grécia (2,52 kg CO_2e/kg), enquanto o maior valor correspondeu ao fabricante localizado na Índia (4,50 kg CO_2e/kg), sugerindo a possível influência de fatores geográficos e energéticos associados aos diferentes contextos produtivos.



a) **b)**

Figura 1. GWP-Total de geotêxteis não tecidos. a) Fabricados em PP Virgem. b) Fabricados em resina de PET virgem e reciclado.

A Figura 1b apresenta a comparação entre geotêxteis não tecidos produzidos em PET virgem (Itália) e em PET reciclado (Espanha). Observa-se uma redução expressiva do GWP-Total para o produto à base de PET reciclado (0,745 kg CO_2e/kg), cujo valor é aproximadamente cinco vezes inferior ao observado para o PET virgem (3,770 kg CO_2e/kg). Esse resultado evidencia o elevado potencial do uso de matéria-prima reciclada como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa na fase de produção de geotêxteis, ainda que a amostra analisada seja limitada a uma DAP por categoria. Ressalta-se que o PET reciclado é empregado na fabricação de geotêxteis não tecidos no Brasil, desde que atendidos os requisitos de aplicação estabelecidos na ABNT NBR 16757-1 (2021).

A Figura 2 apresenta a comparação entre geotêxteis tecidos produzidos em PP e PET. A análise foi estruturada considerando o conjunto de geotêxteis tecidos produzidos por um mesmo fabricante localizado na Bélgica (n = 4, valor médio de 2,064 kg CO_2e/kg), bem como os valores individuais observados para fabricantes da Suécia (3,624 kg CO_2e/kg) e da Letônia (7,070 kg CO_2e/kg). Destaca-se que, neste caso, os fabricantes apresentam localização geográfica relativamente próxima. Ainda assim, o geotêxtil tecido fabricado em resina de PET apresentou valores de GWP-Total significativamente superior aos observados para os geotêxteis fabricados em PP, indicando a forte influência do tipo de polímero sobre o desempenho ambiental do produto.

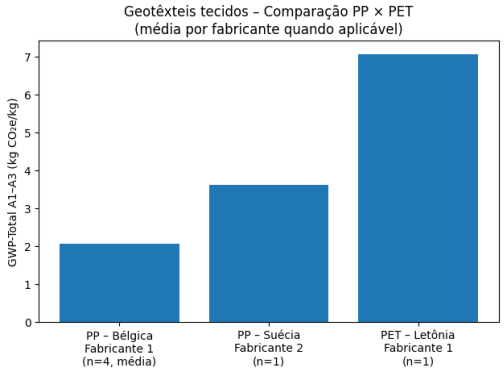


Figura 2. GWP-Total de geotêxteis tecidos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As análises realizadas indicam que o GWP-Total associado à produção de geotêxteis é resultado da combinação de múltiplos fatores, com destaque para o tipo de polímero empregado, a origem da matéria-prima e as características do processo produtivo. Esses elementos explicam a variabilidade observada entre produtos e fabricantes, reforçando a importância da utilização de métricas normalizadas e comparáveis.
- Do ponto de vista normativo, a estrutura metodológica necessária para a elaboração de DAPs já se encontra plenamente estabelecida no Brasil, em alinhamento com as normas internacionais aplicáveis. Assim, a inexistência de DAPs nacionais para geossintéticos representa uma lacuna de mercado e de prática setorial, e não uma limitação técnica ou regulatória, sendo plenamente viável sua implementação por fabricantes brasileiros.
- No contexto da elaboração de DAPs brasileiras para materiais geossintéticos, observa-se um conjunto de condições estruturais que reforça a relevância da geração de dados locais de ACV. A matriz energética brasileira apresenta baixa intensidade de carbono em comparação com diversos países industrializados, e o país dispõe de produção nacional de resinas termoplásticas e de uma cadeia consolidada de reciclagem de PET. Nesse cenário, a produção de inventários e DAPs nacionais atenderia à crescente demanda do setor da construção, do poder público e da academia por métricas ambientais confiáveis, além de permitir avaliar com maior precisão o potencial competitivo da indústria geossintética brasileira em termos de desempenho ambiental.
- A quantificação das emissões de CO_2e apresentada neste estudo fornece métricas técnicas objetivas que podem subsidiar decisões de sustentabilidade, a comparação entre soluções geotécnicas e a utilização de instrumentos associados à precificação de emissões de forma indireta, como créditos de carbono, sem implicar sua geração direta.
- Por fim, este trabalho evidencia que os impactos ambientais dos geossintéticos podem ser quantificados de forma consistente e que a avaliação de temas emergentes, como microplásticos, demanda metodologias específicas e análises estruturadas ao longo do ciclo de vida, evitando associações simplificadas e generalizações que não refletem o desempenho ambiental real dessas soluções em aplicações geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. ABNT NBR 16757-1 Geossintéticos - Requisitos para aplicação - Parte 1: Geotêxteis e produtos correlatos

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2015. ABNT NBR ISO 14025 Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2023. ABNT NBR ISO 14067. Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14068-1. Gestão de mudanças climáticas - Transição para emissões líquidas zero - Parte 1: Neutralidade de carbono.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2024. ABNT NBR ISO 59004. Economia circular - Vocabulário, princípios e orientações para implementação

Andrade, E.M.; Santos, C.T.; Schmidt, C.F.; dos Anjos P. 2024. Aspectos de Sustentabilidade Ambiental, Social e Econômica de Contenções em Solo Reforçado na Integração da Rodovia dos Tamoios aos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião. In: XXI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, 2024, Balneario Camboriu, SC, Brasil. Anais: 10.47094/COBRAMSEG2024/181

Araújo Junior, L. P. V. D.; Bueno, C.; Silva, J. L. D. 2025. Life Cycle Assessment and Circularity Indicators of Earth-Retaining Walls and Mechanically Stabilized Earth. Sustainability, 17(9), 3769.

Benetto, E. 2025. A Safe and Sustainable by Design approach to geosynthetics development. In: 8th European Regional Conference on Geosynthetics, Lille, França. Anais: https://eurogeo8.org/proceedings

Bizjak, K. F.; Lenart, S. 2018. Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system–A case study. Geotextiles and Geomembranes, 46(5), 543-558.

Dixon, N.; Raja, J., Fowmes, G.; Frost, M. 2016. Sustainability aspects of using geotextiles. p.577-596. In:Koerner, R. Geotextiles from Design to Applications. Woodhead Publishing.

Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M. 2017. Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon. Geosynthetics International, 24(5), 451-464.

Ehrenberg, H.; Mermet, J. P.; Stucki, M., Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM General. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 87-91).

Elsing, A.; Fraser, I.; Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM, Case 2, Foundation stabilization. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 60-64).

European Norm. 2019. EN 15804. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products

Fraser, I.; Elsing, A.; Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM, Case 4, Soil retaining wall. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 218-222).

Frischknecht, R.; Büsser-Knöpfel, S.; Itten, R.; Stucki, M.; Wallbaum, H. 2013. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus concrete retaining wall. In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France (pp. 2-6).

Greenhouse Gas Protocol Initiative. 2004. A corporate accounting and reporting standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 25-26.

International EPD® System. *https://www.environdec.com/home*

Pimentel. V. (2024). Geossintéticos e Sustentabilidade. Mineração & Geossintéticos: Um caminho seguro, eficiente e sustentável. Effia Escola da Engehnaria.

Raja, J.; Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M.; Assinder, P. 2015. Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics. Geosynthetics International, 22(5), 393-401.

Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2011. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials. ESU-services Ltd. commissioned by European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM), Uster and Zürich, CH.

Touzé, N. 2022. The role of geosynthetics in sustainable development and the circular economy. Economia circolare e applicazioni resilienti: XXXII Convegno Nazionale Geosintetici, Bologna, 20 ottobre 2022, 7-21.

Xue, S.; Pokharel, S.; Lin, C. 2025. Embodied carbon calculation for geosynthetic products and implication for engineering projects. Environmental Geotechnics.

Zornberg, J. G., Subramanian, S., Roodi, G. H., Yalcin, Y., & Kumar, V. V. (2024). Sustainability benefits of adopting geosynthetics in roadway design. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10(3), 47.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/44

Geossintéticos para infraestrutura verde: Avaliação da capacidade de retenção e desempenho drenante de geotêxtil em telhados ecológicos

Thiago de Souza Louzada
Autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, thiagoslouzada@gmail.com

Mateus Emanuel De Lima Freitas
Co-autor, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Apodi/RN, Brasil, mateusmelf@gmail.com

Pedro Júlio Castro dos Santos
Co-autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, pedro.julio0820@gmail.com

Francisco Felinto de Lima Neto
Co-autor, Universidade federal rural do Semi-árido, Natal/RN, Brasil, francisco.lima96@gmail.com

Fagner Alexandre Nunes de França
Co-autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, fagner.franca@ufrn.br

RESUMO: Diante do cenário ambiental das grandes cidades e da intensa impermeabilização do solo, este trabalho propõe o uso de telhados verdes como alternativa viável para o controle do escoamento urbano, avaliando a eficiência dos geotêxteis na retenção de água pluvial e na redução do escoamento superficial. Por meio de modelos e simulações pluviométricas, avaliou-se a capacidade de retenção hídrica em duas configurações de telhados verdes, consitindo em um modelo plano e outro inclinado. Os resultados mostraram que a inclinação influencia diretamente na retenção de água, e que há diferenças significativas entre os tipos de módulos testados. O MVGT plano apresentou maior retenção que o MC, devido ao uso de geotextil na camada drenante. Nos módulos inclinados, o escoamento no MVGT iniciou mais tardiamente, enquanto nos planos ocorreu em tempos semelhantes. O MVGT, reteve 93,4 % da água na condição inclinada e 86,4 % na plana, sob chuvas de 44 mm/h e 42 mm/h, respectivamente. Mesmo com apenas 4 cm de substrato, os telhados verdes demonstraram alta capacidade de retenção e atraso no início do escoamento. Além disso, o MVGT apresentou menores vazões máximas, evidenciando maior eficiência drenante e potencial em sistemas urbanos sustentáveis.
PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil; Retenção hidrica; Drenagem urbana.

ABSTRACT: Given the environmental scenario of large cities and the intense soil impermeability, this work proposes the use of green roofs as a viable alternative for controlling urban runoff, evaluating the efficiency of geotextiles in retaining rainwater and reducing surface runoff. Through rainfall models and simulations, the water retention capacity of two green roof configurations was evaluated: a flat model and an inclined model. The results showed that the inclination directly influences water retention, and that there are significant differences between the types of modules tested. The flat MVGT (Green Roof Module) showed greater retention than the MC (Geotextile Module), due to the use of geotextile in the drainage layer. In the inclined modules, runoff in the MVGT started later, while in the flat modules it occurred at similar times. The MVGT retained 93.4% of the water in the inclined condition and 86.4% in the flat condition, under rainfall of 44 mm/h and 42 mm/h, respectively. Even with only 4 cm of substrate, the green roofs demonstrated high retention capacity and delayed runoff onset. Furthermore, the MVGT (Multiple Green Roof Technology) showed lower peak flows, demonstrating greater drainage efficiency and potential in sustainable urban systems.
KEYWORDS: Geotextile; Water retention; Urban drainage.

1 – INTRODUÇÃO

A rápida expansão das cidades tem agravado problemas socioambientais, como a piora da qualidade do ar e o aumento da temperatura superficial. Soluções sustentáveis, como os telhados verdes, surgem como

alternativas promissoras para mitigar esses impactos, contribuindo para o equilíbrio térmico e a melhoria da qualidade ambiental nas áreas urbanas (Qadourah, 2024). Esses sistemas se destacam como estratégias eficazes no enfrentamento das consequências das mudanças climáticas e da impermeabilização do solo.

Ao reduzir a sobrecarga dos sistemas de drenagem pluvial, os telhados verdes auxiliam no controle das águas urbanas, minimizando problemas como inundações e enchentes. Além disso, promovem benefícios ecológicos e sociais, como a absorção de poluentes e o aumento da umidade relativa do ar. Devido às suas propriedades multifuncionais, materiais geossintéticos passaram a ser amplamente utilizados na construção de telhados verdes. Atuando como camadas de separação, proteção e drenagem, esses materiais otimizam o desempenho hidráulico das coberturas, reduzindo o escoamento superficial e a carga estrutural, o que melhora a eficiência do sistema (Oliveira et al., 2015).

Os geotêxteis, além de eficazes na estabilização de taludes, também apresentam grande potencial em telhados verdes. Sua permeabilidade e resistência os tornam adequados para drenagem e retenção de água (Adauar et al., 2023). Com base nisso, este estudo tem como objetivo quantificar o desempenho drenante de materiais geossintéticos em telhados verdes, avaliando sua eficiência na retenção de água pluvial e na redução do escoamento superficial.

2 – METODOLOGIA

2.1 – LOCAL DE PESQUISA

O trabalho foi desenvolvido a partir de simulações de chuvas, utilizando protótipos instalados na Universidade Federal do rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN (Figura 1).

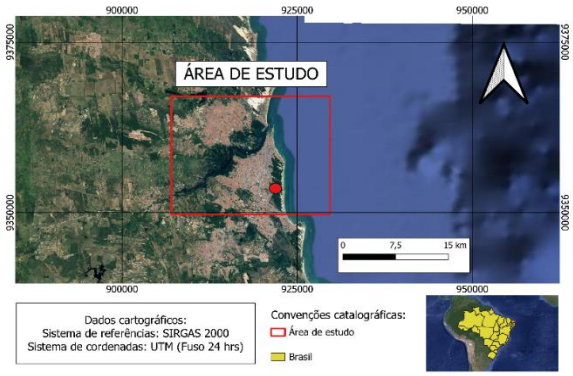


Figura 1. Área do estudo
Fonte:Autor, 2025

Acerca das condições climáticas da região onde o estudo foi realizado, a temperatura média é relativamente alta e uniforme. A média anual atinge 24,4 °C, com uma baixa amplitude térmica de 8,4°C, e oscilações situadas entre 21,8°C e 30,2°C. A umidade relativa do ar também apresenta homogeneidade e estabilidade, registrando uma média anual de 79,9%. Apesar da uniformidade térmica e de umidade, a cidade é caracterizada pela alta heterogeneidade de seu regime pluviométrico. O volume de chuvas na região apresenta baixo volume pluviométrico. O período chuvoso se concentra entre os meses de fevereiro e agosto, quando as precipitações médias registradas superam 110 mm. Em contraste, nos meses mais secos, que compreendem outubro a dezembro, a média pluviométrica reduz-se para cerca de 40mm (Rocha e Studart, 2014).

2.2 – MÓDULOS

Foram projetados dois módulos com estruturas de madeira de pinus (proveniente de reflorestamento). A base, medindo aproximadamente 110 cm × 130 cm, foi fixada sobre quatro pés de 1 m de altura e delimitada por beirais de 8 cm, simulando uma laje. Essa base foi composta por tábuas de 25,4 mm justapostas e projetada

de forma móvel em suas extremidades por meio de dobradiças, permitindo sua utilização tanto em posição plana quanto inclinada (Figura 2).

Essa configuração possibilitou o estudo do comportamento em telhados planos e íngremes. Cada módulo foi desenvolvido para representar diferentes condições de telhados, com variações principalmente na camada drenante. Para a montagem, elaborou-se um módulo de controle (MC), que serviu como base estrutural para os demais, composto apenas por uma camada de impermeabilização. Para isso, utilizou-se uma geomembrana EPDM (Etileno-Propileno-Dieno-Monômero, um tipo de membrana sintética com alta resistência a intempéries, raios UV, calor e produtos químicos) de 1,1 mm de espessura, reforçada com fibras de poliéster e densidade de 1,2 g/cm³. O material apresenta alta flexibilidade, permitindo dobras para o revestimento dos beirais. A drenagem foi realizada por meio de uma válvula de lavatório adaptada, instalada no canto inferior da base. A fixação da membrana ocorreu com ripas de 2 cm × 2 cm, parafusadas externamente ao longo do perímetro do beiral, simulando as características de um telhado convencional. Esse módulo foi submetido aos mesmos ensaios de simulação de chuvas que os demais, servindo como referência para comparação entre o volume escoado e as médias pluviométricas registradas na região.



Figura 2. Base para estudos dos telhados verdes e modulo de controle
Fonte: Autor, 2025

Após algumas adaptações, foi elaborada uma implementação geossintética no telhado verde: o Módulo Vegetado Geotêxtil (MVGT). A área total do módulo foi calculada em 1,43 m², resultando em cargas distribuídas de 84,8 kg/m³. O MVGT (Figura 3) foi composto por uma camada de impermeabilização com geomembrana EPDM, sobre a qual foi aplicado um geotêxtil não tecido de poliéster como camada drenante. Acima do geotêxtil, foi adicionada uma camada de substrato de 4 cm e, em seguida, a vegetação.

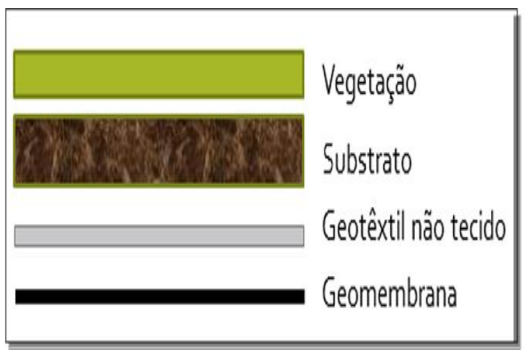


Figura 3. Composição do módulo MVGT
Fonte: Autor, 2025

Na camada de drenagem, foi inserida uma faixa de areia grossa com 4 cm de espessura e 5 cm de largura para melhorar o escoamento (Figura 4). O material utilizado, MacDrain® 1L, é leve, de pequena espessura (12 mm) e possui alta capacidade de drenagem, característica atribuída ao seu elevado índice de vazios. Na parte inferior, próximo ao ponto de drenagem, utilizou-se uma camada drenante na parte inferior, de areia grossa,

com espessura de 4 cm (da mesma espessura do substrato) e 5 cm de largura, com o intuito de melhorar a drenagem, já que o módulo não possuía caimento nos dois sentidos.



Figura 4. Construção e modulos MVGT
Fonte: Autor, 2025

2.3 – SUBSTRATO E VEGETAÇÃO

O substrato utilizado nos módulos vegetados foi um solo granular avermelhado, com granulometria conjunta exposta na Figura 5, de natureza predominantemente arenosa e com cerca de 14% de finos (argila e silte). Sua permeabilidade, determinada conforme a NBR 13292/2021, foi de 9,4 × 10^{-3} cm/s, valor típico de solos arenosos. A vegetação empregada foi a Zoysia japônica (Grama Esmeralda), selecionada por sua fácil adaptação, baixo custo e resistência ao clima local. Segundo a NBR 7181/2016, o ensaio granulométrico classificou o substrato como areia argilosa/siltosa (SM), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

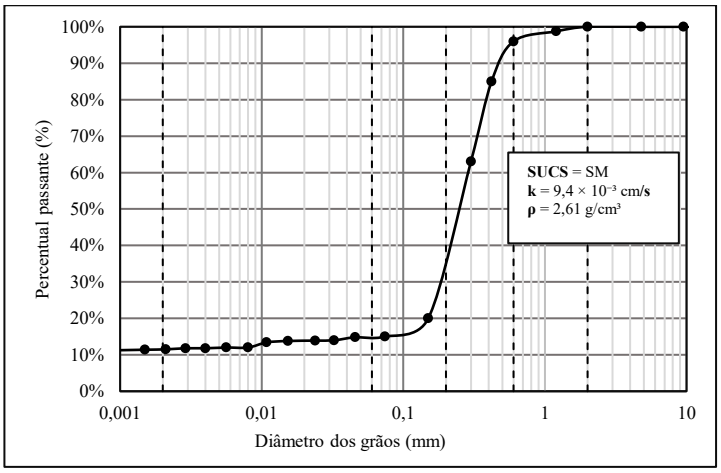


Figura 5. Curva granulométrica
Fonte: Autor, 2025

3.4 – SIMULAÇÃO DE CHUVAS

Nas simulações foram registrados, em intervalos de um minuto, os valores correspondentes à quantidade de água escoada desde o início até o término do escoamento, bem como os valores de precipitação obtidos em cinco pluviômetros distribuídos sobre o módulo 1. A partir das medições realizadas, determinou-se a precipitação média (Equação 1.1) e a intensidade da chuva (Equação 1.2). Multiplicando-se o valor médio,

expresso em milímetros, pela área do módulo, em metros quadrados, obteve-se o volume total precipitado (Equação 1.3), em litros, sobre o módulo. Por fim, ao subtrair do volume total precipitado o volume de água escoado, determinou-se o volume retido (Equação 1.4) pela cobertura verde.

$$Média = \frac{(Pluv.1 + Pluv.2 + Pluv.3 + Pluv.4 + Pluv.5)}{5} \quad (1.1)$$

$$Intensidade = \frac{Média}{2} \quad (1.2)$$

$$V_{Total} = Média \times 1{,}43 \quad (1.3)$$

$$V_{Retido} = V_{Total} - V_{Escoado} \quad (1.4)$$

Para garantir a consistência dos dados e a efetividade da pesquisa sobre a viabilidade e o desempenho dos telhados verdes, o estudo utilizou protótipos com variações na estrutura vegetal, no tipo de substrato, nas camadas funcionais e na inclinação. Foram realizadas simulações de chuva para reproduzir os padrões pluviométricos locais. Além disso, a área de instalação foi devidamente limpa, a fim de eliminar interferências externas e minimizar possíveis erros na coleta de dados. Para simular eventos de precipitação, foi desenvolvido um simulador de chuvas (Figura 6) composto por um reservatório de 200 litros, uma bomba centrífuga de 0,5 CV e microaspersores modelo MA-50, calibrado para garantir uma distribuição uniforme sobre os módulos de ensaio.

A calibração foi verificada por meio de testes comparativos entre o volume escoado e as medições de cinco pluviômetros instalados no módulo de controle, com diferenças inferiores a 1 mm/h entre os métodos. As simulações foram realizadas com durações de 20, em módulos planos e inclinados. A intensidade da chuva foi monitorada pelos pluviômetros, e o volume total precipitado foi comparado ao volume escoado, permitindo determinar a capacidade de retenção de água. O desempenho do sistema de drenagem foi avaliado pela ocorrência de transbordamentos e pela eficiência de condução da água para o reservatório de coleta, enquanto a adaptação da vegetação foi acompanhada visualmente para verificar sinais de estresse hídrico.

Além da análise do comportamento hidráulico imediato, o estudo também investigou a capacidade de retenção dos telhados verdes em períodos de estiagem. Para isso, o substrato foi previamente saturado por irrigação controlada e, em seguida, amostras foram coletadas em diferentes pontos do telhado verde nos dias 1, 2, 3, 5, 7 e 10 após a irrigação. As amostras foram secas em estufa para determinação do teor de umidade, possibilitando estimar o comportamento do sistema durante períodos secos, mesmo sob interferência de chuvas ocasionais. Essa metodologia inovadora permitiu avaliar o desempenho dos telhados verdes em condições reais e variáveis, oferecendo subsídios para o aprimoramento do manejo hídrico em coberturas vegetadas.

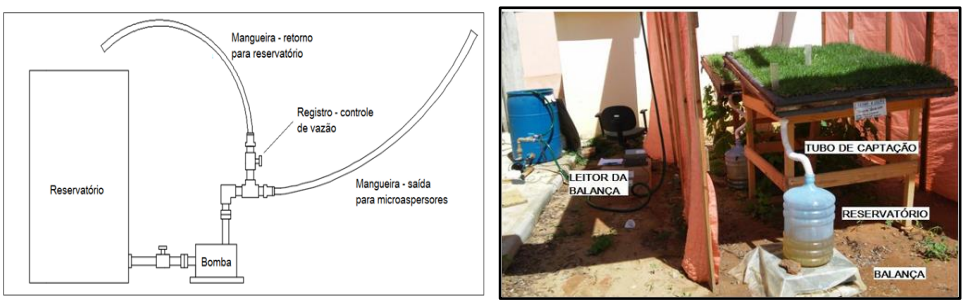


Figura 6. Sistema final de captação e medição do volume escoado
Fonte: Autor, 2025

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Neste item são apresentados os resultados obtidos nas simulações referentes à capacidade de retenção de água, realizadas durante 20 minutos para os módulos vegetados e não vegetados. Observa-se que, nos módulos com vegetação, há um atraso no início do escoamento, o que indica uma maior capacidade de retenção

hídrica. A Tabela 1 apresenta os resultados das simulações de 20 minutos para os módulos MC e MVGT, considerando inclinações de 2% (superfícies planas) e 20% (superfícies inclinadas).

Tabela 1. Valores de precipitação e escoamento para simulações de 20 minutos

Valores de precipitação e escoamento	MC (Plano)	MVGT (Plano)	MC (Inclinado)	MVGT (Inclinado)
Média (mm)	21,20	21,80	20,00	17,80
Intensidade da precipitação (mm/h)	63,60	65,40	60,00	53,40
Volume total (L)	30,32	31,17	28,60	25,45
Volume escoado (L)	27,66	2,06	26,66	3,44
Volume retido (L)	2,66	29,11	1,94	22,01
Porcentagem retida (%)	8,80	93,40	6,80	86,50

Fonte: Autor, 2025

Ao observar os dados, verifica-se uma variação nos valores médios de precipitação entre os módulos planos, com registros de 21,8 mm/h no MVGT e 21,2 mm/h no MC. Nos módulos inclinados, foram observadas precipitações de 20 mm/h no MC e 17,8 mm/h no MVGT. Essas diferenças podem ter sido ocasionadas pela ação dos ventos no local de estudo. Quanto ao volume escoado, nota-se uma diferença significativa entre os módulos planos, com valores de 27,66 L no MC e apenas 2,06 L no MVGT, evidenciando o alto potencial de retenção de água proporcionado pela camada sintética do módulo vegetado. Nos módulos inclinados, essa diferença também foi acentuada, com uma pequena variação em relação aos dados anteriores, com volumes de 26, 66 L no MC e 3,44 L no MVGT. Esses resultados demonstram que a inclinação exerce influência direta na capacidade de retenção hídrica das coberturas verdes, conforme ilustrado na Figura 7.

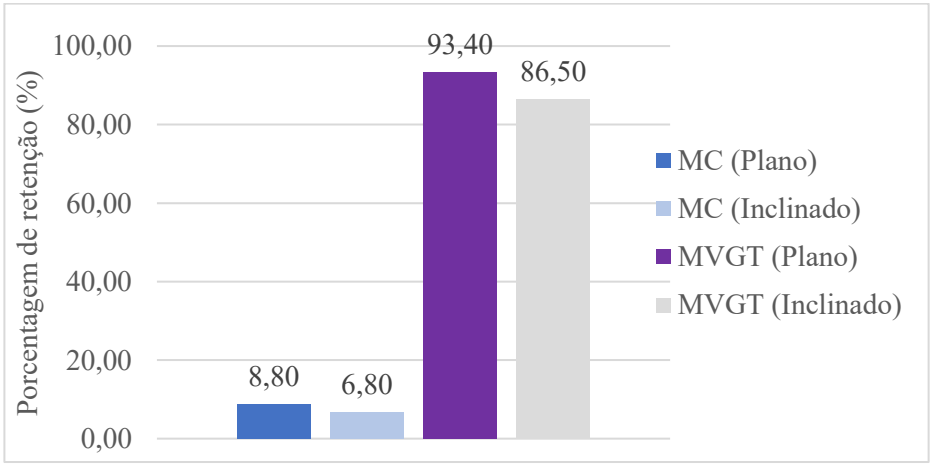


Figura 7. Retenção de água em simulações de 20 minutos para modulos planos e inclinados
Fonte: Autor, 2025

A porcentagem de água retida nos módulos foi contrastante. Nos módulos planos, o MC registrou retenção de 2,66 L em relação ao total precipitado (30,32 L), representando 8,8 % do volume total. Já o MVGT registrou 29,11 L, representando 93,4% da precipitação total (31,17 L). Nos casos inclinados, o MC reteve apenas 1,94 L dos 28,6 L totais, apresentando 6,8 % de retenção. O MGVT inclinado apresentou retenção de 22,01 L dos 25,45 L totais, mostrando eficiência de 86,5 %. Isso comprova a influência da inclinação na capacidade de retenção da cobertura verde. Verifica-se que, para o módulo controle (MC), o escoamento inicia-se entre 1 e 2 minutos, mantendo vazões entre 1,2 e 1,6 L/min (MC plano) e 1,2 e 1,5 L/min (MC inclinado), cessando logo após o término da precipitação.No módulo vegetado, observa-se um comportamento distinto. Além do atraso no início do escoamento, há também uma persistência do fluxo após o fim da chuva, com vazões gradualmente decrescentes até o esgotamento. No MVGT inclinado, o início do escoamento ocorreu em aproximadamente 13 minutos, enquanto no caso plano, o escoamento iniciou-se em torno de 14 minutos.O modulo MVGT apresentou vazões máximas em torno de 0,14 L/min para a condição plana e 0,16 L/min para

a condição inclinada. Na Figura 8, é apresentado os dados dos hidrogramas correspondentes aos módulos planos e inclinados. Nessa figura, é possível observar a variação da vazão de escoamento ao longo do tempo.

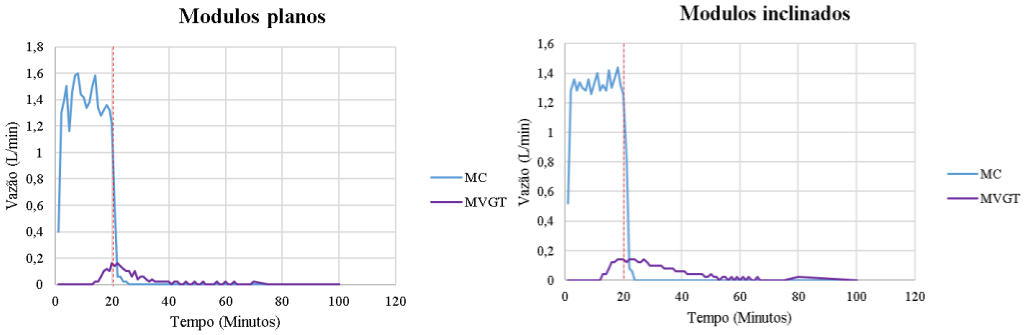


Figura 8. Hidrograma para simulações de 20 minutos para modulos planos e inclinados
Fonte: Autor, 2025

4.2 – DESEMPENHO DO SISTEMA DE DRENAGEM

O módulo MVGT demonstrou desempenho insatisfatório em termos de drenagem. Durante as simulações, sob intensidades de precipitação variando entre 44 e 65 mm/h, observou-se o transbordamento de água pela borda inferior do módulo, na região do beiral. Esse fenômeno, ilustrado na Figuras 9, ocorreu de forma recorrente em todas as simulações, manifestando-se entre 13 e 14 minutos após o início da chuva simulada.



Figura 9. Vista externa do transbordamento e acumulo interno do MGVT
Fonte: Autor, 2025

Configurações que não incluem camada de drenagem foram descritas por Minke (2004) e pela Conservation Technology (2008). No presente estudo, o transbordamento observado pode estar associado às dimensões reduzidas e/ou ao material empregado na camada drenante. Com supracitado, no módulo MVGT, utilizou-se uma faixa de areia grossa com 4 cm de altura e 5 cm de largura, separada do substrato por uma camada de geotêxtil, conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 10. Faixa drenante em areia grossa envolta por geotêxtil do MGVT e faixa de MVGA
Fonte: Autor, 2025

Algumas modificações podem tornar o sistema mais eficiente, tais como: substituir o material utilizado na faixa drenante por um com maior capacidade de escoamento, como brita ou argila expandida; aumentar a

largura da faixa drenante; empregar um geotubo envolto por material granular; ou ampliar o diâmetro da válvula de drenagem.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de telhados verdes é uma prática sustentável e essencial para mitigar problemas ambientais nas grandes cidades e promover o bem-estar da população, especialmente quando integrados a outras técnicas de construção sustentável. A metodologia do trabalho atual, que testou duas estruturas de maciços utilizando geotêxtil e simulações de chuva, provou ser eficaz. O módulo de controle apresentou escoamento imediato e intenso, ao contrário do módulo vegetado, que retardaram o início do escoamento e mantiveram vazões decrescentes após a chuva. Isso indica a grande influencia dos geosinteticos na drenagem dágua da chuva, representando uma possibilidade promissora e viável para telhados verdes. Os resultados comprovam que a inclinação influencia diretamente a capacidade de retenção da cobertura verde. Observou-se também diferença entre os tipos de módulos. O MVGT plano uma maior parcela da água em relação ao MC. Nos módulos planos e inclinados, o escoamento do MVGT iniciou de foma mais demorada em relação ao MC.

No entanto, o MVGT apresentou menores vazões máximas em comparação ao MC, indicando menor capacidade drenante deste último. Com a validação das estruturas e do simulador, o estudo demonstrou que inúmeros ensaios podem ser realizados para aprofundar o conhecimento sobre o desempenho desses sistemas em variadas condições. Especificamente, sugere-se que um trabalho futuro se concentre em encontrar uma configuração de telhado verde que seja resistente a fatores como a germinação de sal e a estiagem prolongada, típicos de cidades como Natal. Para atingir esse objetivo, três alternativas devem ser avaliadas: testar espécies de vegetação resilientes (como suculentas), ajustar a altura e a composição do substrato para maximizar a retenção de água sem comprometer a drenagem ou a oxigenação das raízes, e buscar sistemas construtivos que facilitem o acúmulo de água, como geocompósitos e sistemas hidromulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAUAR, M. A.; CUTORA, D. L.; BOLIMA, S. J.; CHUA, K. J.; ISIDRO, I. A.; RAMOS, J. V. (2023). Strength performance of nonwoven coir geotextiles as an alternative material for slope stabilization. *Applied Sciences*, [S. l.], v. 13, n. 13, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7590. Acesso em: 07 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459:2016 — Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180:2016 — Determinação do limite de plasticidade.* Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181:2018 — Análise granulométrica.* Rio de Janeiro, 2018.

Minke, G. (2004). *Tectos verdes: Planificação, Ejecución, Consejos Prácticos.* Editorial Fin de Siglo. Tradução do alemão: Arq. Denize Eglitz Lagotta, Montevideo, Uruguay, p. 86.

Oliveira, C. M. M.; Pereira, F. X. (2015) Drenagem de jardim suspenso de centro empresarial. In: *8º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*. Brasília – DF. *Anais…*

Qadourah, Jenan Abu. *Energy efficiency evaluation of green roofs as a passive strategy in the mediterranean climate. Results in Engineering*, [S. l.], p. 102519, 2024. Disponivel em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024007746? Acesso em 07/11/2025.

Rocha, S. R.; Studart, T. M. C. (2014). Caracterização das chuvas na cidade de Natal com a aplicação da técnica estatística dos quantis (1986 a 2013). In: *12º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. *Anais…*

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/45

Impacto do Período de Estiagem e do Teor de Umidade do Substrato na Capacidade de Retenção de Água em Telhados Verdes Extensivos com Geossintético

Eduardo Eiler Batista de Araújo
Autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, eduardoeiler@gmail.com

Pedro Júlio Castro dos Santos
Co-autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, pedro.julio0820@gmail.com

Mateus Emanuel de Lima Freitas
Co-autor, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Apodi/RN, Brasil, Mateusmelf@gmail.com

Francisco Felinto de Lima Neto
Co-autor, Universidade federal rural do Semi-árido, Natal/RN, Brasil, eng.francisco.lima96@gmail.com

Fagner Alexandre Nunes de França
Co-autor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, fagner.franca@ufrn.br

RESUMO: A intensificação da urbanização tem ampliado as superfícies impermeáveis, intensificando problemas de escoamento superficial e inundações urbanas. Nesse contexto, os telhados verdes destacam-se como alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais, com desempenho potencializado pelo uso de geossintéticos, no qual podem sofrer influência do teor de umidade do substrato e do período de estiagem antecedente. Este estudo avalia a influência do teor de umidade do substrato e do período de estiagem no desempenho hidrológico de telhados verdes extensivos com geossintéticos. A pesquisa baseou-se em um protótipo experimental instalado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN, submetido a simulações controladas de chuva com durações entre 10 e 60 minutos, intensidades de 0,07 a 0,57 mm/min e períodos de estiagem equivalente de até 10 dias. O desempenho foi avaliado a partir da capacidade de retenção da água precipitada e do volume necessário para o início do escoamento superficial. Os resultados indicaram retenção próxima de 100% para chuvas de baixa intensidade associadas a períodos de estiagem superiores a dois dias, enquanto, para substrato úmido (estiagem equivalente igual a zero), a capacidade de retenção variou entre 2% e 49%. Observou-se ainda aumento do volume de chuva necessário para o início do escoamento com o prolongamento da estiagem. Conclui-se que o desempenho hidrológico do telhado verde é fortemente condicionado pela umidade antecedente do substrato e pela sazonalidade das chuvas, devendo esses fatores ser considerados no dimensionamento desses sistemas em áreas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de águas pluviais, umidade antecedente, drenagem urbana, sustentabilidade.

ABSTRACT: The intensification of urbanization has increased impervious surfaces, exacerbating surface runoff and urban flooding problems. In this context, green roofs stand out as a sustainable alternative for stormwater management, with their performance enhanced by the use of geosynthetics and influenced by the substrate moisture content and the antecedent dry period. This study evaluates the influence of substrate moisture content and antecedent dry period on the hydrological performance of extensive green roofs incorporating geosynthetics. The research was based on an experimental prototype installed at the Technology Center of the Federal University of Rio Grande do Norte, in Natal, Brazil, and subjected to controlled rainfall simulations with durations ranging from 10 to 60 minutes, intensities between 0.07 and 0.57 mm/min, and equivalent dry periods of up to 10 days. Performance was assessed in terms of rainfall water retention capacity and the rainfall volume required to initiate surface runoff. The results indicated retention close to 100% for low-intensity rainfall associated with antecedent dry periods longer than two days, whereas under wet substrate

conditions (equivalent dry period equal to zero), retention capacity ranged from 2% to 49%. An increase in the rainfall volume required to initiate runoff was also observed with longer dry periods. It is concluded that the hydrological performance of green roofs is strongly conditioned by antecedent substrate moisture and rainfall seasonality, and these factors should be considered in the design of such systems in urban areas.

KEYWORDS: Stormwater management; antecedent moisture; urban drainage; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e econômico das cidades, observa-se a crescente demanda por edificações destinadas a usos habitacionais, comerciais e de serviços. Independentemente de sua finalidade, a implantação dessas construções frequentemente resulta na supressão de áreas verdes, promovendo o aumento das superfícies impermeáveis. Como consequência, os centros urbanos tornam-se mais suscetíveis à ocorrência de inundações, uma vez que a água da chuva passa a escoar em maior volume sobre áreas com menor capacidade de infiltração e reduzida evapotranspiração. Além disso, a urbanização intensiva está associada a outros impactos ambientais, como o aumento da temperatura do ar, a formação de ilhas de calor, a redução da umidade relativa e o agravamento da poluição atmosférica (Vijayaraghavan, 2016).

Uma alternativa para mitigar esses efeitos consiste na adoção de telhados verdes (Rugh; Fernandez, 2005). Essa técnica construtiva proporciona benefícios térmicos, econômicos e estéticos às edificações (Blank et al., 2013; Hashemi et al., 2015; Carpenter et al., 2016). Ademais, os telhados verdes contribuem para a redução do volume total e do pico de escoamento das águas pluviais, além de aumentarem o tempo de resposta do sistema de drenagem, atenuando, assim, a ocorrência de inundações urbanas (Berndtsson, 2010).

Os telhados verdes podem ser classificados em intensivos, semi-intensivos e extensivos. Os sistemas intensivos utilizam substratos de maior espessura e suportam vegetações de grande porte, como arbustos e pequenas árvores, implicando elevadas sobrecargas estruturais e maiores custos de manutenção. Os telhados semi-intensivos apresentam características intermediárias, empregando substratos de espessura média e vegetações de porte médio, demandando manutenção periódica. Por outro lado, os telhados extensivos utilizam substratos mais delgados e vegetações de pequeno porte, como gramíneas, apresentando menores custos de manutenção e sendo, por isso, mais indicados para regiões de clima semiárido (Morgan et al., 2013; Vijayaraghavan, 2016).

No contexto da construção sustentável, torna-se essencial o aprimoramento dos materiais empregados nesses sistemas, especialmente nos telhados extensivos. Nesse sentido, destaca-se a utilização de materiais geossintéticos, os quais podem desempenhar funções de separação, filtração, drenagem e barreira (IGS Brasil, 2017). Segundo Townshend (2007), os geotêxteis são amplamente utilizados em telhados verdes com função filtrante, por apresentarem porosidade conhecida e capacidade de suportar as cargas impostas pela camada vegetal e pelo substrato. A incorporação de geossintéticos nesses sistemas confere maior versatilidade, controle de qualidade e previsibilidade de desempenho, em função do conhecimento de suas propriedades mecânicas e hidráulicas, além de representar uma solução tecnicamente eficiente, economicamente viável e de fácil execução.

Além da escolha adequada dos materiais, diversos estudos apontam a importância de se considerar as condições climáticas locais, especialmente o regime pluviométrico e os períodos de estiagem, no dimensionamento de telhados verdes. Evidencia-se que sistemas projetados para determinadas regiões podem apresentar desempenho distinto quando aplicados em contextos climáticos diferentes, uma vez que sua eficiência está diretamente relacionada a fatores como clima e características construtivas locais (Hernández; Luengas, 1997; Barrio, 1998; Blank et al., 2013). Dessa forma, torna-se necessário investigar a influência conjunta do uso de geossintéticos e das condições climáticas, em particular dos períodos de estiagem, visando à identificação de soluções que apresentem melhor desempenho hidráulico, eficiência econômica e maior durabilidade.

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo quantificar o impacto do período de estiagem, associado ao teor de umidade do substrato, na capacidade de retenção da água da chuva em um telhado verde extensivo construído com geossintéticos. Adicionalmente, busca-se analisar a relação entre o período de estiagem, correlacionando-o ao teor de umidade do substrato, e a capacidade de retenção de água pluvial do

protótipo, bem como avaliar a influência do volume de precipitação sobre essa capacidade, considerando as condições climáticas da área de estudo, localizada em Natal/RN, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área do estudo

As simulações desta pesquisa foram realizadas a partir da construção de um protótipo de telhado verde instalado no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal/RN (Figura 1). O município localiza-se na faixa litorânea do estado e apresenta clima tropical úmido, fortemente influenciado pela atuação dos ventos alísios e pela proximidade com o Oceano Atlântico. As temperaturas médias anuais são elevadas, e o regime pluviométrico caracteriza-se por acentuada sazonalidade. A vegetação predominante insere-se no domínio da Mata Atlântica e de formações litorâneas associadas, como restingas, manguezais e matas de tabuleiro, compondo um ambiente ecologicamente sensível e sujeito a intensa dinâmica hidrológica (Scudelari et al., 2021).



Figura 1. Localização da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN.

As simulações de chuva foram adotadas com o objetivo de evitar a dependência de eventos pluviométricos naturais, possibilitando maior controle das variáveis do experimento, tais como volume, duração e intensidade da precipitação. Dessa forma, foi possível garantir a repetibilidade dos ensaios e a obtenção sistemática dos dados necessários à pesquisa.

2.2 Materiais

2.2.1 Módulo

O módulo empregado nesta pesquisa corresponde ao MVGT (Módulo Vegetado Geotêxtil), originalmente utilizado por Louzada (2016). A base do protótipo foi confeccionada com tábuas de madeira de reflorestamento, com espessura de 25,4 mm, largura de 1,10 m e comprimento de 1,30 m, totalizando uma área superficial de 1,43 m² (Figura 2a).

A primeira camada do sistema, responsável pela impermeabilização, foi constituída por uma geomembrana de EPDM, com espessura de 1,1 mm e densidade de 1,2 g/cm³. Além da função impermeabilizante, a geomembrana também atuou como camada de proteção e barreira antirraiz. O sistema de drenagem foi realizado por meio de uma válvula convencional utilizada em lavatórios. Sobre a geomembrana, foi disposta uma camada de geotêxtil não tecido, com a finalidade de filtrar a água da chuva, impedir o carreamento do substrato, proteger a geomembrana e auxiliar no processo de drenagem. O geotêxtil utilizado foi fabricado em poliéster, com gramatura de 200 g/m². Próximo à válvula de drenagem, foi posicionada uma faixa de brita nº 1, com largura de 5 cm, entre a geomembrana e o geotêxtil, com o objetivo de facilitar o escoamento da água drenada (Figura 2b).

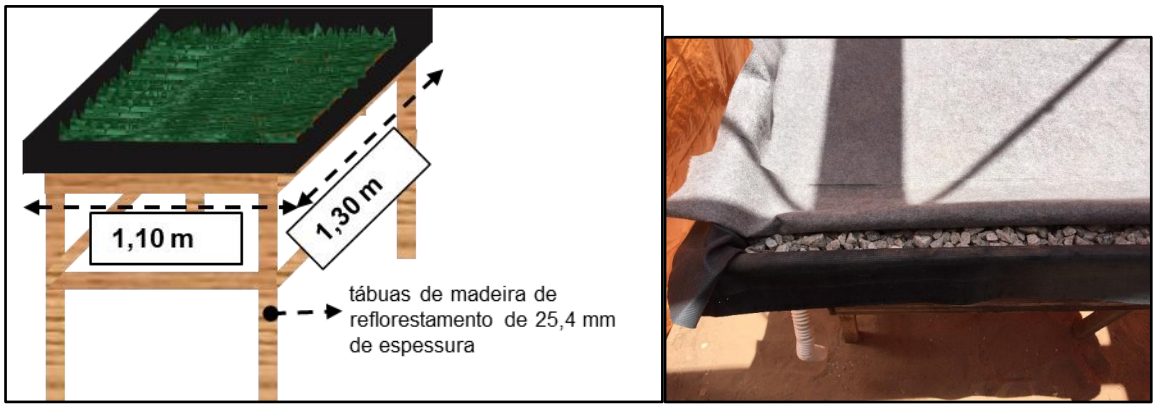
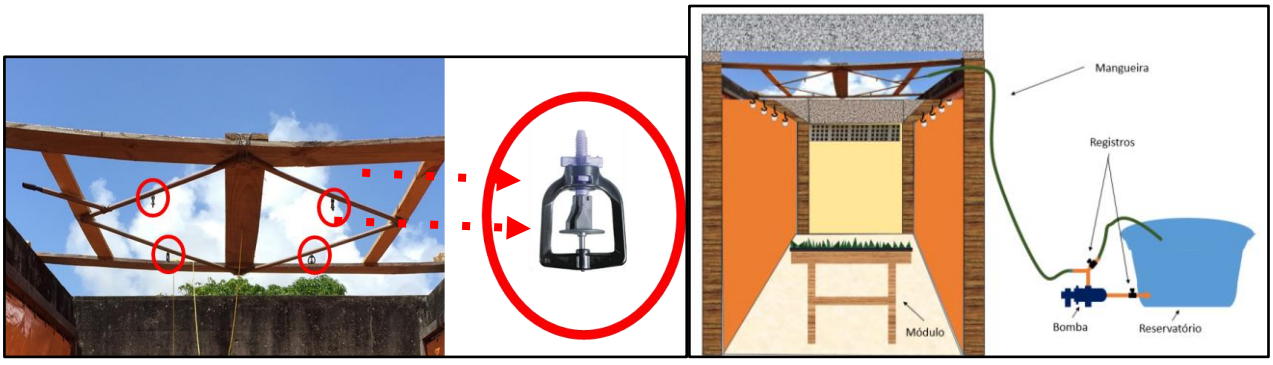


Figura 2. (a) Dimensões do módulo de madeira; (b) Detalhe da faixa de brita entre o geotêxtil e a geomembrana.

Acima do geotêxtil, foi aplicada uma camada de substrato com espessura de 4 cm, destinada à nutrição da vegetação e à redução do escoamento superficial. O substrato consistiu em areia barrada, classificada, a partir de ensaios granulométricos, como areia siltosa (SM), material de baixo custo e amplamente utilizado no cultivo de gramíneas na região. Para garantir o adequado desenvolvimento da vegetação, foi adicionada uma fina camada de adubo sobre o substrato. A camada vegetal, última do sistema, foi composta por grama esmeralda (*Zoysia japonica*).

2.2.2 Simulador de chuvas

O simulador de chuvas foi montado com conexões de PVC de 20 mm, formando uma estrutura em formato de losango com dimensões de 1,0 m × 1,0 m (Figura 3a). Em cada trecho do tubo, foi realizado um furo para a instalação de microaspersores do modelo MA-50, distribuídos de modo a proporcionar uma precipitação homogênea sobre o módulo. O sistema de abastecimento do simulador foi composto por um reservatório de água com capacidade de 250 L, uma bomba centrífuga com potência hidráulica de 0,5 CV, conexões de PVC e duas mangueiras (Figura 3b). A saída principal conduzia a água até o simulador, fixado em ripas de madeira, enquanto a saída secundária permitia o retorno da água ao reservatório, possibilitando o controle da vazão e da intensidade da chuva simulada.



(a) (b)

Figura 3. (a) Simulador em ripas de madeira pinus e detalhe do microaspersor à direita; (b) Sistema utilizado para dispersão de água no módulo.

2.3 Métodos

2.3.1 Calibração

Inicialmente, realizou-se a calibração do sistema por meio de ensaios com o módulo composto apenas pela geomembrana, sem substrato e vegetação. Essa etapa teve como finalidade determinar a relação entre o

volume de chuva precipitado e o volume escoado, permitindo o cálculo da capacidade de retenção (CR), conforme a Equação (1):

$$CR = 1 - \frac{Volume\ de\ chuva\ escoado}{Volume\ de\ chuva\ precipitado} \quad (1)$$

2.3.2 Intensidade das chuvas

As simulações de chuva foram conduzidas considerando durações de 10, 30 e 60 minutos, associadas a períodos de estiagem de até 10 dias. Esses intervalos foram definidos de modo a representar desde chuvas de baixa intensidade até eventos com volume suficiente para superar a capacidade de drenagem típica de áreas residenciais. De acordo com diretrizes da Prefeitura do Município de São Paulo (1999), recomenda-se a adoção de um período de retorno de dois anos para projetos de microdrenagem urbana. Com base nas equações de chuvas desenvolvidas pela Secretaria Municipal de Obras e Viação (SEMOV, 2007), no Projeto Básico de Drenagem e Pavimentação do Bairro Capim Macio e Marina Praia Sul (Prefeitura Municipal de Natal, 2017), verifica-se a ocorrência de uma precipitação acumulada de 23,5 mm para uma chuva com período de retorno aproximado de 2,33 anos e duração de 60 minutos, correspondente a uma intensidade de 0,4 mm/min, valor adotado como referência para eventos capazes de exceder a capacidade de drenagem de um condomínio residencial.

2.3.3 Consideração do período de estiagem e codificação das chuvas

O efeito do período de estiagem foi considerado a partir da análise do decaimento do teor de umidade do substrato ao longo de até 10 dias sem ocorrência de chuva, permitindo a definição de um período de estiagem equivalente em função da umidade antecedente. Com base nessa relação, foram realizadas 30 simulações de chuva, as quais foram codificadas de acordo com o período de estiagem equivalente (em dias), a duração (em minutos) e a intensidade do evento (em milímetros por minuto). Essa abordagem possibilitou a avaliação integrada da influência das condições iniciais de umidade do substrato e das características pluviométricas no desempenho hidrológico do telhado verde.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Capacidade de retenção

A capacidade de retenção de água de chuva do telhado verde apresentou valores próximos de 100% nas simulações de chuva de baixa intensidade, associadas a períodos de estiagem equivalente de até 10 dias, para intensidades variando entre 0,07 mm/min e 0,41 mm/min. Nessas condições, não foi observado grande escoamento superficial, indicando elevado potencial de armazenamento hídrico do sistema. Para analisar condições mais críticas, reduziu-se o período de estiagem entre os ensaios e ajustou-se a válvula da bomba hidráulica para simular chuvas com maior intensidade. Nessas condições, a capacidade de retenção apresentou grandes variações, com valores compreendidos entre 2% e 49% (Figura 4).

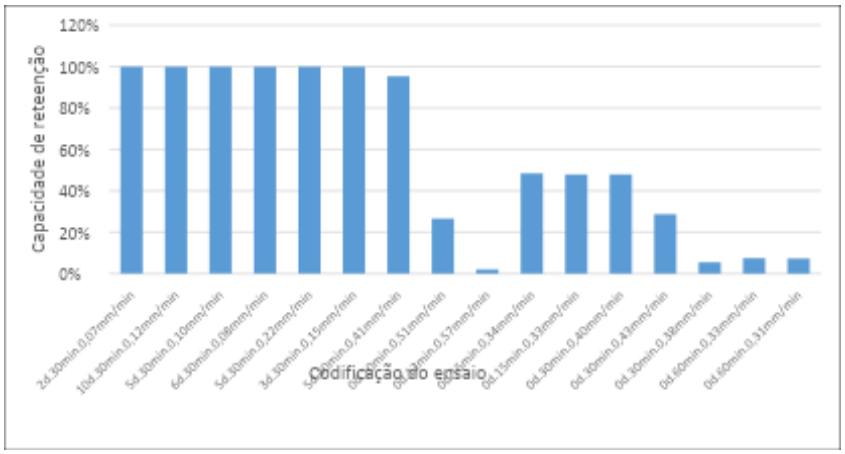


Figura 4. Capacidade de retenção e Período de estiagem x Volume da precipitação.

Com o objetivo de avaliar isoladamente a influência do volume total precipitado, optou-se por analisar separadamente os eventos de chuva associados a um mesmo período de estiagem equivalente (Figura 5).

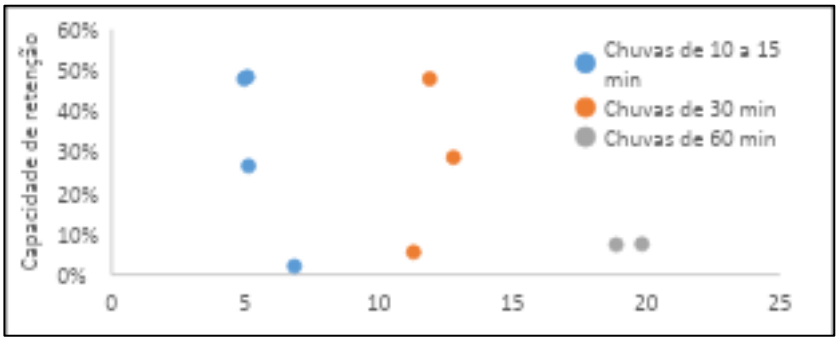


Figura 5. Capacidade de retenção, para estiagem de 0 dias, x volume total de chuva precipitado.

A análise dos resultados dos ensaios que apresentaram escoamento revelou que simulações de chuva realizadas de forma subsequente, no mesmo dia, apresentaram capacidades de retenção inferiores em relação ao ensaio imediatamente anterior (Tabela 1). Esse comportamento evidencia a influência direta do teor de umidade antecedente do substrato sobre o desempenho hidrológico do telhado verde.

Em cada um desses dias, o primeiro ensaio teve como finalidade promover a saturação do substrato, de modo a possibilitar a análise do desempenho do telhado verde nessa condição. O início do escoamento foi adotado como critério para caracterizar a saturação do módulo, mantendo-se a simulação por aproximadamente 5 minutos após esse momento antes do desligamento da bomba. Após a cessação do escoamento, procedeu-se à leitura dos pluviômetros e iniciou-se um novo ensaio, ainda com o substrato saturado. Embora algumas simulações tenham sido classificadas com período de estiagem equivalente de 0 dias, observou-se ampla variação nos teores de umidade do substrato, com valores superiores a 24%, especialmente nos segundos ensaios realizados em um mesmo dia. Esse fato explica a grande variabilidade observada nos valores de capacidade de retenção para essa condição.

3.2 Volume de chuva necessário para ocorrência de escoamento

Durante os ensaios, observou-se que, à medida que o período de estiagem equivalente aumentava, maior era o tempo necessário para o início do escoamento superficial. Esse comportamento justifica-se pelo fato do escoamento só ocorrer após o substrato atingir uma condição próxima à saturação. Com o intuito de quantificar o volume de chuva suportado pelo módulo antes do início do escoamento, multiplicou-se a intensidade da chuva pelo tempo correspondente ao início do escoamento. O valor obtido representa o volume de chuva precipitado sobre o módulo no instante em que o escoamento se iniciou (Figura 6).

Tabela 1. Dados dos ensaios de simulação de chuva que apresentaram escoamento.

Ensaio	Codificação	Data	Umidade (%)	Volume precipitado (mm)	Volume escoado (L)	Capacidade de retenção (%)
17	5d.40min.0,41mm/min	27/03	11	16,47	0,78	95
18	0d.30min.0,40mm/min	27/03	24	11,90	6,20	48
19	0d.15min.0,34mm/min	02/04	25	5,08	2,62	48
20	0d.30min.0,43mm/min	02/04	50	12,79	9,12	29
21	0d.15min.0,33mm/min	03/04	27	4,95	2,58	48
22	0d.30min.0,38mm/min	03/04	37	11,30	10,68	5
23	0d.10min.0,51mm/min	13/04	26	5,12	3,76	27
24	0d.12min.0,57mm/min	13/04	33	6,84	6,70	2
25	0d.60min.0,33mm/min	18/04	28	19,84	18,36	7
26	0d.60min.0,31mm/min	19/04	28	18,88	17,50	7

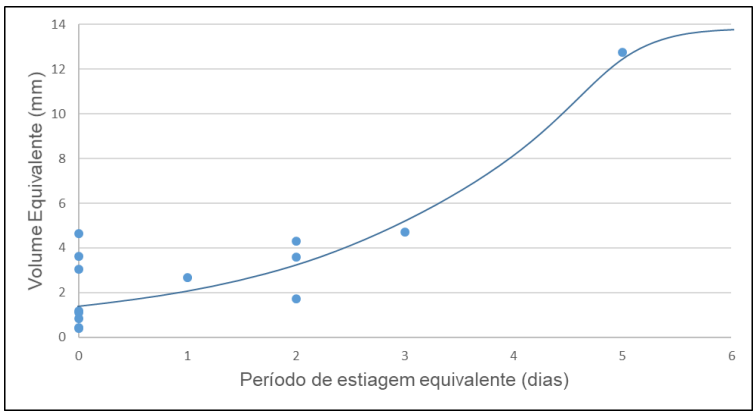


Figura 6. Volume de chuva equivalente para início do escoamento x Período de estiagem.

Conforme esperado, observa-se que o volume de chuva equivalente tende a aumentar à medida que o período de estiagem equivalente se prolonga. Para períodos de estiagem equivalente de 0 dias, verificou-se elevada dispersão dos valores, associada à ampla variação do teor de umidade do substrato nessa condição, que se manteve acima de 24%.

Destaca-se um aumento expressivo do volume de chuva equivalente entre os períodos de estiagem de 3 e 5 dias, passando de 4,75 mm para 12,76 mm, o que indica um acréscimo da capacidade de armazenamento hídrico do substrato nesse intervalo. Embora o volume máximo de chuva equivalente não tenha sido diretamente medido, os resultados sugerem que esse valor tende a ser atingido para períodos de estiagem em torno de 8 dias, quando o teor de umidade do substrato se aproxima de 7%, valor próximo ao menor teor de umidade observado experimentalmente (6%).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o telhado verde associado ao uso de geossintéticos constitui uma alternativa eficiente para a retenção de águas pluviais, sobretudo em eventos de baixa intensidade e após períodos de estiagem. Observou-se que, à medida que o substrato apresenta menores teores de umidade antecedente, o sistema tende a reter integralmente a água precipitada, enquanto condições iniciais mais úmidas resultam em grande redução da capacidade de retenção do substrato. Esses resultados evidenciam que o desempenho hidrológico do telhado verde é fortemente condicionado tanto pela umidade prévia do substrato quanto pela sazonalidade das chuvas, reforçando a importância de considerar os efeitos da estiagem e do teor de umidade antecedente do substrato na avaliação e no dimensionamento desses sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrio, E. P. D. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*. Vol. 27. p. 179-193.

Berntdsson, J.C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*. Vol. 36, p.351-360.

Blank, L.; Vasl, A.; Levy, S.; Grant, G.; Kadas G., Dafni, A.; Blaustein, L. (2013). Directions in green roof research: a bibliometric study. *Building Environment*. Vol. 66. p. 23-28.

Carpenter, C. M. G.; Todorov, D.; Driscoll, C. T; Montesdeoca, M. (2016). Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*. Vol. 218. p. 664-672.

Hashemi, S. S. G.; Mahmud, H. B.; Ashraf, M. A. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and recution of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 52. P. 669-679.

Hernández, J. D; Luengas, A. L. M. (1997). *Green roof systems. Transactions on ecology and the environment.* Vol. 16. P. 615-624.

IGS Brasil – Associação Brasileira de Geossintéticos. *Funções dos geossintéticos.* Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/2.pdf>. Acesso em: 24 de mar. 2017.

Louzada, T. S. *Emprego de geossintéticos na construção de telhados verdes: análise da capacidade de retenção de água*. Natal, 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

Morgan, S. P. E.; Celik, S.; Retzlaff, W. (2013). Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 139. p.471-478.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria de Vias Públicas. *Diretrizes de Projetos de Hidráulica e Drenagem.* 1999. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS TÉCNICAS INSTRUÇÕES NOVAS/Hidráulica e drenagem urbana/DH-H01.pdf>. Acesso em: 12. de abr. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. *Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Natal* – Relatório Final. Vol. 1. 2008. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjBzfDThavTAhUDkJAKHRqzBAQQFggjMAA&url=https%3A%2F%2Fnatal.rn.gov.br%2Fsemurb%2Fpaginas%2FFile%2FPublicacoes%2Freducao_riscos%2FVol_1_-_REL_AREAS_RISCO_-_Final.pdf&usg=AFQjCNFgPCK0uNgO8LH0sypmMtd_0zjREg&sig2=iAFC6YbbPv7w1CyX8IJmsQ&cad=rja>. Acesso em 12 de abr. 2017.

Rugh, C. L.; Fernandez, R. T. (2005). Green Roof Stormwater Retention: Effect of Roof Surface, Slope and Media Depth. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 34. p. 1036-1044.

Townshend, D. (2007). Study on green roof application in Hong Kong: Final Report. *Departamento de Serviços Arquitetônicos*. Hong Kong. 157p.

Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 57, p. 740-752.

SCUDELARI, Ada Cristina; MATOS, Maria de Fátima Alves de; AMARO, Venerando Eustáquio; CAMARA, Michel Rodrigues; CAVALCANTE, Augusto César Chaves. AVALIAÇÃO DE CURTO PRAZO DA RETRAÇÃO DAS FALÉSIAS DE TIBAU DO SUL-RN. *Revista de Geociências do Nordeste*, p. 202-2014, 22 set. 2021. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/46

Influência da Camada de Areia Adjacente à Geogrelha no Desempenho de Muro de Solo Coesivo Reforçado

Bruna Martins de Melo
Mestranda, EESC-USP, São Carlos, Brasil, brunamartins2024@usp.br

Bryan Robin Sanchez Ramirez
Mestrando, EESC-USP, São Carlos, Brasil, bryan.sanchez@usp.br

Gabriel da Silva Silverio
Doutorando, EESC-USP, São Carlos, Brasil, gabrielsilverio@usp.br

Marcell Gustavo Chagas Santos
Professor Doutor, EESC-USP, São Carlos, Brasil, marcell.gustavo@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Professor Associado, EESC-USP, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: O desempenho de muros de solo reforçados com geogrelhas está diretamente associado à interação entre o solo e a inclusão polimérica. Desse modo, o uso de solos coesivos, frequente em países tropicais, representa uma redução na eficiência da estrutura geotécnica, por apresentarem maior suscetibilidade a deformações e resultarem em deslocamentos laterais superiores aos observados em muros construídos com materiais granulares. Nesse contexto, uma estratégia para mitigar esses efeitos é a inserção de uma camada de material granular adjacente à geogrelha, cujo objetivo é melhorar a interação solo-reforço e reduzir deslocamentos laterais. Com isso, o presente estudo tem como objetivo, por meio de modelagem numérica pelo método dos elementos finitos, utilizando o software PLAXIS 2D, investigar a influência do confinamento das geogrelhas com material granular e da variação do número de camadas de reforço no comportamento deformacional de muros em solo reforçado constituídos por material coesivo. Os resultados indicam que a inserção da camada granular contribui para a redução dos deslocamentos laterais nas condições analisadas, desde que seja adotada uma espessura mínima eficaz. Espessuras reduzidas, como 0,20 m, não se mostraram suficientes para compensar a diminuição do número de reforços, enquanto camadas a partir de 0,40 m apresentaram melhorias mais consistentes.

PALAVRAS-CHAVE: Muro, Geogrelha, Solo coesivo, Camada Granular, Deslocamentos Laterais.

ABSTRACT: The performance of geogrid-reinforced soil walls is directly associated with the interaction between the soil and the polymeric reinforcement. Therefore, the use of cohesive soils, which is common in tropical countries, tends to reduce the efficiency of these geotechnical structures due to their greater susceptibility to deformation and the resulting lateral displacements, which are typically higher than those observed in walls constructed with granular materials. In this context, one strategy to mitigate these effects is the placement of a granular layer adjacent to the geogrid, aiming to improve the soil–reinforcement interaction and reduce lateral displacements. Thus, this study investigates, through finite element numerical modeling using PLAXIS 2D software, the influence of granular material placed adjacent to the geogrid and the variation in the number of reinforcement layers on the deformational behavior of reinforced soil walls constructed with cohesive backfill. The results indicate that the inclusion of a granular layer contributes to the reduction of lateral displacements under the analyzed conditions, provided that a minimum effective thickness is adopted. Reduced thicknesses, such as 0,20 m, were not sufficient to compensate for the reduction in the number of reinforcement layers, whereas layers with thicknesses of 0,40 m or greater resulted in more consistent improvements.

KEYWORDS: Wall, Geogrid, Cohesive soil, Granular layer, Lateral displacements.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho de muros de solo reforçado com geossintéticos depende de uma série de fatores relacionados ao comportamento do solo, às propriedades do reforço e à interação na interface solo-geossintético. Diversos estudos apontam que a eficiência do muro reforçado com geossintético está diretamente associada à capacidade de mobilização de tensões ao longo do elemento geossintético, influenciada por parâmetros de rigidez, espaçamento, condições de compactação e características do solo de aterro (Bathurst e Ezzein, 2016; Chen; Zhang; Xue, 2017; Ehrlich; Mirmoradi; Saramago, 2012; Ehrlich e Mirmoradi, 2013; Hatami e Bathurst, 2005; Mirmoradi; Ehrlich; Dieguez, 2016; Mirmoradi e Ehrlich, 2018a, 2018b; Riccio; Ehrlich; Dias, 2014; Saramago, 2002). Historicamente, verifica-se que o uso de solos granulares, de modo geral, proporciona melhor interação por atrito e maior confinamento, razão pela qual esses materiais são amplamente recomendados quando se busca desempenho superior em termos de resistência, capacidade de drenagem e estabilidade mecânica (Koerner, 2012; Elias; Hitti; Kastro, 2001; Berg; Christopher; Samtani, 2009).

No entanto, em regiões tropicais, a predominância de solos coesivos como material disponível para aterro representa um desafio, principalmente por razões econômicas. A adoção do solo local, contudo, é vantajosa por contribuir para a redução dos custos de implantação. A limitação do uso de solos coesivos está associada à menor resistência de interface com os geossintéticos, especialmente com as geogrelhas, e à maior plasticidade desses materiais. Essas características tendem a gerar deslocamentos mais elevados e deformações mais significativas, podendo comprometer a estabilidade do muro (Zornberg; Mitchell, 1994; Ehrlich; Mitchell, 1994; Palmeira, 2004; Yang; Chen; Guo, 2009). Estudos experimentais reforçam essa tendência, indicando que muros construídos com solos coesivos costumam apresentar maiores deslocamentos laterais e maior mobilização de tração nos reforços quando comparados a muros executados com solos granulares (Yang, 2012; Riccio; Basso; Lopes, 2014; Saramago, 2002).

Ensaios conduzidos com solos coesivos mostram que características como teor de finos e plasticidade influenciam significativamente a resistência mobilizada na interface (Jewell, 1996; Palmeira; Antunes, 2010; Lopes; Lopes, 2013; Farrag, 2004). Em geral, essa resistência tende a ser menor do que a observada em solos granulares, reduzindo a eficiência na transferência de tensões ao reforço e demandando maiores deformações para que a tração necessária seja mobilizada (Mirmoradi; Ehrlich, 2013).

Diante dessa realidade, uma alternativa que busca conciliar o uso do solo coesivo local sem perda de eficiência ou comprometimento da estabilidade consiste na inserção de uma camada granular ao redor da geogrelha (Abdi; Sadrnejad; Arjomand, 2009; Abdi; Arjomand, 2011; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006). Essa camada atua como zona de transição, melhorando a resistência de interface, favorecendo a drenagem e contribuindo para a redução dos deslocamentos laterais ao longo da vida útil da estrutura.

Apesar dos avanços já alcançados, observa-se que ainda existe necessidade de aprimoramento das abordagens numéricas para representar de forma mais consistente os mecanismos de interação solo-estrutura e, em particular, para compreender o efeito que a presença dessa camada granular exerce sobre a resposta em termos de deslocamento lateral do sistema. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar, por meio de modelagem numérica baseada no Método dos Elementos Finitos, utilizando o software PLAXIS 2D, a influência da presença de material granular adjacente à geogrelha e da variação do número de camadas de reforço no comportamento deformacional de muros de solo reforçado construídos com material coesivo. Busca-se, ainda, avaliar a contribuição desses fatores para a redução dos deslocamentos laterais e determinar a espessura de material granular a partir da qual o aumento dessa espessura não resulta em reduções relevantes dos deslocamentos laterais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seção típica do muro reforçado

Para a realização das análises numéricas em termos de tensão e deformação, adotou-se a seção típica proposta por Meireles *et al.* (2022), conforme mostrado na Figura 1. A modelagem numérica foi realizada pelo Método dos Elementos Finitos, por meio do software PLAXIS 2D. A seção foi discretizada em 21 camadas de

solo, cada uma com 0,2 m de espessura. Para simular o processo de compactação, uma carga estática distribuída de 30 kN/m/m foi aplicada no topo e na base de cada camada durante as etapas construtivas, seguindo a metodologia proposta por Mirmoradi e Ehrlich (2014).

A seção típica, ou seja, aquela composta integralmente por material coesivo, foi discretizada em elementos triangulares de 15 nós. A discretização da malha foi realizada com refinamento local na região de interface solo-reforço e na face da estrutura, visando representar com maior precisão as deformações nessas áreas.

Tabela 1. Principais características geométricas da seção de análise.

Descrição	Valor adotado
Altura livre do muro (m)	4,20
Inclinação da face	1H:10V
Comprimento dos reforços (m)	3,50
Espaçamento vertical entre os reforços (m)	0,40

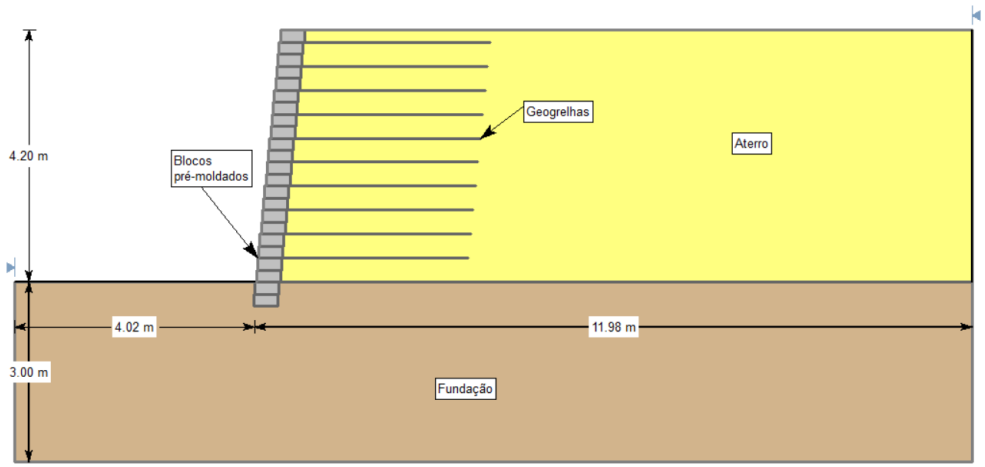


Figura 1. Seção típica utilizada na análise numérica.

2.2 Propriedades dos materiais

Em relação às propriedades dos materiais, o aterro consiste em um solo residual de gnaisse jovem, que é um solo tropical de grãos finos típico, conforme caracterizado integralmente por Riccio, Basso e Lopes (2014). O material granular é uma areia limpa, conforme descrito e testado por Mirmoradi e Ehrlich (2014). Para considerar os efeitos da compactação e a não linearidade, o modelo *Hardening Soil*, detalhado por Meireles *et al*. (2022), foi adotado como modelo constitutivo tanto para o aterro quanto para a areia. Além disso, o solo da fundação foi modelado como um material elástico-linear perfeitamente plástico com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Para o material coesivo utilizado como aterro, adotou-se o modelo constitutivo *Hardening Soil*. Foram considerados os parâmetros E_{50}^{ref} igual a 6 MPa, E_{oed}^{ref} igual a 6 MPa e E_{ur}^{ref} igual a 30 MPa. Nesse modelo, E_{50}^{ref} representa o módulo secante correspondente a 50% da tensão desviadora última obtida em ensaio triaxial, enquanto E_{ur}^{ref} corresponde ao módulo de descarregamento-recarregamento do material. Além disso, o software considera o módulo tangente obtido em ensaios edométricos (E_{oed}^{ref}) e o coeficiente exponencial (m) aplicado na relação entre rigidez e nível de tensão, que foi adotado igual a 0,70. Na ausência de dados experimentais específicos para a determinação independente desses parâmetros, adotou-se E_{50}^{ref} igual a E_{oed}^{ref}, em consonância com a abordagem adotada por Meireles *et al*. (2022). O coeficiente de Poisson (ν) foi igual a 0,31 e, para este material, adotou-se fator de atrito (R_{inter}) igual a 0,50.

O modelo *Hardening Soil* também foi considerado para o material granular adjacente à geogrelha, com os parâmetros E_{50}^{ref} igual a 40 MPa, E_{oed}^{ref} igual a 40 MPa e E_{ur}^{ref} igual a 120 MPa, com coeficiente exponencial de 0,50 e fator de atrito de 0,70.

Os reforços geossintéticos foram modelados como materiais linearmente elásticos, assumindo-se perfeita aderência na interface solo-reforço, como simplificação de modelagem. Os elementos de reforço considerados foram geogrelhas com a rigidez isotrópica de 800 kN/m. Para os blocos de face do muro foram utilizados modelos com comportamento elástico-linear, com fator de atrito na interface solo-bloco igual a 0,30, módulo de elasticidade de 50 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,20. A Tabela 2 reúne todas as propriedades dos materiais utilizados na análise.

Tabela 2. Parâmetros adotados na modelagem numérica para o material coesivo, granular, blocos de face e fundação das seções de análise.

Material	Aterro (Material Coesivo)	Material Granular	Bloco de face	Fundação
Modelo Constitutivo	*Hardening Soil*	*Hardening Soil*	Linear elástico	Elastoplástico
Peso Específico - γ (kN/m³)	18,80	20	25	20
Ângulo de Atrito - $\emptyset$ (°)	12	40	-	35
Coesão (kPa)	21	1	-	10
Ângulo de Dilatância – ψ (°)	0	0	-	0
E_{50}^{ref} (MPa)	6	40	-	-
E_{oed}^{ref} (MPa)	6	40	-	-
E_{ur}^{ref} (MPa)	30	120	-	-
E (MPa)	-	-	50	50
Coeficiente Exponencial - m	0,70	0,50	-	-
Coeficiente de Poisson - v	0,31	0,30	0,20	0,30
Fator de atrito - R_{inter}	0,50	0,70	0,30	-

2.3 Compactação na modelagem numérica

O processo de compactação na modelagem foi realizado conforme proposto por Mirmoradi e Ehrlich (2014). Segundo o procedimento apresentado pelos autores, a compactação de cada camada é simulada por um único ciclo de carregamento e descarregamento, com a aplicação da tensão vertical induzida pela compactação ($\sigma_{zc,i}$) no topo e na base da camada. Essa abordagem tem sido empregada em outros estudos, como os trabalhos de Mirmoradi e Ehrlich (2015) e de Meireles *et al*. (2022), que relatam resultados satisfatórios em termos de resposta numérica do sistema, reforçando a adequação do método para esse tipo de análise.

2.4 Descrição dos cenários avaliados

As análises numéricas realizadas neste trabalho tiveram por objetivo avaliar a influência da variação do número de geogrelhas e da adoção de diferentes espessuras de camadas granulares adjacentes às geogrelhas sobre o comportamento deformacional de um muro de solo reforçado. Para isso, considerou-se inicialmente uma seção típica composta integralmente por material coesivo e reforçada com dez geogrelhas distribuídas ao longo do muro, espaçadas em 0,40 m, conforme indicado na Tabela 1 e Figura 1. Esse cenário configurou-se como cenário de referência para comparação com os demais resultados.

Posteriormente, propôs-se uma modificação na configuração do reforço, reduzindo-se o número de geogrelhas para cinco unidades e incorporando, em cada nível de reforço, uma camada granular posicionada acima e abaixo da geogrelha, de modo que o elemento de reforço permanecesse centrado no interior da camada granular. A espessura dessa camada foi variada sistematicamente, com o objetivo de identificar sua influência

no comportamento deformacional do sistema. As condições avaliadas estão sucintamente descritas na Tabela 3.

Desse modo, ao todo foram conduzidas cinco análises numéricas: uma configuração de referência com dez reforços e quatro cenários com cinco reforços associados a camadas granulares de diferentes espessuras. A comparação entre os diferentes casos analisados permitiu avaliar a influência da inserção de camadas granulares sobre os deslocamentos laterais do muro, bem como verificar em que medida esse arranjo possibilita a redução do número de geogrelhas mantendo níveis de deslocamento semelhantes aos observados na configuração de referência.

Tabela 3. Espessuras da camada granular adotadas nos cenários analisados.

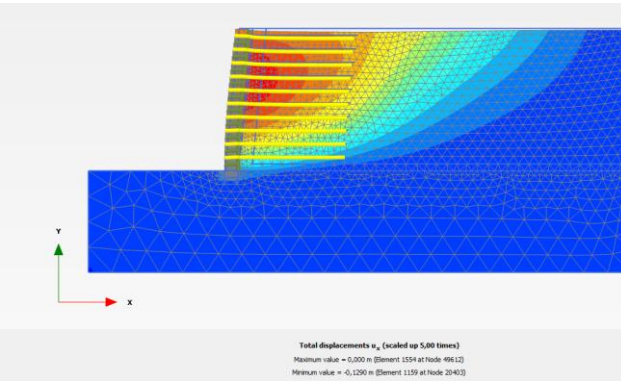
Cenário	Espessura total de material granular (m)
1	0,00
2	0,20
3	0,40
4	0,60
5	0,80

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

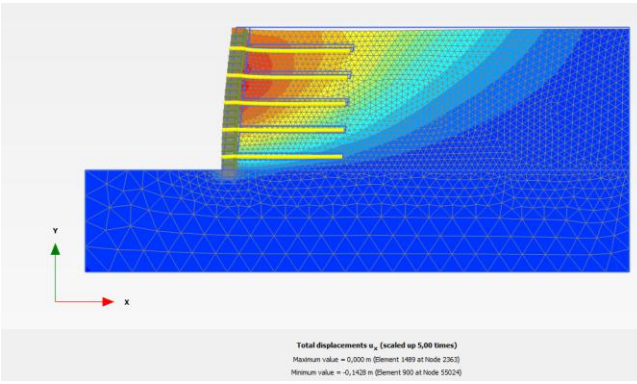
Os resultados apresentados na Figura 2 e Figura 3 demonstram que, nas condições analisadas, o aumento da espessura da camada granular ao redor da geogrelha está associado à redução dos deslocamentos laterais. Observou-se que, no cenário 2, mesmo com a inserção de uma camada granular de 0,20 m envolvendo cada geogrelha, a configuração com cinco camadas de reforço apresentou deslocamentos laterais superiores aos do cenário de referência com dez camadas. Esse resultado indica que, para a configuração analisada, a introdução da camada granular não foi suficiente para compensar a redução do número de geogrelhas, permanecendo o efeito da diminuição do reforço como o fator predominante no comportamento deformacional do muro.

A partir da espessura de 0,40 m, os resultados apresentam reduções progressivas nos deslocamentos laterais. Esse comportamento reforça a influência direta das condições de interface na redistribuição de tensões, especialmente quando o material granular passa a compor uma zona suficientemente espessa para alterar o campo de esforços ao redor da geogrelha.

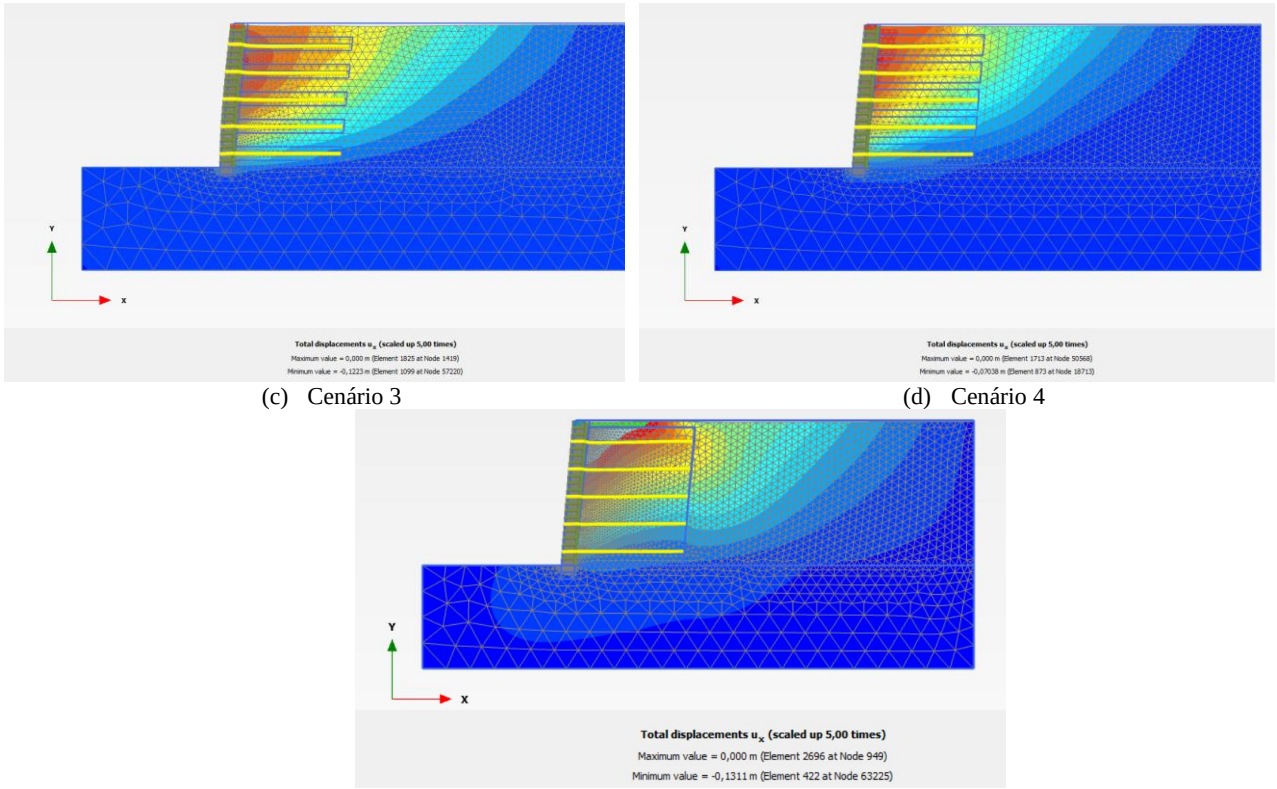
Para as espessuras de 0,60 e 0,80 m, observou-se que as curvas se tornam mais próximas, indicando que o aumento adicional da espessura da camada granular passa a produzir ganhos pouco expressivos em termos de diminuição do deslocamento lateral. Essa tendência é compatível com o observado por Mirmoradi e Ehrlich (2014), que apontam a existência de um limite prático para o efeito da melhoria regional ao redor do reforço, a partir do qual incrementos adicionais na espessura geram reduções pouco expressivas nos deslocamentos. Além disso, verificou-se que o cenário 4 apresentou deslocamentos ligeiramente menores que o cenário 5, sobretudo nas regiões intermediária e superior do muro, comportamento coerente com os mecanismos de mobilização de tração no reforço discutidos por Mirmoradi e Ehrlich (2013).



(a) Cenário 1



(b) Cenário 2



(c) Cenário 3 (d) Cenário 4

(e) Cenário 5

Figura 2. Deslocamento horizontal (*Ux*) para as diferentes espessuras de camada granular avaliadas.

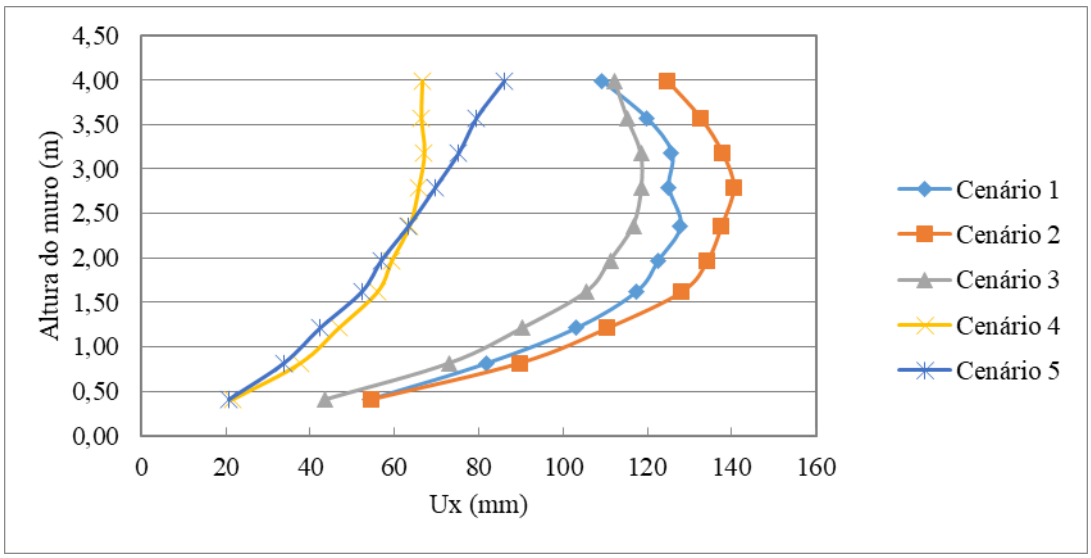


Figura 3. Comparação das curvas de deslocamento lateral nos diferentes cenários avaliados.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos possibilitam inferir que, nas condições analisadas, a introdução de uma camada granular adjacente à geogrelha contribui para a redução dos deslocamentos laterais do muro, mesmo quando se utiliza um solo coesivo como material de aterro. Destaca-se, contudo, que essa melhoria não se manifesta de forma imediata. Embora a adoção da camada granular tenha como finalidade reduzir os deslocamentos do muro, inclusive possibilitando a diminuição do número de reforços, a espessura de 0,20 m (cenário 2) apresentou desempenho inferior ao cenário de referência, resultando em deslocamentos superiores aos

observados no cenário 1. Tal comportamento indica a existência de uma espessura mínima eficaz, abaixo da qual o material granular não é capaz de compensar a redução do número de geogrelhas. Isso sugere que, nessa condição, a camada ainda não promove alterações suficientemente significativas no campo de tensões nem no mecanismo de interação solo–reforço.

A partir de 0,40 m, os benefícios passam a se manifestar de forma mais consistente, com reduções progressivas dos deslocamentos laterais. Entre os cenários avaliados, a espessura total de 0,60 m, distribuída em 0,30 m acima e 0,30 m abaixo da geogrelha, revelou melhor desempenho em termos de deslocamentos laterais, pois apresentou comportamento deformacional próximo ao observado para a espessura de 0,80 m. Além disso, considerando que a configuração com 0,80 m já se aproxima de um muro praticamente constituído por material granular, a solução com 0,60 m mostrou-se tecnicamente eficiente, ao mesmo tempo em que preserva a utilização predominante do solo coesivo disponível *in loco*, possibilita a redução do número de reforços e mantém desempenho satisfatório.

Diante disso, os resultados indicam que a adoção de uma camada granular intermediária, com espessura próxima a 0,60 m, representa uma alternativa viável do ponto de vista técnico. Em contrapartida, camadas muito finas, como a de 0,20 m, não se mostraram eficazes, o que sugere que espessuras abaixo desse limite não se mostraram eficazes nas condições analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, Mahmood Reza; ARJOMAND, Mohammad Ali. *Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand*. Geotextiles and Geomembranes, v. 29, n. 6, p. 588–595, 2011.

ABDI, Mahmood Reza; SADRNEJAD, S. A.; ARJOMAND, M. A. *Strength enhancement of clay by encapsulating geogrids in thin layers of sand*. Geotextiles and Geomembranes, v. 27, n. 4, p. 447–455, 2009.

BATHURST, R. J.; EZZEIN, F. M. *Geogrid pullout load–strain behaviour and modelling using a transparent granular soil*. Geosynthetics International, v. 23, n. 4, p. 271–286, 2016.

BERG, R. R.; CHRISTOPHER, B.; SAMTANI, N. C. *Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*. Washington: Federal Highway Administration, 2009.

CHEN, J.; ZHANG, W.; XUE, J. *Zoning of reinforcement forces in geosynthetic reinforced cohesionless soil slopes*. Geosynthetics International, v. 24, n. 6, p. 565–574, 2017.

EHRLICH, M.; MIRMORADI, S. H.; SARAMAGO, R. P. *Evaluation of the effect of compaction on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls*, 2012.

EHRLICH, M.; MIRMORADI, S. H. *Evaluation of the effects of facing stiffness and toe resistance on the behavior of GRS walls*. Geotextiles and Geomembranes, v. 40, p. 28–36, 2013.

EHRLICH, M.; MITCHELL, J. K. *Working stress design method for reinforced soil walls*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 120, n. 4, p. 625–645, 1994.

ELIAS, V.; HITTI, M.; KASTRO, J. *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes: design and construction guidelines*. Washington: Federal Highway Administration (FHWA), 2001.

FARRAG, K. *Application of geogrids in cohesive soils*. Geotextiles and Geomembranes, v. 22, n. 4, p. 239–257, 2004.

HATAMI, K.; BATHURST, R. J. *Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions*. Canadian Geotechnical Journal, v. 42, n. 4, p. 1066–1085, 2005.

JEWELL, R. A. *Soil reinforcement with geotextiles*. London: CIRIA/Butterworth-Heinemann, 1996.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012.

LOPES, M. L.; LOPES, M. S. *Influence of geosynthetic characteristics on the interface behaviour with soils.* Geotextiles and Geomembranes, v. 38, p. 1–15, 2013.

MEIRELES, L. C.; RICCIO FILHO, M. V.; PITANGA, H. N.; FERRAZ, R. L.; SILVA, T. O.; DIAS NETO, S. L. *Numerical evaluation of the influence of compaction and soil strength parameters on GRSW*. Soils and Rocks, v. 46, e202304732, 2022.

MIRMORADI, S. H.; EHRLICH, M.; DIEGUEZ, C. *Evaluation of the combined effect of toe resistance and facing inclination on the behavior of GRS walls*. Geotextiles and Geomembranes, v. 44, n. 3, p. 287–294, 2016.

MIRMORADI, S. H.; EHRLICH, M. *Experimental evaluation of the effect of compaction near facing on the behavior of GRS walls*. Geotextiles and Geomembranes, v. 46, n. 5, p. 566–574, 2018b.

MIRMORADI, S. H.; EHRLICH, M. *Numerical simulation of compaction-induced stress for the analysis of RS walls under working conditions*. Geotextiles and Geomembranes, v. 46, n. 3, p. 354–365, 2018a.

MIRMORADI, S. H.; EHRLICH, M. *Modeling of the compaction-induced stress on reinforced soil walls*. Geotextiles and Geomembranes, v. 43, n. 1, p. 82–88, 2015.

MIRMORADI, S. M.; EHRLICH, M. *Load transfer mechanisms in reinforced soil walls*. Geotextiles and Geomembranes, v. 37, p. 1–13, 2013.

MIRMORADI, S. M.; EHRLICH, M. *Numerical simulation of compaction-induced stresses in GRS walls.* Geotextiles and Geomembranes, v. 42, n. 5, p. 399–409, 2014.

MUTHUKUMARAN, A. E.; ILAMPARUTHI, K. *Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering*. Geotextiles and Geomembranes, v. 24, n. 4, p. 210–219, 2006.

PALMEIRA, E. M. *Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis*. Geosynthetics International, v. 11, n. 4, p. 273–300, 2004.

PALMEIRA, E. M.; ANTUNES, L. *Application of pullout tests to investigate the interaction between geogrids and cohesive soils*. Geotextiles and Geomembranes, v. 28, n. 4, p. 257–271, 2010.

RICCIO, M.; EHRLICH, M.; DIAS, D. *Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils*. Geotextiles and Geomembranes, v. 42, n. 2, p. 127–138, 2014.

RICCIO, M. V.; BASSO, P.; LOPES, R. M. *Numerical evaluation of the behavior of reinforced soil walls subjected to compaction*. Soils and Rocks, v. 37, n. 3, p. 219–232, 2014.

SARAMAGO, R. P. *Study of the influence of compaction on the behavior of reinforced soil walls using physical models.* 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

YANG, X. *Pullout and interface behaviour of geogrids in cohesive soils*. Geotextiles and Geomembranes, v. 35, p. 1–10, 2012.

YANG, X.; CHEN, J.; GUO, L. *Interface strength and deformation characteristics of geogrids embedded in cohesive soil*. Engineering Geology, v. 106, n. 1, p. 40–47, 2009.

ZORNBERG, J. G.; MITCHELL, J. K. *Reinforced soil structures with poorly draining backfills*. Geotechnical Special Publication, ASCE, n. 44, 1994.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/47

Influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica no desempenho mecânico e térmico de soldas de geomembranas de PEAD

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateusfleury@ufscar.br

Erica F. S. Tirelli
Coordenadora Química, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, erica.tirelli@maua.br

Fernando L. Lavoie
Professor Doutor, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, Brasil, fernando.lavoie@usp.br

RESUMO: Geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas em obras geotécnicas e ambientais, sendo a integridade das soldas determinante para o desempenho do sistema. Este estudo avaliou a influência da temperatura da cunha térmica e da velocidade de soldagem nas propriedades mecânicas e térmicas de soldas por termofusão em duas geomembranas comercialmente empregadas: uma lisa de 1,0 mm e outra texturizada de 2,0 mm. As soldas foram executadas sob condições controladas, considerando temperaturas de 390 °C e 450 °C e velocidades de 1 m/min e 2 m/min. As emendas foram caracterizadas por ensaios destrutivos de cisalhamento e descolamento, além de análise termogravimétrica em amostras da zona da solda (WZ) e da zona afetada pelo calor (HAZ). Os resultados indicaram que todas as condições atenderam aos requisitos normativos mínimos, embora com margens de segurança distintas entre os materiais e parâmetros avaliados. A condição de 450 °C e 2 m/min apresentou desempenho mais consistente para ambas as geomembranas. Ressalta-se, contudo, que essa recomendação é válida para as condições específicas investigadas, devendo ser confirmada por controle tecnológico em campo antes da aplicação em outros materiais ou contextos.

PALAVRAS-CHAVE: Solda por Termofusão, Cunha Quente, Cisalhamento, Descolamento, Análise Termogravimétrica, Temperatura.

ABSTRACT: High-density polyethylene (HDPE) geomembranes are widely used as hydraulic barriers in geotechnical and environmental works, and the integrity of welded seams is critical to overall system performance. This study evaluated the influence of hot-wedge temperature and welding velocity on the mechanical and thermal properties of thermo-fused seams in two commercially available geomembranes: a 1.0 mm thick smooth geomembrane and a 2.0 mm thick textured geomembrane. Welding was performed under controlled conditions at temperatures of 390 °C and 450 °C and velocities of 1 m/min and 2 m/min. The welded joints were characterized by destructive shear and peel tests, in addition to thermogravimetric analysis conducted on specimens collected from the weld zone (WZ) and the heat-affected zone (HAZ). The results indicated that all welding conditions satisfied the minimum normative requirements, although distinct safety margins were observed depending on geomembrane type and welding parameters. The condition of 450 °C and 2 m/min provided the most consistent overall performance for both geomembranes. However, this recommendation is valid only for the specific materials and conditions investigated and should be confirmed through field quality control procedures prior to application to other materials or operational contexts.

KEYWORDS: Thermo-fusion Welding; Hot Wedge; Shear Strength; Peel Strength; Thermogravimetric Analysis; Temperature.

1 INTRODUÇÃO

A geomembrana, especialmente a de polietileno de alta densidade (PEAD; Vilar et al., 2015), é um dos geossintéticos mais empregados em obras geotécnicas e ambientais. Em razão de sua eficiência econômica, elevada resistência mecânica e compatibilidade química, as geomembranas de PEAD constituem atualmente o material predominante utilizado como sistema de barreira de fluxo em instalações ambientais (Koerner, 2005; Scheirs, 2009).

Ao longo de sua vida útil, a geomembrana encontra-se exposta a agentes ambientais, os quais desencadeiam processos de degradação oxidativa. A oxidação primária do PEAD inicia-se com a ruptura das cadeias poliméricas e a subsequente formação de radicais livres. O processo ocorre em duas etapas principais: inicialmente, uma reação em cadeia promove a formação de peróxidos e hidroperóxidos. Posteriormente, a propagação da cadeia gera novos radicais, uma vez que os hidroperóxidos são convertidos em álcoois (Rowe e Shoaib, 2018).

As geomembranas são usualmente soldadas em campo por meio de equipamentos específicos e procedimentos rigorosamente controlados, a fim de garantir a qualidade da solda. A região da solda é reconhecida como um ponto potencialmente crítico do sistema de barreira de fluxo, pois constitui uma zona de maior suscetibilidade a danos futuros e, consequentemente, à ocorrência de percolação na barreira geotécnica.

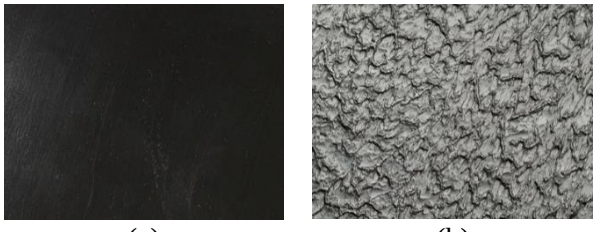
Diversos estudos avaliaram o comportamento de soldas de geomembranas de PEAD. Rowe e Shoaib (2017) investigaram a imersão, por quatro anos, de soldas de geomembrana de PEAD com espessura de 1,5 mm em solução de lixiviado, enquanto Francey e Rowe (2023a) estudaram o comportamento de geomembranas submetidas a diferentes parâmetros de soldagem. Rowe e Shoaib (2018) avaliaram amostras soldadas de geomembrana de PEAD imersas em solução salina por três anos, e Francey e Rowe (2023b) analisaram o efeito dos parâmetros de soldagem na degradação de geomembranas de PEAD após 12 anos de imersão em lixiviado sintético sob condições laboratoriais. Ali e Rowe (2024) investigaram soldas de geomembranas após imersão em soluções sintéticas de lixiviado a 85 °C. Em conjunto, esses estudos demonstram a relevância da avaliação e da especificação das soldas, com ênfase no consumo de antioxidantes e na resistência à fissuração sob tensão (*stress cracking*).

O presente estudo investigou a influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica no comportamento mecânico e térmico de soldas de geomembranas de PEAD, considerando dois tipos de geomembranas: lisa com espessura de 1,0 mm (GM-LI) e texturizada com espessura de 2,0 mm (GM-TX).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram avaliados dois tipos de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD): uma geomembrana lisa com espessura de 1,0 mm (GM-LI; Figura 1a) e uma geomembrana texturizada com espessura de 2,0 mm (GM-TX; Figura 1b). A primeira é fabricada a partir do processo de extrusão por matriz plana enquanto a segunda é extrusada a partir do processo de matriz balão. Essas geomembranas são comercialmente disponíveis e amplamente utilizadas no mercado brasileiro, tendo sido selecionadas com o objetivo de avaliar a influência da textura superficial na qualidade da solda. A Tabela 1 apresenta um resumo de suas propriedades (com desvio-padrão indicado entre parênteses). Demais propriedades de resistência à tração, ao rasgo e ao puncionamento atendem à GM-13 e não são discutidas neste trabalho.



(a) (b)

Figura 1. Geomembranas investigadas: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

Tabela 1. Propriedades das geomembranas investigadas e requisitos da GM-13 (GRI, 2025).

Propriedade	Norma	GM-LI		GM-TX	
		Valores	Requisitos GM-13	Valores	Requisitos GM-13
Espessura nominal – mm	ASTM D 5199 (2019) ASTM D 5994 (2021)	1,134 (0,141)	Nominal	1,911 (0,076)	-5% Nominal
Altura de aspereza – mm	ASTM D 7466 (2010)	N.A.	N.A.	1,053 (0,165)	≥0,40
Densidade – g/cm³	ASTM D 792 (2020)	0,941 (0,000)	≥0,940	0,944 (0,000)	≥0,940
Teor de Negro de fumo – %	ASTM D 1603 (2020)	1,820 (0,051)	2,0 – 3,0	2,516 (0,025)	2,0 – 3,0
Stress cracking (30%) – h	ASTM D 5397 (2020)	> 500	≥500	> 500	≥500
Tempo de indução oxidativa – h	ASTM D 3895 (2019)	>100	≥100	>100	≥100

* Resultado dos ensaios realizados na direção transversal

Cada geomembrana foi fornecida em rolos com 30 cm de largura e aproximadamente 600 cm de comprimento. Essa largura reduzida, em comparação com aquelas usualmente fornecidas para instalação em campo, justifica-se pelo fato de os materiais terem sido disponibilizados para esta pesquisa durante o Curso Brasileiro de Instalação de Geomembranas "Paulo Kenji Açakura" – Edição 2024, realizado no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). Assim, como o foco deste estudo recai sobre as soldas das geomembranas, a diferença entre as dimensões das amostras fornecidas e aquelas utilizadas em escala real não compromete os resultados obtidos.

2.2 Métodos

Amostras de geomembranas foram soldadas por termofusão sob condições controladas, e corpos de prova tanto das geomembranas quanto de suas respectivas soldas foram submetidos a ensaios de caracterização. Os resultados foram comparados com as recomendações da norma brasileira NBR 16199 [20]. Os procedimentos adotados são descritos nas subseções a seguir.

2.2.1 Execução das soldas das geomembranas e amostragem

A primeira etapa do estudo consistiu na execução das soldas das geomembranas por termofusão. O processo de soldagem foi conduzido pelo instrutor responsável pela parte prática do Curso Brasileiro de Instalação de Geomembranas "Paulo Kenji Açakura" (Sr. Luduik Rosales), garantindo elevado nível de controle e precisão na execução das soldas.

Quatro painéis de cada tipo de geomembrana, com dimensões de 30 cm de largura por 600 cm de comprimento, foram dispostos de forma contígua, conforme ilustrado na Figura 2a, possibilitando a execução de duas soldas para cada geomembrana. A soldagem por termofusão foi realizada com equipamento modelo SMD-NS900, fabricado pela Zemo Welding Machinery Co., LTD. De acordo com o fabricante, o equipamento permite ajuste de temperatura entre 0 °C e 450 °C, velocidades de soldagem entre 0,5 e 5,0 m/min e é adequado para materiais com espessura entre 1,0 e 3,0 mm, características compatíveis com as geomembranas avaliadas neste estudo. Cabe destacar que, diferentemente do procedimento usual, a solda na geomembrada texturizada foi realizada sem remoção da textura ranhurada (por lixamento) antes da soldagem.

Para cada solda executada, um trecho inicial (detalhado na Seção 2.2.2) foi descartado, pois foi utilizado para verificação do correto posicionamento do equipamento. As soldas executadas foram do tipo dupla cunha aquecida, constituídas por dois cordões paralelos de fusão separados por um canal de ar, empregado para ensaio de controle de qualidade visando à verificação da estanqueidade (ensaio de canal pressurizado; ASTM D5820 ; 2023).

As operações de soldagem foram realizadas em duas temperaturas, 390 °C e 450 °C, cada uma aplicada à união de dois painéis, justificando a disposição de quatro painéis contíguos (Figura 2). Para cada temperatura, a velocidade de soldagem variou entre 1,0 m/min, 2,0 m/min e 3,0 m/min, sendo os pontos de transição entre



(a) (b)

Figura 2. Processo de soldagem: (a) disposição dos painéis de geomembrana para o processo de soldagem, e (b) marcas nos painéis de geomembrana indicando a mudança de velocidade do equipamento.

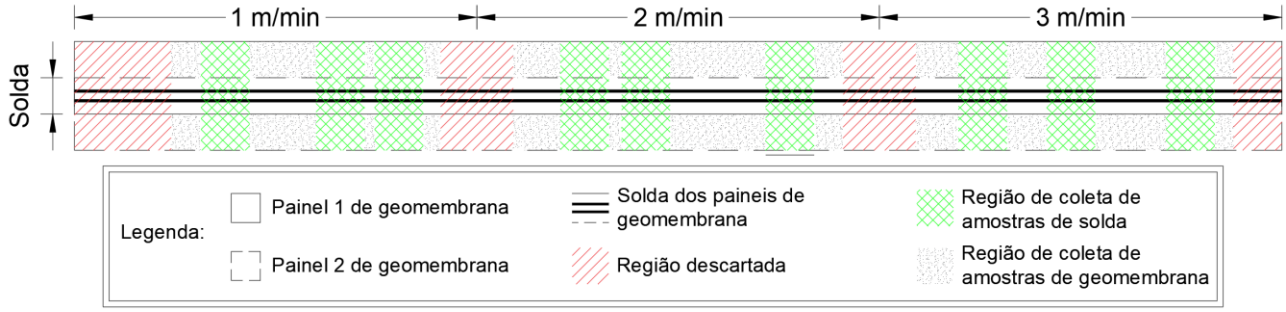


Figura 3. Regiões descartadas para amostragem nos painéis de geomembrana soldados.

velocidades devidamente marcados (Figura 2b). As soldas executadas a 3,0 m/min não fazem parte do escopo deste trabalho.

Todos os parâmetros de soldagem foram registrados, a fim de garantir rastreabilidade e permitir a correlação entre condições de execução e resultados obtidos. Além dos parâmetros do equipamento, as soldas foram realizadas sob temperatura ambiente de 21 ± 0,5 °C e umidade relativa de 62%.

Após a execução das soldas, os painéis foram transportados ao Laboratório de Geossintéticos do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) e armazenados conforme a ASTM D4873 (2021). Posteriormente, foram dispostos sobre uma bancada de trabalho e divididos em diferentes regiões (Figura 3). As extremidades e as zonas de transição foram descartadas para evitar heterogeneidade. As regiões destinadas à coleta de amostras de solda foram selecionadas aleatoriamente, consistindo em três segmentos de aproximadamente 30 cm para cada velocidade de soldagem. As regiões remanescentes de cada painel foram destinadas à amostragem da geomembrana, desconsiderando-se as soldas.

2.2.2 Caracterização das soldas das geomembranas

O comportamento das soldas foi analisado por meio do ensaio de descolamento e cisalhamento (ASTM D6392, 2018). Corpos de prova com dimensões de 25 mm × 150 mm (direções transversal e longitudinal, respectivamente) foram ensaiados em equipamento universal de tração/compressão. Cada amostra foi fixada com garras de mordente (mínimo de 25 mm em cada extremidade) e submetida a deslocamento constante de 50 mm/min até a ruptura. Foram realizados dez ensaios (cinco para cada solda).

No ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram fixados com 25 mm em cada extremidade e tracionados à velocidade constante de 50 mm/min. O ensaio foi encerrado ao atingir 50% de deformação ou a ruptura, prevalecendo o que ocorresse primeiro. Cinco amostras foram ensaiadas nessa condição.

A Análise Termogravimétrica (TG) foi realizada com aquecimento à taxa constante, em duas etapas sob purga de nitrogênio na faixa de 25 °C a 600 °C. Contudo, para cada solda, foram amostradas duas regiões específicas – Zona Afetada pelo Calor (HAZ; *Heat Affected Zone*) e Zona da Solda (WZ; *Weld Zone*) – a fim de comparar o comportamento do material (Figura 4).

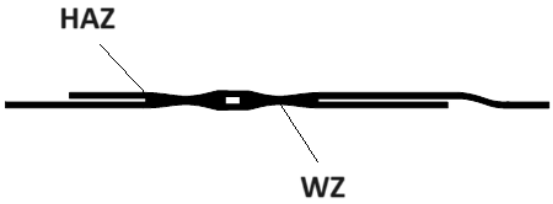


Figura 5. Pontos de amostragem nas soldas das geomembranas selecionados para ensaios Análise Termogravimétrica (TG).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios destrutivos nas soldas de geomembrana

A avaliação dos parâmetros de solda deve seguir as recomendações da norma brasileira NBR 16199 (ABNT, 2020), segundo a qual os parâmetros mínimos de resistência das soldas de geomembranas – baseados em ensaios destrutivos – são estabelecidos em função da espessura da geomembrana. As espessuras das geomembranas GM-LI e GM-TX são, respectivamente, 1,134 mm e 1,911 mm (Tabela 1). Assim, foram adotadas como espessuras de referência 1,0 mm para a GM-LI e 2,0 mm para a GM-TX.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados de resistência ao cisalhamento e ao descolamento das soldas das geomembranas, respectivamente, para cada cenário de soldagem avaliado. As barras representam os valores médios, enquanto as barras de erro indicam os valores mínimo e máximo obtidos a partir de cinco corpos de prova. As setas de dupla extremidade indicam a margem acima da resistência mínima recomendada pela NBR 16199 (ABNT, 2020), representada pela linha tracejada.

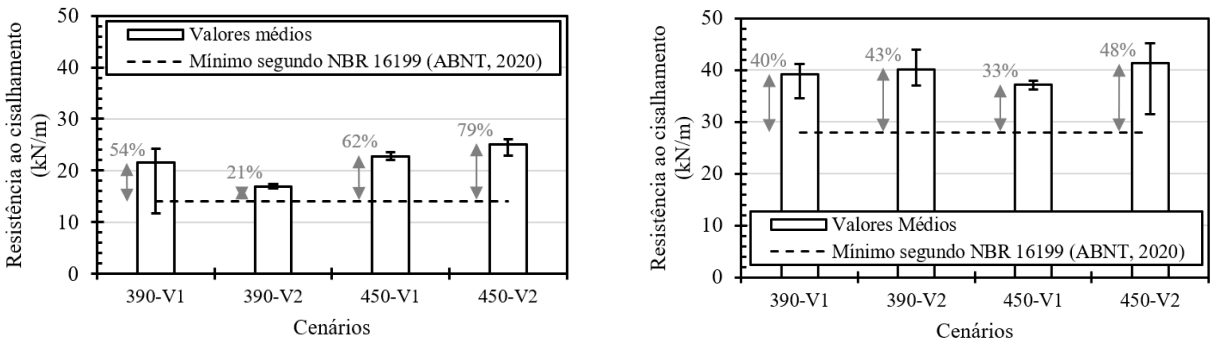


Figura 6. Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento nas soldas das geomembranas de PEAD: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

Conforme observado na Figura 6, os valores de resistência ao cisalhamento em todos os cenários ensaiados superaram os limites mínimos estabelecidos pela norma de referência. Entre as geomembranas avaliadas, a GM-TX apresentou a menor margem de segurança (em média 41% acima do valor mínimo exigido) se comparada a GM-LI (em média 54% acima), com exceção do cenário 390-V2, em que a resistência ao cisalhamento da solda da GM-LI apresentou margem inferior ao mesmo cenário da GM-TX.

A comparação entre as velocidades de soldagem revelou que as soldas executadas a 2 m/min, de modo geral, apresentaram maiores resistências ao cisalhamento do que aquelas realizadas a 1 m/min (com exceção da GM-SM soldada a 390 °C). Quanto à temperatura da cunha térmica, os

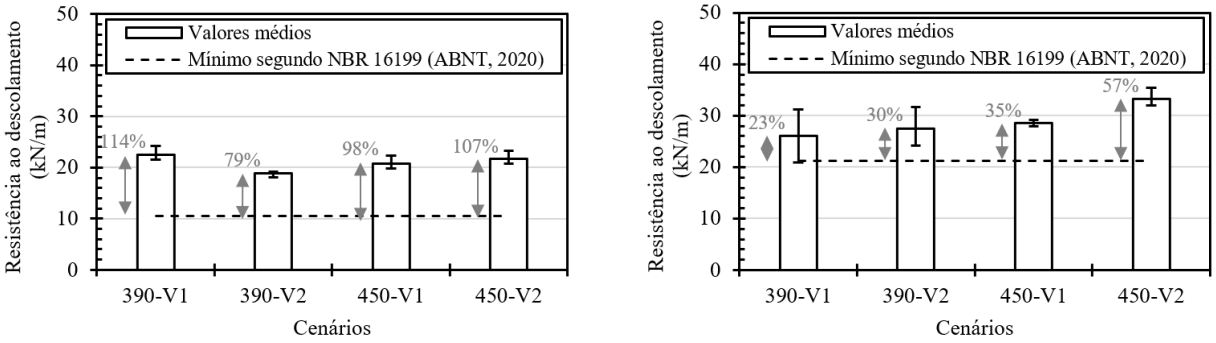


Figura 7. Resultados dos ensaios de resistência ao descolamento nas soldas das geomembranas de PEAD: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

resultados mostraram comportamento distinto entre os materiais: a GM-LI apresentou maiores resistências ao cisalhamento quando soldada a 450 °C, enquanto a GM-TX apresentou resultados, de certa forma, semelhantes (coeficiente de variação de 4,5% - 1,79 kN/m) na resistência ao cisalhamento entre as soldas realizadas com temperatura diferentes).

Todos os cenários avaliados para a GM-LI apresentaram resistências ao descolamento superiores ao valor mínimo exigido pela norma (Figura 7). Por outro lado, embora a GM-TX tenha apresentado valores médios de resistência ao descolamento iguais ou ligeiramente superiores ao limite mínimo, um corpo de prova soldados a 390 °C não atingiu a resistência mínima exigida. Com base nos resultados da Figura 7, não foi possível identificar uma tendência clara quanto à influência da velocidade ou da temperatura de soldagem na obtenção da maior resistência ao descolamento. No caso da GM-LI, as margens de resistência ao deslocamento em relação ao valor mínimo exigido foram, de certa forma semelhantes (todas superiores a 75%). Já no caso da GM-TX, nota-se que as resistências ao descolamento foram superiores nos cenários em que a execução da solda ocorreu sob temperatura de 450°C ou com velocidade de 2 m/min.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento e descolamento não indicam uma única condição ótima de soldagem aplicável a todos os tipos de geomembrana. Ao contrário, a condição de soldagem mais eficiente mostrou-se dependente da textura e da formulação do material. As margens de segurança acima dos valores mínimos de resistência são particularmente relevantes, uma vez que a degradação das soldas tende a reduzir tanto a resistência ao cisalhamento quanto ao descolamento ao longo do tempo.

3.2 Análise termogravimétrica nas soldas de geomembrana

A Figura 8 apresenta as temperaturas máximas de degradação térmica extraídas das curvas de Análise Termogravimétrica (TG) realizadas na zona da solda (WZ) e zona afetada pelo calor (HAZ) dos distintos cenários de solda das geomembranas investigadas neste estudo. A comparação desta temperatura, para os distintos cenários, permite avaliar a estabilidade térmica dos dois pontos (WZ e HAZ) após a realização das soldas.

A análise da Figura 8a, referente à geomembrana lisa (GM-LI), evidencia que a estabilidade térmica do material após o processo de soldagem está fortemente condicionada à velocidade de avanço da cunha térmica (equipamento). Nos cenários em que a soldagem foi realizada com velocidade de 2 m/min (390-V2 e 450-V2), tanto a zona de solda (WZ) quanto a zona afetada pelo calor (HAZ) apresentaram temperaturas máximas de degradação térmica superiores à da amostra de referência, o que indica um ganho aparente de estabilidade térmica. Esse comportamento pode ser atribuído à exposição térmica mais controlada, que favorece a fusão sem induzir degradação significativa do polímero. Em contrapartida, quando a velocidade da cunha foi de 1 m/min (390-V1

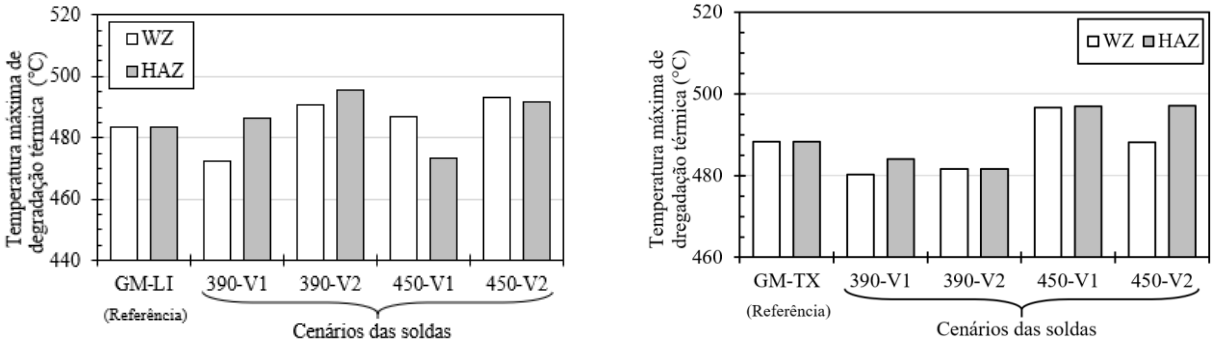


Figura 8. Temperaturas máximas de degradação térmica obtidas por Análise Termogravimétrica (TG) para a Zona da Solda (WZ) e a Zona Afetada pelo Calor (HAZ) das geomembranas: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

e 450-V1), evidenciou-se temperaturas máximas inferiores à referência em, ao menos, uma das duas regiões de interesse (WZ e HAZ). Neste caso, diferente da velocidade mais alta da cunha (V2), a menor velocidade (1 m/min; V1) promoveu superaquecimento localizado e possível degradação térmica incipiente.

Os resultados obtidos pelos ensaios de TGA nas soldas da GM-TX (Figura 8b) revelaram comportamento térmico que varia em função dos parâmetros de solda utilizados. Nos cenários com temperatura de 390 °C, observa-se que tanto a zona de solda (WZ) quanto a zona afetada pelo calor (HAZ) apresentaram temperaturas máximas de degradação inferiores à amostra de referência, indicando possível início de degradação térmica decorrente da exposição à cunha térmica. Já nos cenários com temperatura de 450 °C, os resultados mostram temperaturas máximas de degradação térmica iguais ou superiores às temperaturas de referência, sobretudo quando avaliada a região contígua a solda (HAZ).

Esses resultados (Figura 8) reforçam que os parâmetros de soldagem devem ser ajustados individualmente para cada tipo de geomembrana, considerando suas características físico-químicas e estruturais. A simples replicação de um cenário de solda considerado ótimo para uma geomembrana pode resultar em degradação térmica significativa em outra, comprometendo a durabilidade e o desempenho do sistema de barreira de fluxo.

4 CONCLUSÕES

Este estudo investigou a influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica nas propriedades das soldas. Geomembranas lisa com espessura de 1,0 mm e texturizada com espessura de 2,0 mm foram soldadas por termofusão sob condições controladas, considerando temperaturas de 390 °C e 450 °C e velocidades de 1 m/min e 2 m/min. Amostras soldadas foram coletadas e submetidas a ensaios destrutivos de cisalhamento e descolamento, bem como a análise térmica (TG).

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se, para ambas as geomembranas avaliadas, a adoção da condição de soldagem com temperatura de 450 °C e velocidade de 2 m/min, por ter proporcionado desempenho mecânico mais consistente e maiores margens de segurança, sem evidências relevantes de instabilidade térmica nas regiões analisadas.

Ressalta-se, contudo, que essa recomendação está condicionada às características específicas dos materiais, do equipamento e das condições ambientais investigadas neste estudo, devendo, em aplicação prática, ser validada por meio de ensaios de controle tecnológico em campo e procedimentos sistemáticos de verificação da qualidade das soldas antes da liberação do serviço. A simples replicação de uma condição de soldagem considerada ótima para um material pode induzir degradação térmica significativa em outro, comprometendo potencialmente a durabilidade e o desempenho global do sistema de barreira de fluxo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16199. *Barreiras geossintéticas – Instalação de geomembranas poliméricas.* Rio de Janeiro.

Ali, M., Rowe, R. K. (2024) Long-term performance of HDPE extrusion welds aged at 85°C in synthetic leachate. *Geosynthetics International*, 32(1), p. 139-150.

ASTM International (2020). ASTM D 1603: *Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics*.

ASTM International (2019). ASTM D 3895: *Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry*.

ASTM International (2019). ASTM D 5199: *Standard Test Methods for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.*

ASTM International (2021). ASTM D 5994: *Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes.*

ASTM International (2010). ASTM D 7466: *Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane*.

ASTM International (2020). ASTM D 792: *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.

ASTM International (2021). ASTM D4873: *Standard Guide for Identification, Storage, and Handling of Geosynthetic Rolls and Samples*.

ASTM International (2020). ASTM D5397: *Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test.*

ASTM International (2023). ASTM D5820: *Standard Practice for Pressurized Air Channel Evaluation of Dual-Seamed Geomembranes.*

ASTM International (2018). ASTM D6392: *Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods*.

Francey, W., Rowe, R. K. (2023a). Importance of thickness reduction and squeeze-out Std-OIT loss for HDPE geomembrane fusion seams. *Geotextiles and Geomembranes*, 51(1), p. 30-42.

Francey, W., Rowe, R. K. (2023b). Long-term stress crack resistance of HDPE fusion seams aged at 85 °C in synthetic leachate. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(3), p. 251-268.

Koerner, R.M. (2005). *Designing with geosynthetics*. 5th ed., Prentice Hall, New Jersey, USA, 818 p.

Rowe, R.K., Shoaib. M. (2017). Long-term performance of high-density polyethylene (HDPE) geomembrane seams in municipal solid waste (MSW) leachate. *Canadian Geotechnical Journal*, 54, p. 1623-1636.

Scheirs, J. (2009) A guide to polymeric geomembranes: a practical approach. 1st ed.,Wiley, London, UK.

Vilar, O.M., Bueno, B.S., Benvenuto, C. (2015). Manual brasileiro de geossintéticos. 2nd ed., Edgard Blücher, São Paulo, BR, Cap. 14.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/48

Modelagem numérica para compreender os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre estacas reforçados com geossintético

Juliana Araujo da Cunha,
Engenheira, EGIS Group, Sao Paulo, Brasil, araujodacunhajuliana@gmail.com

Juan Félix Rodrigues Rebolledo,
Professor,Universidade de Brasília ,Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Ennio Marques Palmeira,
Professor,Universidade de Brasília ,Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

RESUMO: Projetos de infraestrutura que exigem rigoroso controle de recalques, como ferrovias e rodovias, enfrentam desafios significativos ao construir aterros sobre solos moles. Entre as estratégias disponíveis para mitigar recalques diferenciais, destaca-se o uso de aterros sobre estacas reforçados com geossintéticos. Para otimizar essa técnica, é essencial uma compreensão aprofundada da interação solo-reforço. Modelos físicos e numéricos permitem a análise detalhada da resposta do solo e dos mecanismos de transferência de carga. Este estudo apresenta uma modelagem numérica bidimensional de um ensaio em grande escala de um aterro sobre estacas reforçado com geossintéticos, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelos constitutivos avançados para simular com precisão o comportamento do solo e do material geossintético. Realizaram-se análises comparativas entre métodos analíticos existentes, modelos físicos e modelos numéricos. Os resultados obtidos ampliam o entendimento dos processos de transferência de carga e sugerem que as normas atuais podem fornecer soluções seguras e econômicas, especialmente quando combinadas com simulações numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Numérico, Modelo Análitico, Geossintético, Solos Moles, Rodovias.

ABSTRACT: Infrastructure projects that require rigorous settlement control, such as railways and highways, face significant challenges when constructing embankments on soft soils. Among the available strategies to mitigate differential settlements, the use of piled embankments reinforced with geosynthetics stands out. To optimize this technique, an in-depth understanding of soil-reinforcement interaction is essential. Physical and numerical models enable detailed analysis of soil response and load transfer mechanisms. This study presents a two-dimensional numerical modeling of a large-scale test of a geosynthetic-reinforced piled embankment, using the Finite Element Method (FEM) and advanced constitutive models to accurately simulate the behavior of the soil and geosynthetic material. Comparative analyses were conducted between existing analytical methods, physical models, and numerical models. The results obtained enhance understanding of load transfer processes and suggest that current standards can provide safe and economical solutions, especially when combined with robust numerical simulations.

KEYWORDS: Numerical model, analytical model, geosynthetic, soft soils, highway.

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente de aterros sobre solos moles tem impulsionado o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais eficazes e seguras, dentre as quais se destacam os aterros estaqueados reforçados com geossintéticos. Esses sistemas compostos integram estacas profundas, geossintéticos e camadas de solo compactado para reduzir recalques e aumentar a estabilidade estrutural global. Apesar da consolidação de metodologias de dimensionamento internacionalmente reconhecidas, como as estabelecidas pela norma

britânica BS 8006 (2010), pela diretriz alemã EBGEO (2011) e pela recomendação holandesa CUR 226 (2016), ainda persistem lacunas de conhecimento quanto à distribuição real de tensões no corpo do aterro, particularmente no que se refere ao efeito de arqueamento e ao comportamento in situ dos geossintéticos.

Aplicações relevantes dessa técnica podem ser encontradas em diversas regiões do mundo. Na Holanda, por exemplo, a rodovia N210 foi construída sobre solos moles com o uso de reforço com geotêxtil, assegurando estabilidade estrutural em condições geotécnicas desafiadoras. De forma semelhante, o viaduto da autoestrada A52, na Alemanha, empregou com sucesso aterros estaqueados. No Brasil, onde extensos depósitos de solos moles ocorrem ao longo das regiões costeiras, especialmente na Baixada Fluminense (RJ), Baixada Santista (SP), Recife (PE), Porto Alegre (RS) e Florianópolis (SC), inúmeros projetos têm demonstrado a eficiência dessa técnica. Exemplos notáveis incluem a ferrovia Ferronorte em Chapadão do Sul (MS) e a interligação entre as rodovias Presidente Dutra e Carvalho Pinto em São José dos Campos (SP), onde foi aplicado reforço com geogrelha durante a fase inicial de construção. Outro caso significativo é a rodovia BR-364 em Jataí (GO), também implantada sobre solos de baixa resistência com o uso de reforços geossintéticos (Huesker, 2024).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar os métodos normativos de dimensionamento mais comuns para aterros estaqueados. A análise busca avaliar com maior precisão a resposta estrutural, com foco na distribuição de tensões,e nas forças de tração distribuida nos geossintéticos. Os resultados numéricos são comparados com dados laboratoriais, previsões analíticas e simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF/FEM), a fim de avaliar a representatividade do modelo desenvolvido.

Resultados preliminares indicam que o MEF é capaz de reproduzir com precisão o fenômeno de arqueamento, apresentando resultados consistentes com o método dos arcos concêntricos (CA) proposto por Van Eekelen (2015). Além disso, a investigação evidencia limitações na representação do efeito de membrana, associado à mobilização da resistência à tração do geossintético, dentro de estruturas convencionais de MEF. Esse achado sugere que modelos discretos, capazes de capturar o comportamento individual das partículas de solo e do reforço, podem ser mais adequados para simular de forma realista a ação de membrana.

Esta pesquisa contribui para uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos das distribuição de tensões dos aterros estaqueados reforçados com geossintéticos e oferece subsídios técnicos para auxiliar projetistas na seleção de metodologias de dimensionamento apropriadas, ampliando a segurança e a relação custo-benefício na prática da engenharia geotécnica.

2 ATERRO ESTAQUEADO

Sistemas de aterro estaqueado são amplamente aplicados em regiões com solos moles, que apresentam baixa capacidade de suporte e são suscetíveis a recalques excessivos. Eles também são eficazes em áreas com solos colapsíveis, nas quais o aumento de umidade e de carregamento pode levar a deformações repentinas do terreno. Essa técnica combina métodos convencionais de terraplenagem com sistemas de fundações profundas, transferindo as cargas do aterro para camadas mais profundas e mais competentes do solo. O objetivo principal é minimizar ou eliminar os recalques excessivos que ocorreriam caso o aterro fosse construído diretamente sobre solos fracos, aumentando, assim, a estabilidade e a segurança global da estrutura.

De acordo com Souza e Marques (2013), a utilização de aterros estaqueados possibilita acelerar a construção sem a necessidade de aguardar a consolidação das camadas de solo mole. Em contraste, métodos convencionais de aterro frequentemente exigem prazos maiores devido à lentidão do processo de consolidação primária. Dessa forma, os aterros estaqueados não apenas reduzem a duração da obra, como também mitigam deformações do terreno e recalques diferenciais.

Para melhorar ainda mais o desempenho, os aterros estaqueados são frequentemente combinados com técnicas de solo reforçado. Entre as alternativas disponíveis, os geossintéticos têm se tornado cada vez mais utilizados devido à sua eficiência técnica e viabilidade econômica. Em aterros reforçados, os geossintéticos podem desempenhar dupla função: reforço estrutural e facilitação da drenagem, acelerando a consolidação. Neste estudo, o enfoque é sobre sua função do geossintético como elemento de reforço. A inclusão de geossintéticos permite a construção de aterros mais altos, taludes mais íngremes e execução mais rápida do que seria viável sem reforço. Além disso, eles otimizam a distribuição de tensões em solos de baixa resistência e aumentam significativamente a margem de segurança do sistema (Palmeira, 2018).

2.1 Mecanismo de Transferância de Carga

Em sistemas de aterro estaqueado, a interação entre os elementos estruturais e o material de aterro dá origem a um fenômeno de redistribuição de tensões conhecido como efeito de arqueamento. Esse mecanismo resulta em maiores concentrações de tensões sobre elementos rígidos, como capitéis/blocos de coroamento e colunas/estacas, enquanto reduz as tensões nas zonas de menor rigidez situadas entre eles. A presença desse efeito favorece a transferência de carga para as estacas e limita a tensão vertical atuante no solo mole subjacente.

Quando o reforço com geossintéticos é incorporado ao sistema, um mecanismo adicional é ativado. O geossintético, ao ser submetido a recalques diferenciais ou carregamentos, desenvolve forças de tração que ajudam a redirecionar parte da carga do aterro para as cabeças das estacas. Esse comportamento é conhecido como efeito de membrana e contribui para reduzir ainda mais o carregamento transmitido ao solo mole de fundação, por meio da mobilização da resistência à tração do reforço.

A interação solo–estrutura e os mecanismos de transferência de carga associados a sistemas estaqueados reforçados são complexos e ainda não são plenamente compreendidos. Um aspecto importante para o desenvolvimento do efeito de arqueamento é a altura mínima de aterro, frequentemente denominada altura crítica. Acima desse limiar, a camada de distribuição de cargas torna-se suficientemente rígida para permitir a formação efetiva do arqueamento de tensões. Portanto, o comportamento do material granular empregado nessa camada é de grande importância. Em geral, aterros granulares são preferidos devido às suas propriedades mecânicas relativamente estáveis, mesmo em condições saturadas.

Para compreender e quantificar esses mecanismos, empregam-se modelos físicos e numéricos. A modelagem física fornece evidências experimentais do comportamento estrutural, enquanto a modelagem numérica permite investigar, com maior detalhamento, parâmetros específicos, distribuição de tensões no solo, espaçamento entre estacas e tração no geossintético. Em particular, o Método dos Elementos Finitos (MEF/FEM) é amplamente utilizado para simular interações complexas em aterros estaqueados reforçados. Neste estudo, o MEF foi empregado para modelar o sistema solo–reforço–estrutura, fornecendo uma base robusta para avaliar os processos de transferência de carga e validar previsões analíticas.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada em etapas sequenciais, integrando dados experimentais, modelagem numérica e métodos analíticos para avaliar de forma abrangente o comportamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos.

- Etapa 0 – Ensaios experimentais em laboratório

Esta etapa inicial consistiu na coleta de dados de caracterização dos materiais, tanto do solo de aterro quanto do reforço geossintético. O objetivo foi definir parâmetros iniciais e padrões de comportamento para o desenvolvimento subsequente do modelo numérico. Os dados foram obtidos a partir do modelo físico desenvolvido e ensaiado em laboratório por Melchior Filho (2022), fornecendo condições controladas para apoiar a calibração do modelo.

- Etapa 1 – Definição da malha numérica (2D)

Foi criado um modelo bidimensional axissimétrico por elementos finitos para simular um capitel/bloco de coroamento central com um vão preenchido por material de aterro reforçado. Os parâmetros de entrada e as condições de contorno foram definidos para reproduzir a configuração do modelo físico desenvolvida por Melchior Filho (2022), assegurando uma representação realista das condições de campo.

- Etapa 2 – Calibração do modelo constitutivo

A seleção e a calibração do modelo constitutivo buscaram garantir a reprodução fiel do comportamento observado em laboratório, tanto para o solo do aterro quanto para o material geossintético. Com base em ensaios de cisalhamento direto realizados por Melchior Filho (2022), os parâmetros foram ajustados de modo a alinhar a resposta numérica aos resultados experimentais.

- Etapa 3 – Análise de sensibilidade da malha

Realizou-se uma análise de convergência de malha para avaliar a influência da densidade de discretização (tamanho e distribuição dos elementos) na precisão e confiabilidade dos resultados das simulações numéricas. Isso permitiu assegurar que o modelo computacional fornecesse resultados estáveis e precisos, sem custo computacional excessivo.

- Etapa 4 – Desenvolvimento de programa analítico de dimensionamento

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional para realizar cálculos estruturais com base em métodos analíticos comumente aplicados aos efeitos de arqueamento e membrana. O objetivo dessa ferramenta é automatizar o processo de dimensionamento e apoiar a tomada de decisão na otimização de projetos de aterros estaqueados reforçados.

- Etapa 5 – Análise do efeito de arqueamento

Esta fase envolveu a simulação do efeito de arqueamento no corpo do aterro, quantificando a distribuição de tensões verticais e sua concentração sobre o capitel/bloco de coroamento central. A análise também avaliou o papel estrutural do reforço geossintético na redistribuição de cargas e no aumento da estabilidade do sistema.

- Etapa 6 – Comparação com métodos analíticos e dados experimentais

A etapa final consistiu na validação do modelo numérico por meio da comparação com previsões analíticas e com os resultados dos ensaios laboratoriais.

A Figura 1 ilustra o estudo de caso, destacando os modelos experimental e numérico. A Figura 2 apresenta a instrumentação empregada em ambos os modelos, enquanto a Figura 3 mostra a malha de elementos finitos juntamente com a geometria desenvolvida neste estudo.

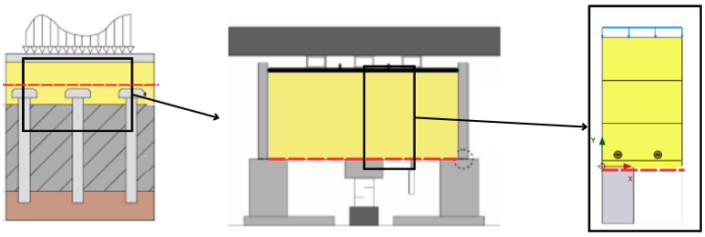


Figura 1. Modelo experimental e numérico do estudo de caso

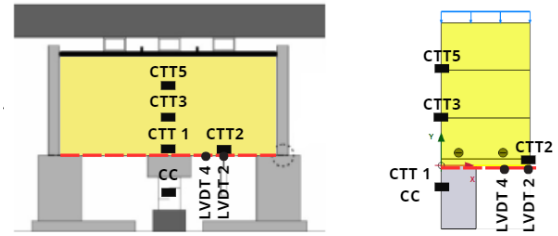


Figura 2. Instrumentação do modelo físico e numérico

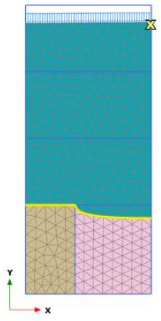


Figura 3. Malha de elementos finitos e geometria adotadas no estudo.

4 RESULTADOS

Foi desenvolvida uma simulação numérica bidimensional utilizando o modelo Hardening Soil (Schanz et al., 1999; Brinkgreve et al., 2015) para representar o comportamento tanto do solo do aterro quanto do solo de fundação. Esse modelo constitutivo avançado foi selecionado por ser capaz de reproduzir a resposta de uma ampla variedade de solos, incluindo materiais coesivos e granulares. Os parâmetros do modelo foram calibrados com base nos resultados do modelo físico reportados por Melchior Filho (2022).

A calibração foi realizada por meio de uma simulação numérica do ensaio de cisalhamento direto, considerando condições de estado plano de tensões e condições de contorno consistentes com aquelas utilizadas nos ensaios laboratoriais de Melchior Filho (2022). Esse procedimento forneceu os parâmetros adotados no presente estudo.

Propriedades	**Símbolos**	**Valor**	**Unidade**
Peso Específico	γ	16	kN/m³
Parâmetros de Resistência			
Coesão	c	0.1	kPa
Ângulo de Atrito	ϕ	43	°
Ângulo de Dilatância	ψ	10	°
Parâmetros de Rigidez			
Módulo de Rigidez Secante de Refrência	E_{50}^{ref}	10	MPa
Módulo de Rigidez Odométrico de Referência	E_{eod}^{ref}	8	MPa
Módulo de Rigidez de Descarga e Recarga de Referência	E_{ur}^{ref}	30	MPa
Potência para Função Hiperbólica	m	0.5	–
Parâmetros Avançados			
Relação de Poisson para condições de descarga-recarga	ν_{ur}	0.2	–
Pressão de Referência	p'_{ref}	100	kPa

Os parâmetros calibrados foram comparados aos dados laboratoriais para avaliar o desempenho do sistema. Além disso, aplicou-se regressão estatística para avaliar a relação entre os resultados experimentais e numéricos.

Os resultados evidenciam a variação da tensão vertical (σ) em função da razão entre a altura do aterro e o espaçamento entre estacas (H/d). As medições foram obtidas a partir de células de tensão e de carga posicionadas acima do bloco de coroamento central, conforme mostrado nas Figuras 4(a) e 4(b). A altura do aterro (H) foi definida como:

$$H = h + \frac{P}{\gamma} \tag{1}$$

em que h é a altura do aterro no modelo (0,15; 0,30; e 0,45 m), P é a sobrecarga superficial (10; 25; e 40 kPa) e γ é o peso específico do material do aterro (16 kN/m³).

O modelo numérico permitiu o estudo do comportamento estrutural sob diferentes condições. Após ajustes e comparação com modelos físicos e analíticos, o comportamento simulado foi validado. Essas medições possibilitaram uma avaliação detalhada da distribuição de tensões. Em seguida, foi realizada uma comparação com as principais normas de dimensionamento de aterros estaqueados: a norma britânica (BS 8006, 2010), a diretriz alemã (EBGEO, 2011) e o código holandês (CUR 226, 2016)-CA.

Os resultados da Figura 5 indicam que o aumento da largura do capitel (a) e a redução do espaçamento entre estacas (s_x), em geral, levam a uma maior transferência de tensões para as estacas, intensificando o efeito

de arqueamento. Observou-se que os parâmetros geométricos exercem maior influência na distribuição de cargas no interior do aterro do que as próprias propriedades do solo. A Figura 6 ilustra o efeito do espaçamento entre estacas na eficiência global do sistema.

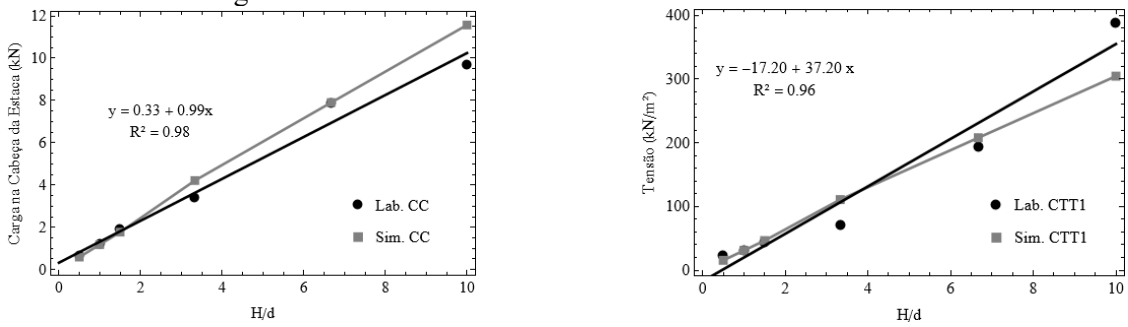


Figura 4. Resultados: (a) Carga sobre a estaca central, (b) Comparação entre os valores previstos e medidos das tensões internas para diferentes valores de H/d

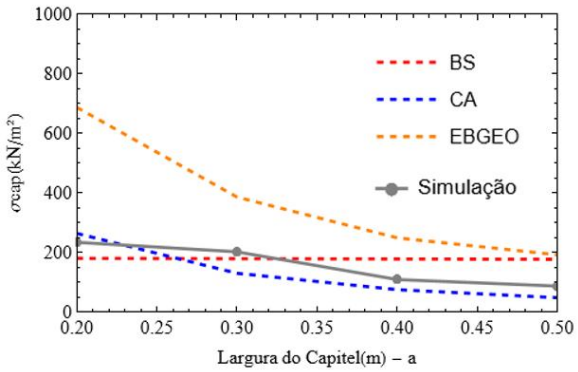


Figura 5. Tensão no capitel central para diferentes métodos

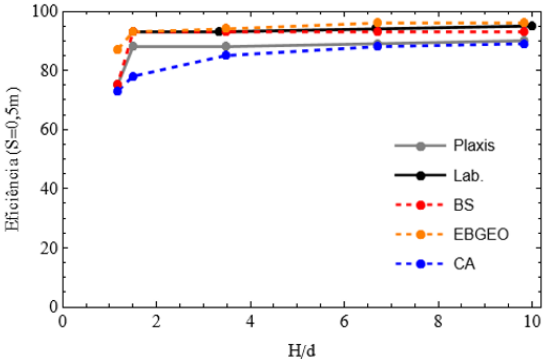


Figura 6. Eficiência do Modelo

5 CONCLUSÃO

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma ferramenta essencial para análises geotécnicas, oferecendo uma estrutura robusta para investigações detalhadas do comportamento estrutural sob diversas condições de solo. Um elemento-chave para o sucesso das simulações numéricas é a seleção criteriosa e a calibração adequada do modelo constitutivo utilizado para representar o comportamento dos materiais do aterro. Modelos avançados, embora proporcionem maior precisão, exigem validação minuciosa devido ao grande número de parâmetros e à complexidade de sua formulação.

Neste estudo, a calibração numérica do material de preenchimento do aterro reforçado foi realizada com sucesso, resultando em um modelo representativo para a simulação de sistemas de aterros estaqueados reforçados. Os principais resultados são resumidos a seguir:

5.1 Efeito de Arqueamento:

O modelo numérico apresentou boa concordância com os dados experimentais e com os métodos analíticos, especialmente com o método dos Arcos Concêntricos (CA) proposto por Van Eekelen (2015). Enquanto a norma britânica (BS 8006) forneceu previsões conservadoras, a diretriz alemã (EBGEO) tendeu a superestimar a transferência de carga para menores alturas de aterro, provavelmente devido a suas premissas de projeto mais cautelosas. A consistência entre os resultados numéricos e laboratoriais confirma a confiabilidade do modelo em MEF desenvolvido para capturar os mecanismos de transferência de carga em sistemas de aterros estaqueados reforçados.

5.2 Forças de Tração no Geossintético:

A análise revelou a dificuldade inerente de medir com precisão as forças de tração nos geossintéticos em condições laboratoriais, destacando a importância das simulações numéricas para suprir lacunas experimentais. O modelo em MEF também apresentou limitações na representação realista do efeito membrana — mecanismo essencial relacionado à mobilização da tração no geossintético. Isso sugere que modelos baseados no método dos elementos discretos, capazes de simular o comportamento individual das partículas de solo e do reforço, podem ser mais adequados para representar com maior fidelidade a ação de membrana.

Em síntese, a modelagem numérica conduzida neste estudo contribuiu de forma significativa para o aprofundamento da compreensão dos mecanismos críticos em sistemas de aterros estaqueados reforçados, especialmente o efeito de arqueamento e eficiência no sistema. A integração de abordagens numéricas, analíticas e experimentais constitui uma estrutura abrangente para avaliação e dimensionamento de aterros reforçados sobre solos moles. Os resultados obtidos oferecem diretrizes técnicas relevantes para engenheiros geotécnicos, promovendo soluções de infraestrutura mais seguras e economicamente eficientes.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 131292/2023-4) e pelo Programa de Pós-graduação de Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG-UnB).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. S. S. & Marques, M. E. S. (2013). Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils. Taylor & Francis, London, UK.

BS 8006–1. (2010). Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.

CUR 226. (2016). Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments. Eds.: S.J.M. van Eekelen & M.H.A. Brugman. Revision of the Design Guideline CUR226. (In English). SBRCURnet & CRC press, Delft, in press, ISBN 9789053676240.

EBGEO (2011). Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements – EBGEO. Germany. ISBN 978-3-433-60093-1.

Hewlett, W.J. & Randolph, M.F. (1988). Analysis of piled embankments. Ground Engineering, Abril 1988, Vol 22, N° 3, pp. 12–18

Huesker (2024). Casos de Obra –Volume I. Brasil [Online] Available at: https://www.huesker.com.br/noticias/detail-view/e-book-casos-de-obras/ [Accessed 8th June 2025].

Melchior Filho, J. (2022). Estudo da interação solo-reforço geossintético em aterros estaqueados por meio de ensaios de grandes dimensões. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135 p.

Palmeira, E. M. (2018). Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

Van Eekelen, S.J.M. (2015). Basal Reinforced Piled Embankments. PhD thesis Technical University of Delft, Holanda. 274p. ISBN 978-94-6203-825-7.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/49

Modelagem tridimensional de pavimentos reforçados com geossintéticos sobre cavidades

Bryan Robin Sanchez Ramirez
Mestrando, EESC-USP, São Carlos, Brasil, bryan.sanchez@usp.br

Bruna Martins de Melo
Mestranda, EESC-USP, São Carlos, Brasil, brunamartins2024@usp.br

Marcell Gustavo Chagas Santos
Professor Doutor, EESC-USP, São Carlos, Brasil, marcell.gustavo@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Professor Associado, EESC-USP, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A presença de cavidades no subsolo compromete a estabilidade e o desempenho de obras de pavimentação, em razão da migração de partículas de solo para o seu interior e da consequente perda de suporte. Nesse contexto, torna-se essencial a busca por soluções técnica e economicamente viáveis para mitigação dos efeitos causados por cavidades subterrâneas. Entre as alternativas disponíveis, destaca-se o uso de geossintéticos posicionados entre o subleito e o pavimento, atuando como elemento de reforço e promovendo maior estabilidade do sistema. Diante dessa aplicação, o presente estudo tem como objetivo quantificar os esforços desenvolvidos nos geossintéticos empregados na estabilização de pavimentos sujeitos à presença de cavidades subterrâneas. Para tal, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional baseado no Método dos Elementos Finitos, representando a interação entre o pavimento e a cavidade. As cargas aplicadas sobre o geossintético foram consideradas estáticas, correspondentes ao peso próprio da estrutura do pavimento e à pressão exercida pelos pneus de um veículo padrão na superfície. Para determinar a carga mais crítica a ser aplicada sobre a cavidade, foi realizada a avaliação de cada eixo do caminhão padrão utilizando uma área de contato equivalente sobre um modelo tridimensional de elementos finitos. Os diâmetros das cavidades avaliadas variaram entre 1,0 m e 3,0 m. Também foi realizada uma avaliação da espessura do pavimento com o objetivo de quantificar o efeito da distribuição de tensões em profundidade. A estrutura do pavimento e o subleito foram representados através do modelo constitutivo Elasto-plástico com critério de ruptura Mohr-Coulomb, enquanto o geossintéticos foi modelado como um material elástico isotrópico. Os resultados obtidos por meio da simulação numérica foram comparados com formulações analíticas equivalentes de Giroud et al. (1990), Vidal et al (2002), e *British Standards Institution* (2010). A abordagem numérica empregada permitiu compreender o mecanismo envolvido na determinação dos esforços dos geossintéticos sobre cavidades.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Cavidades, Pavimentos, Elementos Finitos.

ABSTRACT: The presence of cavities in the subsoil compromises the stability and performance of pavements, due to the migration of soil particles into them and the consequent loss of support. In this context, it is essential to find technical and economically viable solutions to mitigate the effects caused by underground cavities. One of the available alternatives is the use of geosynthetics positioned between the subgrade and the pavement, acting as a reinforcing element and promoting greater stability of the system. Given this application, the present study aims to quantify the stresses developed in the geosynthetics used to stabilize pavements subject to the presence of underground cavities. To this purpose, a three-dimensional numerical model based on the Finite Element Method was developed, representing the interaction between the pavement and the cavity. The loads applied to the geosynthetics were considered static, corresponding to the weight of the pavement structure itself and the pressure exerted by the tires of a standard vehicle on the surface. To determine the most critical load to be applied to the cavity, each axle of the standard truck was evaluated using an equivalent contact area on a three-dimensional finite element model. The diameters of the evaluated cavities ranged from 1.0 m to 3.0

m. An evaluation of the pavement thickness was also performed to quantify the effect of stress distribution at depth. The pavement structure and subgrade were represented using the Elasto-plastic constitutive model with Mohr-Coulomb failure criterion, while the geosynthetics were modeled as an isotropic elastic material. The results obtained through numerical simulation were compared with equivalent analytical formulations by Giroud et al. (1990), Vidal et al. (2002), and the British Standards Institution (2010). The numerical approach employed allowed for an understanding of the mechanism involved in determining the stresses of geosynthetics on cavities.
KEYWORDS: Geosynthetics, Cavities, Pavements, Finite Elements.

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de cavidades pode estar associado a processos naturais ou antropogênicos, tais como a erosão e a dissolução de rochas solúveis (ex: calcário ou evaporitos). Em infraestruturas rodoviárias, tais ocorrências podem comprometer a integridade da via, resultando em colapsos que a tornam parcial ou totalmente inutilizável. A Figura 1 ilustra a evolução de uma cavidade conforme Augarde et al. (2003): inicialmente, observa-se uma pequena cavidade na interface rocha-solo, expandida pela percolação de água; em seguida, surge uma abertura superficial que serve como indicativo da magnitude real da cavidade subterrânea; por fim, ocorre o colapso do solo subjacente, culminando na formação de uma depressão em funil chamada cavidade.

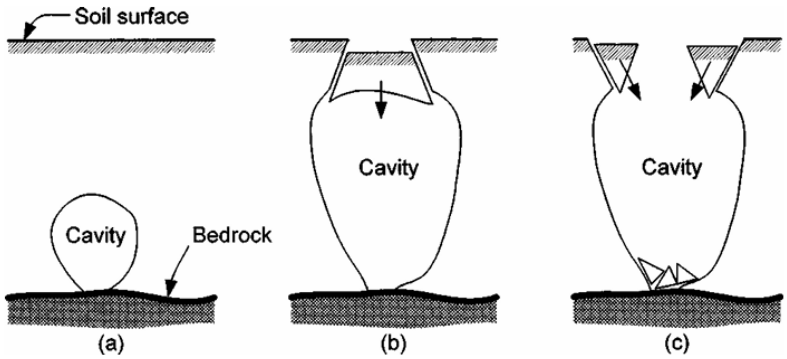


Figura 1. Formação de buracos a partir de cavidades subterrâneas, Augarde et al (2003).

Diante desse cenário, o emprego de geossintéticos surge como uma alternativa técnica e economicamente viável para mitigar os riscos associados ao colapso de cavidades. Estes materiais atuam como reforço, conferindo suporte à estrutura do pavimento e garantindo a continuidade do tráfego superficial através da redistribuição das tensões.

Este estudo analisa a eficácia de tais soluções, comparando as respostas de modelos numéricos tridimensionais com formulações analíticas consagradas, como as de Giroud et al. (1990), Vidal (2002) e a norma BSI 8006 (2010). A análise concentra-se na avaliação da influência de parâmetros como o diâmetro da cavidade, a rigidez do geossintético e a espessura do pavimento no comportamento do sistema.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelos 3D

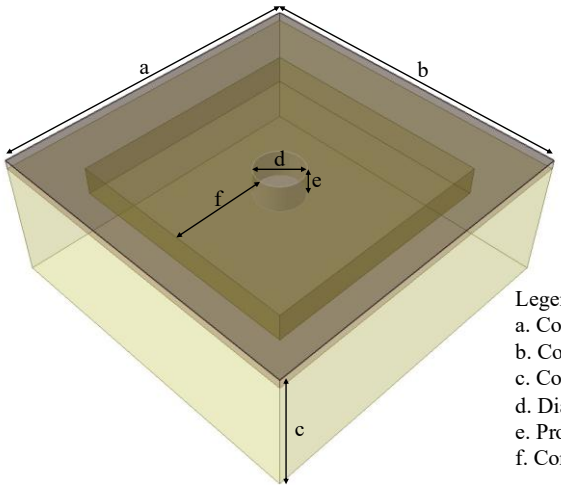
Um modelo tridimensional foi empregado para avaliar a influência de diversos parâmetros nas deformações e tensões do geossintético de reforço posicionado sobre uma cavidade. O diâmetro da referida cavidade variou entre 1,00 m e 3,00 m, sendo o limite superior definido com base na largura padrão de uma faixa de rodagem. No presente estudo, a estrutura do pavimento foi simplificada e representada por um revestimento flexível de 0,05 m de espessura, sobreposto a uma camada de base granular de 0,45 m. Os parâmetros e valores adotados na modelagem encontram-se detalhados a seguir.

2.1.1 Dimensões

As dimensões gerais do modelo tridimensional foram determinadas com base nas recomendações práticas de Lees (2016). O comprimento de ancoragem do geossintético foi assumido entre 3,00 m até 5,00 m, dependendo das dimensões do modelo e da cavidade, esta distância é considerada desde a borda da cavidade até o limite do geossintético. A profundidade da cavidade adotada nos modelos foi de 1,50 m. Em situações reais, essa profundidade pode ser significativamente maior; entretanto, para os propósitos deste estudo, o volume vazio considerado é suficiente para permitir a deformação livre do geossintético, atendendo aos objetivos da análise. O software utilizado para realizar os cálculos foi o RS3 da Rocscience. A Tabela 1 apresenta o resumo das dimensões dos modelos tridimensionais em elementos finitos. A Figura 2 mostra um desenho esquemático do modelo de análise.

Tabela 1. Resumo das dimensões do modelo tridimensional.

Dimensão	M1	M2	M3	M4	M5
Espessura do pavimento (m)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Diâmetro da cavidade (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
Comprimento eixo X e Y (m)	7,00	10,50	14,00	17,50	21,00
Comprimento eixo Z (m)	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
Comprimento de ancoragem (m)	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00



Legenda:
a. Comprimento eixo X
b. Comprimento eixo Y
c. Comprimento eixo Z
d. Diâmetro da cavidade
e. Profundidade da cavidade
f. Comprimento de ancoragem

Figura 2. Desenho das dimensões do modelo tridimensional.

2.1.2 Parâmetros

Em projetos de pavimentos, é prática comum caracterizar a elasticidade dos materiais a traves do módulo resiliente (M_R). O M_R é determinado com base na aplicação de cargas repetidas (cargas cíclicas) no ramo elástico do material em regime de pequenas deformações. Por essa razão, os valores do módulo resiliente são, em geral, significativamente superiores aos valores dos módulos elásticos obtidos a partir de ensaios com carregamento monotônico, usualmente empregados em outras aplicações geotécnicas. Os parâmetros elásticos considerados neste estudo foram definidos com base nos valores reportados por Papagiannakis & Masad (2024). Os parâmetros de resistência do pavimento foram assumidos pelo autor, com base em valores representativos de projeto. A Tabela 2 apresenta um resumo dos parâmetros de elasticidade e resistência dos materiais.

Quanto à rigidez do geossintético, adotou-se uma ampla faixa de valores (Tabela 3), compreendida entre 1.000 kN/m e 5.000 kN/m. Tal variação visa avaliar, por meio de um estudo paramétrico, a influência dessa propriedade no comportamento mecânico do sistema.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros de elasticidade e resistência.

Material	γ (kN/m^3)	M_R (MPa)	ν	C (kPa)	Φ (°)
Pavimento flexível	23	2.750	0,30	-	-

Base granular	20	275	0,35	0	36
Subleito	18	75	0,35	20	28

Abreviatura: γ: massa específica aparente; M_R: módulo resiliente; ν: módulo de Poisson; C: coesão; Φ: Ângulo de atrito.

Tabela 3. Resumo dos valores de rigidez.

Geossintético	J1	J2	J3	J4	J5
J (kN/m)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000

Com base nas informações apresentadas nas Tabela 1 e Tabela 3, define-se a nomenclatura adotada neste estudo, a qual reflete as dimensões do modelo e a rigidez do geossintético considerada. Por exemplo, o modelo M3–J4 corresponde as dimensões do modelo M3 com à rigidez do geossintético J4.

2.1.3 Tensão aplicada no pavimento

A tensão aplicada no pavimento foi escolhida para representar a condição crítica, por esse motivo a representação das cargas não é assumida como uniforme em toda extensão do modelo numérico. Neste estudo, foi calculado a tensão estática aplicada nos pneus do caminhão-trator 6x2 com semirreboque (*six axle tractor semi trailer*). O camião escolhido tem três tipos de eixos, cada um deles com diferentes capacidades de carga e número de pneus.

Para simplificar a representação das cargas no modelo numérico tridimensional, foi utilizada uma área equivalente retangular. Na estimativa da área de contato dos pneus foi empregada a Equação (1) apresentada por Huang (2004).

$$L = \sqrt{A_c / 0{,}5227} \quad (1)$$

Onde L é o comprimento da área real de contato, A_c é a área de contato como apresentado na Figura 3. A área de contato do pneu na superfície do pavimento pode ser representada pela área equivalente de um retângulo de comprimento 0,8712L e largura 0,6L.

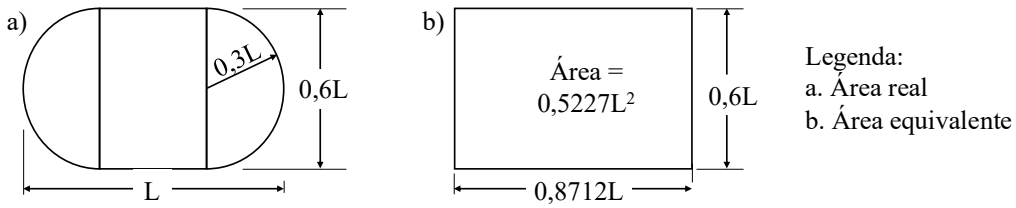


Figura 3. Dimensões da área de contato do pneu, adaptado de Huang (2004).

Para os cálculos foi usado um pneu de largura 0,6L = 0,452 m, resultando em uma área equivalente de 0,452 m x 0,656 m. A carga máxima em cada eixo foi obtida do CONTRAN (2021). A Tabela 4 apresenta os valores de tensão nos pneus do camião padrão empregado neste estudo.

Tabela 4. Resumo dos valores de tensão aplicada no pavimento.

Parâmetro	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
Carga máxima (Ton)	7	16	23
Número de pneus	2	8	12
Area total de contato (m^2)	0,593	2,373	3,560
Tensão aplicada em cada pneu (Ton/m^2)	10,11	6,74	6,46
Tensão aplicada em cada pneu (kPa)	101	68	65

No Eixo 1 encontra-se a maior tensão aplicada sobre o pavimento. No entanto, este valor distribui-se em uma área pequena, em relação ao Eixo 2 e Eixo 3. As análises preliminares mostraram que a condição de tensão crítica ocorre no eixo 3, onde a carga transmitida para o pavimento é maior, embora a tensão seja a menor dos três eixos analisados. O que é pouco intuitivo, mas para esta aplicação em particular, não só a tensão

final aplicada deve ser considerada. Nos casos em que a cavidade analisada não cobria a totalidade dos pneus, procurou-se localizar as cargas na posição crítica, cobrindo o máximo da área possível da cavidade.

2.1.4 Sequência de análise

A modelagem numérica foi conduzida em cinco etapas distintas. A primeira etapa corresponde à condição *in situ*, sendo necessária para o estabelecimento das tensões geostáticas do modelo, associadas ao subleito. Na segunda etapa, foi realizada a instalação do geossintético, seguida da construção da camada de base granular. A terceira etapa consistiu na execução do pavimento flexível. Na quarta etapa, foi simulada a formação da cavidade sob o pavimento. Por fim, a quinta etapa corresponde à aplicação da tensão na superfície do pavimento. Ressalta-se que todos os resultados apresentados nos parágrafos seguintes se referem à etapa final da análise. Por fim, foi avaliada a influência da espessura do pavimento sobre a cavidade. Para essa análise, adotou-se como referência o modelo M5-J1, por apresentar o maior diâmetro de cavidade entre os casos estudados. A espessura do pavimento foi avaliada entre 0,50 m e 2,00 m.

2.2 Formulações analíticas

2.2.1 Giroud et al. (1990)

O método de Giroud et al. (1990) combina duas teorias fundamentais. Teoria da Membrana Tensionada, aplicada ao geossintético, que se estira e mobiliza sua resistência à tração para suportar as cargas verticais. E Teoria do Abaulamento ou Arco de Solo, aplicada às camadas de solos, onde a deflexão gera um arco de solo que transfere parte da carga aplicada para longe da área da cavidade. Sendo assim, Equação (2) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = \mathrm{p}\cdot\mathrm{r}\cdot\Omega \tag{2}$$

Onde p é a tensão normal no geossintético sobre a cavidade, r é o rádio da cavidade quando considerada circular, e Ω é um parâmetro adimensional que depende da relação entre o rádio da cavidade e a deformação na superfície. O método emprega uma carga uniforme sobre a cavidade. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência Giroud et al. (1990).

2.2.2 Vidal et al. (2002)

O artigo de Vidal et al. (2002) propõe um método de projeto para condições de deformação plana. Este método combina: (i) A Teoria do efeito arco de Terzaghi para estimar as tensões verticais no solo sobre a cavidade; (ii) A Teoria da membrana tensionada para calcular a tensão de tração no reforço, assumindo que este se deforma em forma de arco circular ou parabólica. Sendo assim, a Equação (3) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = {}^{\sigma_v\cdot \mathrm{B}}/_{\sin(\theta)} \tag{3}$$

Onde B é metade da largura da cavidade, σ_v é a tensão normal no geossintético sobre a cavidade, e θ é o valor do ângulo que consegue o equilíbrio das equações complementares do método. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência Vidal et al. (2002).

2.2.3 British Standards Institution (2010)

A norma inglesa apresenta um método para determinar a tração no geossintético com um cálculo mais detalhado incluindo fatores parciais de segurança. A Equação (4) permite determinar o valor da tração no geossintético:

$$T = 0{,}5\cdot\lambda\left(f_{fs}\cdot\gamma\cdot H + f_q\cdot w_s\right)\mathrm{D}\cdot\sqrt{1+{}^{1}/_{6\varepsilon}} \tag{4}$$

Onde λ é um coeficiente que depende se o suporte de reforço, f_{fs} é o fator de carga parcial para o peso unitário do solo, γ é o peso unitário do aterro, H é a altura do aterro, f_q é o fator de carga parcial para cargas externas aplicadas, w_s é a sobrecarga no topo do aterro, D é o diâmetro da cavidade, ε é a deformação no

reforço. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na referência *British Standards Institution* (2010).

As formulações analíticas apresentadas previamente consideram o peso do veículo como uma sobrecarga uniformemente distribuída. Para fins de comparação entre os métodos avaliados neste estudo, adotou-se a distribuição do peso total do veículo sobre a sua área de projeção, resultando em um valor de aproximadamente 10 kPa.

3 RESULTADOS

O resultado dos 25 modelos analisados é representado na Figura 4, onde se resume a deformação relativa (Def. Vertical/Diâmetro) e as tensões do geossintético (tração). Em muitos dos casos analisados, observaram-se deformações significativamente elevadas, conforme ilustrado na Figura 4a, inclusive superiores aos limites admissíveis estabelecidos pelos critérios de deformação máxima para pavimentos flexíveis (DNIT, 2006). Esses níveis de deformação foram alcançados sem o atingimento dos critérios de falha definidos no modelo numérico. Ressalta-se que, neste estudo, tanto o pavimento quanto o geossintético foram modelados com comportamento elástico.

As deformações tendem a reduzir quando são utilizados geossintéticos mais rígidos para suportar e redistribuir as tensões. Nos modelos estudados, os valores de tração são inferiores a 10 kPa. A variação dos valores de tração apresentada na Figura 4b está relacionada à área carregada pelos pneus sobre as cavidades e à variação dos diâmetros destas. Isso é influenciado pelo comprimento da ancoragem, pelos diâmetros das cavidades e pela distribuição das tensões desde a superfície até a profundidade do geossintético. A tensão aplicada à superfície do pavimento também foi alternada em cada modelo numérico, de modo a representar a condição de carregamento crítica sobre a cavidade. Tal abordagem explica o fato de a tração no geossintético não evoluir proporcionalmente ao aumento do diâmetro da cavidade.

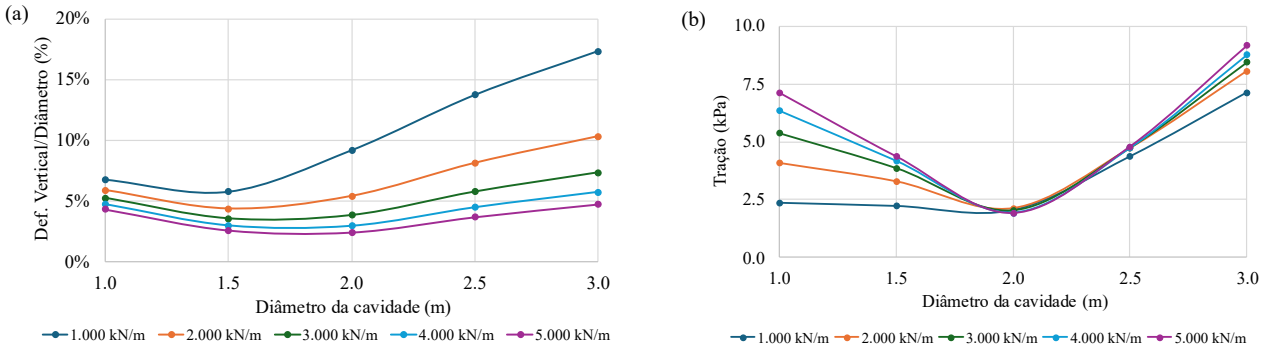


Figura 4. Resultados do modelo tridimensional sobre o geossintético (a) deformação relativa, (b) tração máxima.

A fim de verificar o efeito da aplicação de carga sobre a cavidade, avaliou-se um modelo tridimensional utilizando o geossintético J1 sob uma sobrecarga superficial uniforme de 10 kPa, simulando a carga de um veículo padrão. Os resultados expostos na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corroboram o comportamento típico esperado: observa-se que o incremento no diâmetro da cavidade resulta em um aumento progressivo tanto da deformação vertical (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a) quanto dos esforços de tração (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**b).

Com o intuito de analisar a influência da espessura do pavimento nas deformações e valores de tração do geossintético, foram desenvolvidos três modelos adicionais derivados do cenário M5-J1, variando-se a espessura total do pavimento até o limite de 2,0 m. Conforme ilustrado na Figura 6a, observa-se uma redução na deformação vertical, independentemente do incremento do peso próprio da camada de pavimento. Tal comportamento decorre da maior capacidade de redistribuição das tensões superficiais ao longo da estrutura, atenuando a solicitação direta sobre o geossintético. Já a Figura 6b demonstra que a tração tende a reduzir em espessuras superiores a 1,0 m, corroborando o efeito da redistribuição de tensões proporcionado pelo aumento da rigidez do conjunto.

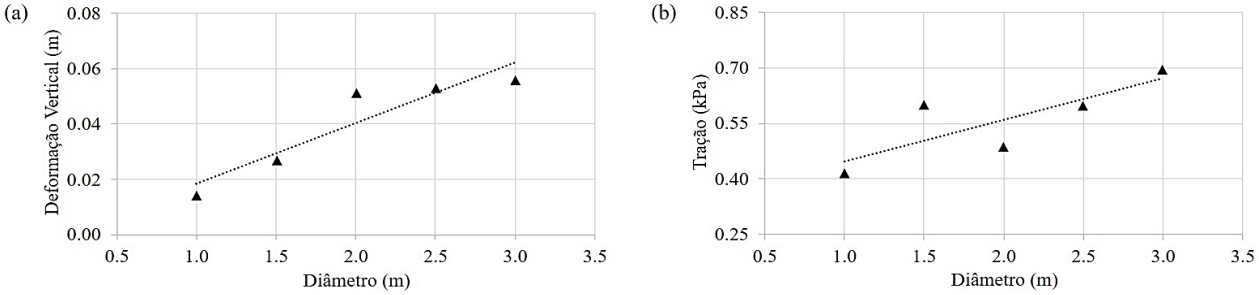


Figura 5. Resultados do geossintético do modelo M1-J1 até M5-J1 com sobrecarga uniforme e variação do diâmetro da cavidade.

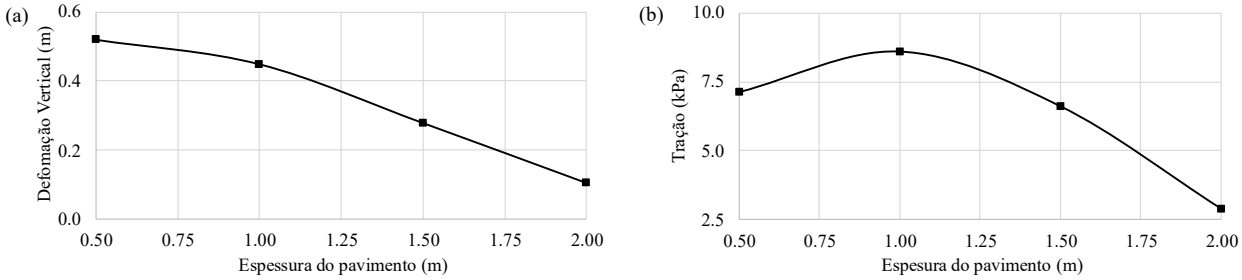


Figura 6. Resultados do geossintético do modelo M5-J1 variando a espessura do pavimento (a) deformação vertical máxima, (b) tração máxima.

Por fim, compara-se o esforço de tração das formulações analíticas apresentadas com a resposta do modelo numérico da série J1. A fim de comparar os esforços de tração determinados pelas formulações analíticas, adotou-se o nível de deformação vertical obtido no modelo numérico tridimensional. Tal procedimento garante que a comparação entre os esforços ocorra sob condições equivalentes de deformação. Como descrito previamente, a sobrecarga uniforme adotada tem um valor de 10 kPa. A Figura 7 mostra a comparação dos resultados dos três métodos analíticos e do modelo numérico. Observa-se que os três métodos analíticos superestimaram os valores de tração em comparação aos resultados obtidos via modelagem numérica tridimensional. Dentre as formulações avaliadas, o método de Vidal (2002) destacou-se por apresentar as maiores discrepâncias, fornecendo os valores de tração mais elevados em todo o intervalo do diâmetro da cavidade analisado.

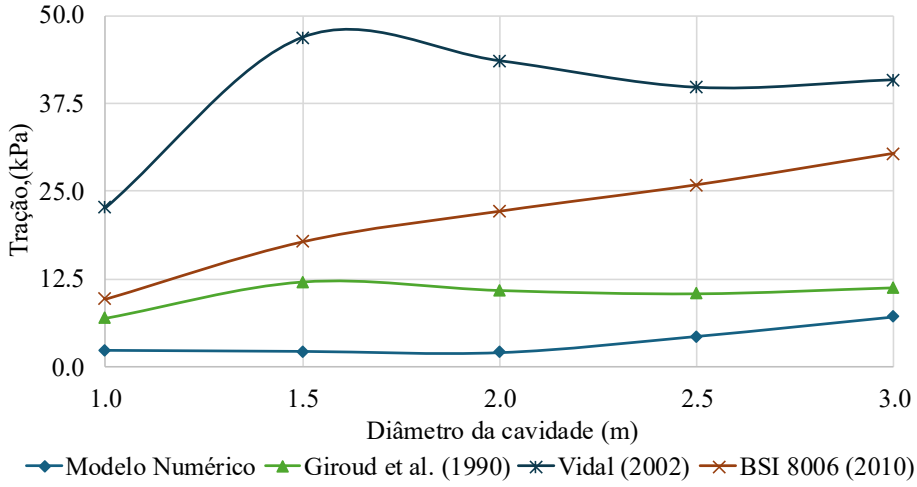


Figura 7. Esforços de tração determinados por formulações analíticas e por análises de tensão-deformação dos modelos M1-J1 até M5-J1.

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas nos modelos numéricos tridimensionais de elementos finitos e nas formulações de Giroud et al. (1990), Vidal et al (2002) e British Standards Institution (2010), pode-se concluir:

A análise comparativa revelou que as formulações analíticas tendem a ser conservadoras. Os três métodos analíticos avaliados (Giroud et al., 1990, Vidal, 2002 e BSI 8006, 2010) superestimaram os valores de tração quando comparados aos resultados da modelagem numérica tridimensional. O método de Vidal (2002) apresentou as maiores discrepâncias, fornecendo os valores de tração mais elevados em todo o intervalo de diâmetros analisado. Essa divergência ocorre porque as fórmulas analíticas não conseguem representar adequadamente a distribuição das tensões desde a superfície até à profundidade do geossintético. A variação da tração está intrinsecamente ligada à área carregada (contato dos pneus) e ao diâmetro da cavidade.

O aumento da espessura total do pavimento no modelo numérico resultou em uma redução da deformação vertical. Isso ocorre devido à maior capacidade de redistribuição das tensões superficiais ao longo da estrutura, o que atenua a solicitação direta sobre o reforço geossintético.

O uso de geossintéticos com maior rigidez demonstrou ser eficaz na redução das deformações, pela sua capacidade de suportar e distribuir as tensões de forma mais eficiente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augarde, C. E., Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2003). *Prediction of undrained sinkhole collapse*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(3), 197–205. <http:// https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(197)>

British Standards Institution. *BS 8006: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. London, pp. 196-202, 2010.

Conselho Nacional de Trânsito (2021). *Resolução CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União*. <http:// https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-882-de-13-de-dezembro-de-2021-370017699>

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). *Manual de restauração de pavimentos asfálticos* (IPR Publ. 720). Ministério dos Transportes.

Giroud, J. P.; Bonaparte, R.; Beech, J. F. e Gross, B. A. (1990) *Design of soil layer-geosynthetic overlying voids*, Geotextiles and Geomembranes, vol. 9, pp. 11-50.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson/Prentice Hall.

Lees, A. (2016). *Geotechnical finite element analysis: A practical guide*. ICE Publishing.

Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement design and materials* (2nd ed.). Wiley.

Vidal, Delma de M. e Fabrin, T. W. (2002) *A contribution to geosynthetics design in subsidence problems*, ICG 7 - Nice France - Volume 1 - Geotechnical engineering and reinforced structures.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/50

Modelos transparentes para estudo do comportamento de aterros sobre GECs com uso de PTCs enrijecidas com geossintéticos

Andréa Maria Pereira Vieira Lima
Doutoranda, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, andrea.vieira@estudante.ufscar.br

Fernando Henrique Martins Portelinha
Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Aterros construídos sobre colunas granulares constituem uma solução amplamente empregada para o melhoramento de solos moles. A incorporação de geossintéticos busca aumentar a eficiência desse sistema, seja por meio do encamisamento das colunas granulares, seja pela inserção de camadas de reforços horizontais na base do aterro. Além disso, uma plataforma de transferência de cargas (PTC), composta por material granular, é frequentemente utilizada para promover a redistribuição das tensões da superestrutura para as colunas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a influência do enrijecimento pelo número de camadas de geogrelhas empregadas como reforço horizontal da PTC em aterros sobre colunas granulares encamisadas (GECs), por meio de modelagem física em escala reduzida com solos transparentes, combinada à técnica de correlação de imagens digitais (DIC). Os resultados indicaram que a inclusão de reforços horizontais modificou o mecanismo de transferência de cargas reduzindo os recalques diferenciais devido ao efeito de enrijecimento da plataforma. Os modelos reforçados transferiram maior parcela de carga para as colunas, reduzindo os esforços no solo mole. O efeito membrana foi observado em ambas as configurações com reduzido atuação do arqueamento, principalmente no modelo que utilizou multicamadas de reforços.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem física, Geossintéticos, Correlação de imagem digital (DIC), Arqueamento, Efeito membrana.

ABSTRACT: Embankments constructed over granular columns are a widely adopted solution for the improvement of soft soils. The incorporation of geosynthetics aims to enhance the efficiency of this system, either through the encasement of granular columns or by introducing horizontal reinforcement layers at the base of the embankment. In addition, a load transfer platform (LTP), composed of granular material, is commonly used to promote the redistribution of stresses from the superstructure to the columns. In this context, the present study aims to evaluate the influence of the number of geogrid layers used as horizontal reinforcement within the LTP in embankments supported by geosynthetic-encased granular columns (GECs), through reduced-scale physical modeling with transparent soils combined with the digital image correlation (DIC) technique. The results indicated that the inclusion of horizontal reinforcement reduced settlements due to the stiffening of the platform and altered the load transfer mechanism. The reinforced models transferred a greater portion of the load to the columns, thereby reducing stresses in the soft soil. The membrane effect was observed in both reinforced configurations, with the two-layer model proving more efficient in mitigating the loads transmitted to the foundation soil.

KEYWORDS: Physical modeling; Geosynthetics; Digital image correlation (DIC); Soil arching; Membrane effect.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o projeto e a construção de aterros sobre solos moles têm incorporado, de forma crescente, técnicas inovadoras de melhoramento de solo. Entre essas soluções, a execução de aterros apoiados sobre colunas granulares destaca-se como alternativa amplamente aplicada, em razão de sua viabilidade econômica, facilidade construtiva e adequação a diferentes condições geotécnicas. Mais recentemente, o uso de colunas granulares encamisadas com geotêxteis (GECs) tem recebido atenção significativa da comunidade técnica e científica, consolidando-se como uma solução eficiente para suporte de aterros, especialmente em solos de baixíssima resistência(Aghili *et al.*, 2021; Almeida; Hosseinpour; Riccio, 2013; Hosseinpour; Riccio;

Almeida, 2014; Jamshidi *et al.*, 2017; Moayed; Zade, 2017; Mohamadi *et al.*, 2023; Shafiee *et al.*, 2024; Tizpa; Jamshidi; Payan, 2023). A incorporação de uma camada granular na base do aterro, denominada plataforma de transferência de carga (PTC), também desempenha papel fundamental ao redistribuir tensões, reduzir concentrações de esforços nas cabeças das colunas, aumentar a capacidade de suporte do solo mole e minimizar recalques diferenciais (Deb, 2007; Shahu; Madhav; Hayashi, 2000). Quando associada a reforços geossintéticos inseridos na PTC, observa-se incremento adicional no desempenho estrutural do sistema, com melhoria da eficiência de transferência de carga (Abdullah; Edil, 2007; Deb; Basudhar; Chandra, 2007; Deb; Chandra; Basudhar, 2008; Deb; Samadhiya; Namdeo, 2011).

Apesar dos avanços observados, os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre solos moles reforçados por colunas ainda não são plenamente compreendidos. Os procedimentos de dimensionamento atualmente empregados para aterros apoiados sobre GECs derivam, em grande parte, de metodologias originalmente desenvolvidas para aterros sobre estacas (BS 8006-1, 2010; EBGEO, 2011; FHWA, 2017). Tal analogia pode não representar adequadamente o comportamento real do sistema, considerando a maior compressibilidade das colunas granulares em comparação às estacas rígidas de concreto, o que implica mecanismos distintos transferência de carga. Nesse contexto, investigações experimentais controladas tornam-se essenciais para aprofundar a compreensão desses processos e aprimorar critérios de projeto.

A modelagem física em escala reduzida constitui ferramenta consolidada para a análise de problemas geotécnicos complexos, permitindo reproduzir condições representativas de campo sob ambiente controlado e com elevado controle de variáveis. Contudo, a instrumentação convencional pode interferir no comportamento do solo e comprometer a precisão das medições. Para superar essa limitação, a técnica de solo transparente tem sido amplamente adotada em associação com métodos ópticos de imageamento digital, possibilitando a observação direta dos mecanismos internos de deformação de forma não intrusiva (Iskander, 2010; Iskander; Bathurst; Omidvar, 2015; Liu; Iskander, 2010). Os solos transparentes são materiais bifásicos compostos por partículas sólidas translúcidas e fluidos com índices de refração compatíveis, conferindo-lhes transparência óptica, e que apresentam comportamento mecânico análogo ao de solos naturais.

Para simulação de materiais granulares, partículas de quartzo fundido saturadas com misturas de óleo mineral têm se mostrado eficazes, apresentando resistência ao cisalhamento comparável à de areias naturais (Ezzein; Bathurst, 2011; Iskander; Bathurst; Omidvar, 2015). Para representar solos coesivos, o Laponite RD®, um filossilicato sintético de magnésio–lítio estruturalmente relacionado à hectorita, forma suspensões transparentes quando hidratado, reproduzindo propriedades semelhantes às de argilas moles naturais, conforme demonstrado por ensaios de resistência, adensamento e permeabilidade (Ads; Iskander; Bless, 2020, 2020; Iskander; Liu; Sadek, 2002; Kong *et al.*, 2020; Liu; Iskander; Sadek, 2003; Ma *et al.*, 2022; Wallace; Rutherford, 2015; Wallace; Rutherford; Zheng, 2018).

Diante desse cenário, o presente estudo adota uma abordagem de modelagem física em condição 1g, utilizando a técnica de solo transparente, para investigar o comportamento de aterros construídos sobre solos moles reforçados por colunas granulares encamisadas com geossintéticos e dotados de plataforma de transferência de carga (PTC) também reforçada. O objetivo principal é avaliar a influência do número de camadas de reforço geossintético inseridas na PTC sobre os mecanismos de transferência de carga e o desempenho global do sistema. O solo mole foi simulado por meio de argila transparente à base de Laponite RD®, enquanto a plataforma granular foi representada por areia transparente de quartzo fundido. A resposta do modelo foi analisada por meio da técnica de DIC, utilizando o software *Ncorr*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solos transparentes

Para a simulação da argila mole, foi desenvolvida uma argila sintética transparente por meio da mistura mecânica de Laponite RD®, pirofosfato de sódio decahidratado (SPD) e água destilada. A Laponite RD® é um silicato lamelar sintético constituído por partículas com geometria relativamente uniforme, em formato de disco, com espessura aproximada de 0,92 nm e diâmetro médio de cerca de 25 nm. Embora seja intrinsecamente transparente, o material é comercializado na forma de pó branco devido aos efeitos de refração da luz. A adição de SPD teve como objetivo reduzir a viscosidade da mistura sem comprometer sua resistência, facilitando a eliminação de bolhas de ar durante a preparação e aprimorando a transparência do material final.

Após a preparação, a argila transparente foi mantida em repouso por 10 dias para obtenção da resistência necessária no modelo físico. A formulação adotada continha 7% de Laponite RD® e 0,075% de SPD (em massa). O comportamento mecânico da argila sintética foi avaliado por meio de ensaios triaxiais de compressão não adensados–não drenados (UU), conduzidos conforme a norma ASTM (2015), sob pressões confinantes de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. Os resultados indicaram uma resistência ao cisalhamento não drenada média (Su) de 2,21 kPa, confirmando a adequação do material para representar solos moles em modelos físicos.

O material transparente utilizado na construção da plataforma de transferência de carga foi composto por partículas grossas de quartzo fundido saturadas com uma mistura líquida compatível. O quartzo fundido, obtido a partir de resíduos gerados durante a fabricação de vidro de quartzo, foi moído e peneirado para alcançar a distribuição granulométrica requerida para o modelo. O material apresentou diâmetro médio de partículas de 1,75 mm. Para garantir a transparência, o material granular foi saturado com um líquido cujo índice de refração se aproximasse do índice do quartzo fundido (n = 1,4585). Para esse fim, foi utilizada uma mistura em massa 1:1 de petrolato líquido (n = 1,4400) e óleo de terebintina (n = 1,4779). A areia transparente foi caracterizada por ensaios triaxiais de compressão adensados–não drenados (CU), realizados conforme a norma ASTM (2020). Os ensaios foram conduzidos sob pressões confinantes de 25, 50, 75 e 100 kPa, resultando em ângulo de atrito igual a 47,23° e coesão nula.

2.2 Geossintéticos

Materiais alternativos foram selecionados com o objetivo de reproduzir o comportamento mecânico de geossintéticos reais, considerando a redução de escala adotada nos modelos físicos. Um tecido não tecido (TNT) de polipropileno foi utilizado para o encamisamento das colunas granulares. Além disso, uma malha comercial de polietileno, com dimensões de abertura de 2 mm na direção transversal e 5 mm na direção longitudinal, foi empregada como material equivalente à geogrelha na plataforma de transferência de carga. O comportamento mecânico de ambos os materiais foi avaliado por meio de ensaios de tração em faixa larga, realizados de acordo com a norma ASTM (2024). As principais propriedades obtidas nos ensaios laboratoriais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais alternativos para simulação de geossintéticos

	TNT		Tela comercial	
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
Resistência à tração (kN/m)	1,6	3,0	2,9	4,0
Módulo de rigidez a 5% de deformação (kN/m)	8,3	23,3	4,6	10,2
Deformação máxima (%)	95,2	126,0	53,6	39,8

2.3 Modelo físico

O modelo físico em escala reduzida foi instalado em uma caixa de acrílico com dimensões internas de 400 mm de comprimento, 200 mm de largura e 400 mm de altura (Figura 1). Uma camada de espuma D28 com 60 mm de espessura foi posicionada na base do modelo para permitir a deformação vertical do solo mole sob a aplicação de carregamento. A camada de solo mole foi simulada por meio de 150 mm de argila sintética transparente à base de Laponite RD®. O sistema de fundação foi composto por duas GECs com diâmetro de 50 mm. O espaçamento entre eixos dos elementos (s) foi de 200 mm, resultando em um vão livre entre apoios (s − a) de 150 mm. A razão entre a altura da plataforma de transferência de carga e o vão livre (H/(s − a)) foi igual a 0,5. O material utilizado como preenchimento das GECs consistiu em quartzo fundido de granulometria fina. Esse material foi selecionado de modo a evitar interferências na transparência óptica dos solos sintéticos e garantir adequada visualização dos resultados experimentais. Suas propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas por meio dos mesmos procedimentos adotados para o quartzo fundido empregado na plataforma de transferência de carga. O material apresentou diâmetro médio de partículas de 0,65 mm, e o ângulo de atrito obtido em ensaios de compressão triaxial foi de 49,64°.

A plataforma de transferência de carga foi constituída por camadas alternadas de areia artificial transparente e reforço geossintético. Para garantir ancoragem adequada do reforço no modelo bidimensional,

ao reforço foi estendido verticalmente ao longo da interface entre o material granular e as paredes laterais da caixa de ensaio. Um plano vertical de referência, composto por partículas traçadoras opacas, foi implementado tanto na camada de solo mole quanto nas camadas granulares da LTP. Esse plano foi utilizado para análise dos campos de deslocamento por meio da técnica DIC utilizando o software Ncorr. O carregamento foi aplicado por meio de uma máquina universal de ensaios operando sob controle de deslocamento. Para simular o carregamento do aterro, o modelo foi submetido a um ensaio de compressão com taxa de deslocamento constante de 2 mm/min. As cargas foram transmitidas por meio de uma placa rígida e medidas com célula de carga. Os ensaios foram conduzidos até uma tensão aplicada máxima de 35 kPa. Três modelos físicos foram desenvolvidos neste programa experimental com o objetivo de investigar a influência da quatidade de camadas de reforço no comportamento da PTC. Foram avaliadas as situações sem reforço (R00), com uma camada (R01) e com duas camadas de reforço (R02), com espaçamento de 20 mm entre camadas.

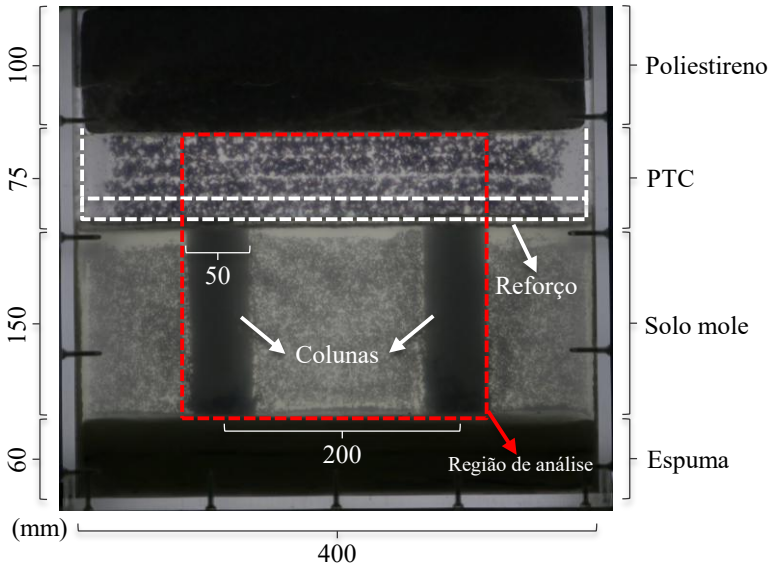


Figura 1. Layout do modelo físico

3 RESULTADOS

Os campos de deslocamento vertical obtido pela análise DIC são apresentados na Figura 2 correspondentes à tensão aplicada de 35 kPa (maior nível de tensão aplicada). Os mapas de deslocamento são exibidos com uma escala de cores variando de 0 a 20 mm de deslocamento, em que a cor azul representa as regiões de menor deslocamento e vermelha indica as regiões de maior deslocamento vertical no modelo.

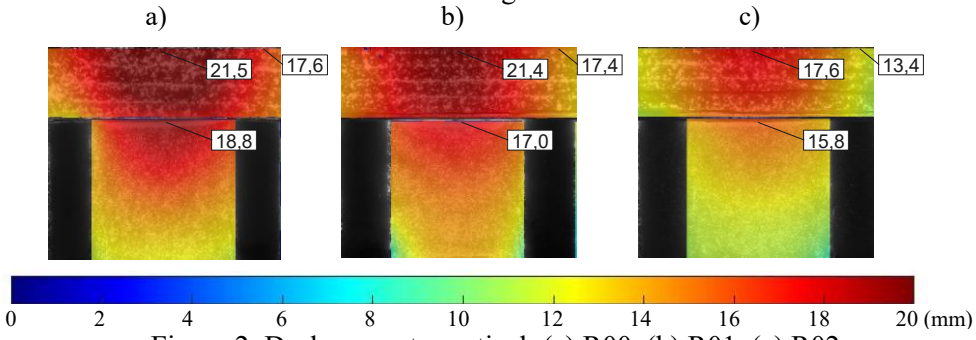


Figura 2. Deslocamento vertical: (a) R00, (b) R01, (c) R02

O modelo sem reforço horizontal (R00) apresentou os maiores deslocamentos verticais, conforme esperado. A incorporação de reforço geossintético promoveu a redução dos recalques observados, tanto na plataforma de transferência de carga (PTC) quanto na camada de solo mole subjacente. No último estágio de carregamento, a redução de recalque no centro do modelo, no topo da plataforma, foi de apenas 0,09% com a utilização de

uma camada de geogrelha. Esse desempenho aumentou significativamente para 18,02% com a adoção de duas camadas. Assim, a diferença de desempenho entre as configurações com uma e duas camadas atingiu 17,94% sob tensão aplicada de 35 kPa. Na região central, no topo da camada de solo mole, observou-se redução de recalque de 9,57% com uma camada de reforço e de 15,95% com duas camadas, resultando em diferença de 7,05% entre os modelos R01 e R02.

Nos três casos, os valores máximos de deslocamento concentraram-se na região central do modelo, especificamente no vão livre entre as estacas. Essa região, denominada zona móvel, é evidenciada em vermelho nos mapas de deslocamento. Observa-se que a área destacada no centro da PTC estendeu-se até as cabeças das colunas, indicando que, diferentemente do comportamento típico de aterros apoiados sobre elementos rígidos, as zonas móvel e estacionária (sobre o topo das colunas) não estavam claramente definidas. A diferenciação entre essas zonas torna-se mais perceptível no modelo R01, no qual se observam menores deslocamentos verticais sobre o topo das colunas. Mas é no modelo R02 que a distinção entre zona móvel e estacionária é mais evidente, conforme indicado pela variação de coloração nos mapas de deslocamento.

Esse comportamento está associado à maior flexibilidade das colunas granulares, que permite a ocorrência de deslocamentos verticais mais pronunciados. Tal recalque é fundamental para a mobilização da capacidade de carga das colunas encamisadas. Os mecanismos de transferência de carga baseados no arqueamento do solo e na ação de membrana são ativados somente após o desenvolvimento de deslocamentos relativos suficientes entre a zona estacionária e a zona móvel. Para entender melhor esses mecanismos, foram plotadas as curvas de transferência de cargas para os três modelos, relacionando ao carregamento aplicado em termos de força. Assim como o *Soil Arching Ratio* (SAR), correspondente a razão entre a carga total aplicada e a carga transferida para o solo de fundação (Figura 3).

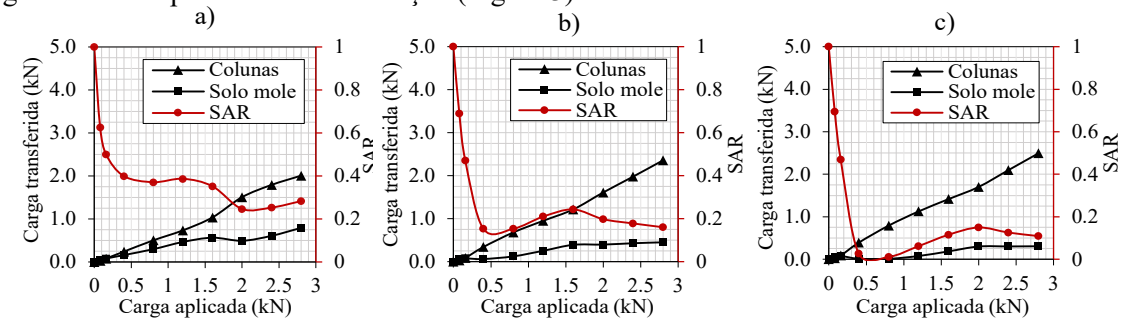


Figura 3. Transferência de cargas e SAR: (a) R00, (b) R01, (c) R02

Nos três casos analisados, a carga transferida para as colunas foi superior àquela direcionada ao solo mole, e as curvas de SAR apresentaram comportamento compatível com os padrões descritos na literatura. No modelo R00, observa-se inicialmente uma redução significativa do SAR até o estágio correspondente a 0,5 kN de carga aplicada. Em seguida, ocorre um leve aumento até 1 kN, seguido por uma segunda redução até 2 kN, quando o índice volta a crescer, atingindo valor final de 0,28. A primeira diminuição do SAR está associada à mobilização inicial do arqueamento do solo, momento em que a carga aplicada ainda não é suficiente para induzir deslocamentos verticais nas colunas, assim, a taxa de incremento da carga transferida ao solo mole é inferior ao aumento da carga total aplicada. A interrupção dessa tendência de queda coincide com o início dos deslocamentos verticais das colunas, o que favorece maior transferência de carga ao solo mole, justificando o aumento do SAR. A segunda redução do índice está relacionada à mobilização progressiva da capacidade de carga das colunas. Nos estágios finais de carregamento, observa-se uma tendência de estabilização do SAR. Comportamento semelhante foi verificado nos modelos reforçados; contudo, os valores de SAR foram inferiores aos do modelo não reforçado, indicando maior eficiência do sistema. No modelo com uma camada de reforço (R01), o valor final de SAR foi de 0,16, enquanto no modelo com duas camadas (R02) esse valor foi reduzido para 0,11, correspondendo a reduções de 42,8% e 60,7%, respectivamente, em relação ao modelo sem reforço. Esse resultado evidencia que a presença do reforço contribuiu para reduzir a parcela de carga transferida ao solo mole, aumentando a eficiência global do sistema.

A visualização do campo de deformações verticais permite identificar os mecanismos de transferência de tensões nos modelos analisados. A Figura 4 apresenta os campos de deformação vertical dos três modelos no último estágio de carregamento. As regiões em azul indicam deformações negativas (compressão), enquanto as regiões em vermelho representam deformações positivas.

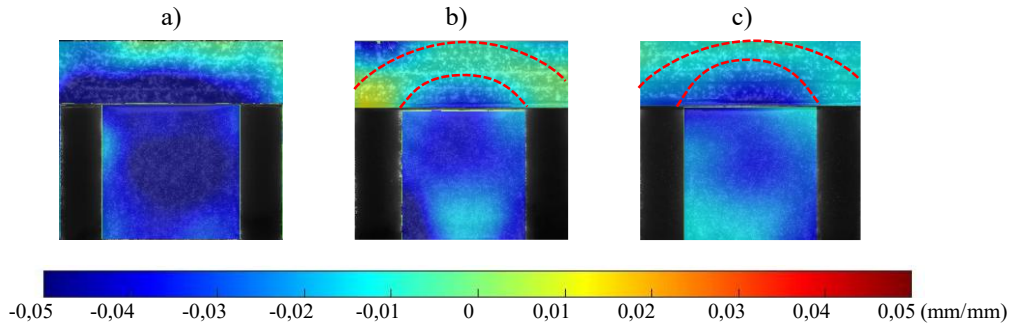


Figura 4. Deslocamento vertical: (a) R00, (b) R01, (c) R02

Entre os três modelos analisados, o modelo sem reforço basal apresenta maiores níveis de compressão na no solo mole, resultando na transferência de tensões verticais para porções mais profundas da camada. Deformações verticais relativamente elevadas também são observadas sobre as colunas granulares encamisadas (GECs), evidenciando a concentração de tensões nessas regiões. Quando se utiliza uma camada basal de geogrelha, as tensões verticais transmitidas ao solo mole são reduzidas em cerca de 18% em comparação com o modelo não reforçado, concentrando-se predominantemente na porção superior da camada de solo mole. Além disso, observa-se a formação de regiões de deformações positivas com configuração em formato de arco conectando o topo das colunas, indicando a atuação do mecanismo de arqueamento do solo. No caso do modelo com duas camas de reforço, as tensões transferidas ao solo de fundação mole são reduzidas em cerca de 41% em comparação com o modelo não reforçado. Nesse modelo, a formação em arco ainda é observada, porém com menor intensidade. Possivelmente, a utilização de duas geogrelhas promove o aumento da rigidez da PTC, conferindo-lhe um comportamento semelhante ao de uma laje. Esse mecanismo contribui para a redução das tensões transferidas ao solo mole de fundação.

Para melhor avaliar o desempenho do reforço com geogrelha, as deformações ao longo das camadas de reforço foram medidas ao longo de todo o processo de carregamento, por meio da técnica DIC. Foram registradas as maiores deformações medidas no reforço para cada estágio de aplicação e tensão. As curvas resultantes são apresentadas na Figura 5. A curva em vermelho corresponde ao modelo com uma camada de reforço, enquanto as curvas em azul correspondem ao modelo com duas camadas.

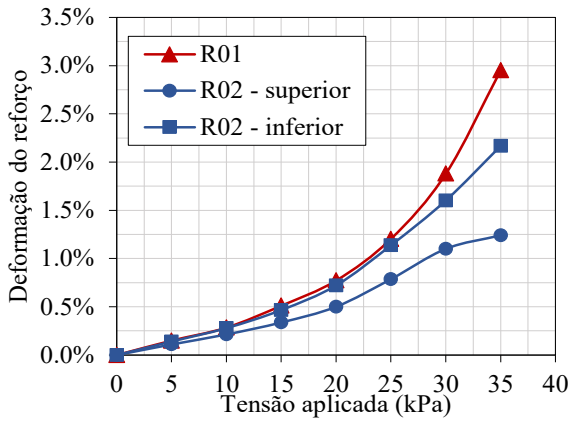


Figura 5. Deformação do reforço da PTC

O maior nível de deformação do reforço foi registrado no modelo R01, atingindo 2,9% no último estágio de carregamento. No modelo R02, as deformações máximas foram de 2,1% na camada inferior e 1,2% na camada superior. Observa-se que, nos estágios iniciais de carregamento, a camada inferior do modelo R02 apresentou deformações bastante semelhantes às do modelo R01, até a aplicação de 25 kPa, momento a partir do qual ambas as camadas passaram a apresentar redução na taxa de crescimento das deformações. Quando observado o último estágio de carregamento, A deformação total mobilizada pela atuação conjunta das duas camadas no modelo R02 foi comparável àquela verificada na configuração com camada única. Esse comportamento indica que a inserção de uma segunda camada de reforço não resultou em intensificação do efeito membrana. Dessa forma, a redução de recalques observada está provavelmente relacionada a uma maior

contribuição do mecanismo de arqueamento do solo na plataforma de transferência de carga. A presença da segunda camada, ao promover o enrijecimento da plataforma, favorece o desenvolvimento do arqueamento e, consequentemente, a melhoria do desempenho global do sistema.

4 CONCLUSÃO

Este estudo investigou os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre solo mole apoiados em colunas granulares encamisadas, com e sem reforço geossintético, por meio de modelagem física com solos transparentes. A análise dos deslocamentos e deformações internos do solo, obtida a partir das imagens geradas pela técnica DIC, possibilitou avaliação detalhada do comportamento do sistema e comparação consistente entre as diferentes configurações analisadas. Conclui-se que:

- A incorporação de reforço geossintético na plataforma de transferência de carga (PTC) reduziu os recalques sem necessidade de alteração do espaçamento entre colunas, sendo o desempenho significativamente superior na configuração com duas camadas de reforço apresentando maior definição entre as zonas móvel e estacionária, favorecendo a redistribuição de tensões.
- A presença do reforço resultou em menor parcela de carga transferida ao solo mole, evidenciada pela redução dos valores de SAR, indicando maior eficiência dos sistemas reforçados, especialmente com duas camadas. Embora o modelo com uma camada também tenha apresentado redução do SAR, essa diminuição não se refletiu em redução significativa dos recalques.
- As medições de deformação no reforço indicam que a melhoria de desempenho observada com duas camadas não está associada ao aumento da ação de membrana, mas possivelmente ao aumento da rigidez da PTC e à consequente intensificação do arqueamento do solo.
- O número de camadas de reforço e seu posicionamento na PTC constituem fatores relevantes para o ganho de rigidez da plataforma e para o desempenho global de aterros sobre solos moles apoiados em colunas granulares encamisadas.

De modo geral, os modelos foram capazes de representar adequadamente o comportamento de aterros sobre solos moles apoiados em GECs, utilizando solos transparentes como material de simulação. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento dos mecanismos de transferência de carga em PTCs reforçadas com geossintéticos sobre apoios semirrígidos, podendo contribuir para o aprimoramento das metodologias de dimensionamento desse tipo de sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – Processo nº 2025/07603-0 –, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 –, ao Geosynthetic Institute (GSI) e à empresa Huesker pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, C. H.; EDIL, T. B. Behaviour of geogrid-reinforced load transfer platforms for embankment on rammed aggregate piers. **Geosynthetics International**. v. 14, 3, p. 141–153. 2007. ISSN: 10726349. DOI: 10.1680/gein.2007.14.3.141

ADS, A.; ISKANDER, M.; BLESS, S. Soil–projectile interaction during penetration of a transparent clay simulant. **Acta Geotechnica**. v. 15, 4, p. 815–826. 2020

ADS, A.; ISKANDER, M.; BLESS, S. Shear strength of a synthetic transparent soft clay using a miniature ball penetrometer test. **Geotechnical Testing Journal**. v. 43, 5. 2020

AGHILI, E.; HOSSEINPOUR, I.; JAMSHIDI, R.; AHMADI, H. Transportation Geotechnics Behavior of granular column-improved clay under cyclic shear loading. **Transportation Geotechnics**. v. 31, September, p. 100654. 2021

ALMEIDA, M. S. S.; HOSSEINPOUR, I.; RICCIO, M. Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: Numerical and analytical studies. **Geosynthetics International**. v. 20, 4, p. 252–262. 2013

ASTM D2850-15. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. 2015

ASTM D4595/D4595M-24. Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method. 2024

ASTM D7181-20. Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. 2020

BS 8006-1. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fill. 2010

DEB, K. Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. v. 32, p. 1267–1288. 2007

DEB, K.; BASUDHAR, P. K.; CHANDRA, S. Generalized Model for Geosynthetic-Reinforced Granular Fill-Soft Soil with Stone Columns. **International Journal of Geomechanics**. v. 7, 4, p. 266–276. 2007

DEB, K.; CHANDRA, S.; BASUDHAR, P. K. Response of multilayer geosynthetic-reinforced bed resting on soft soil with stone columns. **COMPUTERS AND GEOTECHNICS**. v. 35, 3, p. 323–330. Indian Inst Technol, Dept Civil Engn, Roorkee 247667, Uttar Pradesh, India. 2008

DEB, K.; SAMADHIYA, N. K.; NAMDEO, J. B. Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. **GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES**. v. 29, 2, p. 190–196. 2011

EBGEO. Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements. Munchen, Germany. 2011. ISBN: 9783433029831

EZZEIN, F. M.; BATHURST, R. J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling. **Geotechnical Testing Journal**. v. 34, 6, p. 590–601. 2011

FHWA. Ground Modification Methods - Reference Manual - Volume II. 2017

HOSSEINPOUR, I.; RICCIO, M.; ALMEIDA, M. S. S. Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 42, 4, p. 363–373. 2014

ISKANDER, M. **Modeling with Transparent Soils**. Berlin: Springer. 2010

ISKANDER, M.; BATHURST, R. J.; OMIDVAR, M. Past, Present, and Future of Transparent Soils. **Geotechnical Testing Journal**. v. 38, 5, p. 557–573. 100 BARR HARBOR DR, W CONSHOHOCKEN, PA 19428-2959 USA. 2015

ISKANDER, M. G.; LIU, J.; SADEK, S. Transparent amorphous silica to model clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 128, 3, p. 262–273. 2002

JAMSHIDI, R.; MEHRAN, C.; FARD, K.; JAMSHIDI, M. Physical and Numerical Modeling of Stone Column Behavior in Loose Sand. **International Journal of Civil Engineering**. 2017

KONG, G.; ZHOU, Y.; YANG, Q.; WANG, C.; CHEN, Y. Geotechnical Properties of a New Transparent Clay. **International Journal of Geomechanics**. v. 20, 12, p. 06020032. 2020

LIU, J.; ISKANDER, M. G. Modelling capacity of transparent soil. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 47, 4, p. 451–460. 2010

LIU, J.; ISKANDER, M. G.; SADEK, S. Consolidation and Permeability of Transparent Amorphous Silica. **Geotechnical Testing Journal**. v. 26, 4, p. 390–401. 2003

MA, S.; DUAN, Z.; HUANG, Z.; LIU, Y.; SHAO, Y. Study on the stability of shield tunnel face in clay and clay-gravel stratum through large-scale physical model tests with transparent soil. **Tunnelling and Underground Space Technology**. v. 119, August 2021, p. 104199. 2022

MOAYED, R. Z.; ZADE, M. H. Numerical Analysis of Geosynthetic- Encased Stone Columns under Laterally Loads. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. v. 11, 1, p. 15–20. 2017

MOHAMADI, M.; IMAN, M.; MEGHDAD, H.; REZA, P.; CHENARI, J. Shear Strength Behavior of Soft Clay Reinforced with Ordinary and Geotextile - Encased Granular Columns. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**. v. 9, 6, p. 1–14. 2023

SHAFIEE, A.; FATHIPOUR, H.; PAYAN, M.; JALILI, J.; JAMSHIDI, R. Modulus reduction and damping characteristics of geotextile-reinforced sands. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. v. 181, April, p. 108641. 2024

SHAHU, J. T.; MADHAV, M. R.; HAYASHI, S. Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system. **Computers and Geotechnics**. v. 27, 1, p. 45–62. 2000

TIZPA, P.; JAMSHIDI, R.; PAYAN, M. Computers and Geotechnics PFC / FLAC 3D coupled numerical modeling of shallow foundations seated on reinforced granular fill overlying clay with square void. **Computers and Geotechnics**. v. 161, June, p. 105574. 2023

WALLACE, J. F.; RUTHERFORD, C. J. Geotechnical properties of LAPONITE RD®. **Geotechnical Testing Journal**. v. 38, 5, p. 574–587. 2015

WALLACE, J. F.; RUTHERFORD, C. J.; ZHENG, J. Visualizing failure surfaces in soft clay due to suction caisson loading. **Geotechnical Special Publication**. v. 2018-March, GSP 294, p. 172–180. 2018

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/51

Redução de Emissão de Carbono na Execução de Acesso Viário de Mina com uso de Geogrelha Rigída

Wladimir Caressato Junior
Coordenador Técnico, TDM Brasil, Jaguariúna, Brasil, wcaressato@tdmbrasil.com.br

Bruna Todescan de Carvalho
Engenheira Civil, TDM Geossintéticos Brasil, Jaguariúna, Brasil, btodescan@tdmbrasil.com.br

RESUMO: Os geossintéticos têm se consolidado como alternativas viáveis e sustentáveis para o reforço de pavimentos e estruturas de solo, oferecendo vantagens técnicas, econômicas e ambientais. O presente estudo tem como objetivo demonstrar quantitativamente como o uso de geogrelhas rígidas multidirecionais pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (CO_2eq) durante a execução de acessos viários em ambiente minerário. Com base em um projeto real de acesso viário em uma mina de minério de ferro, foram avaliados os ganhos ambientais decorrentes da redução da espessura das camadas granulares e do menor consumo de materiais e combustível no processo construtivo. A solução convencional apresentava espessura total aproximada de 2,0 m, enquanto a estrutura reforçada com geogrelhas permitiu reduzir essa espessura para cerca de 1,2 m, mantendo o desempenho estrutural da via. Considerando um trecho representativo de 1.000 m de extensão e 20 m de largura, a otimização estrutural resultou em uma redução estimada de aproximadamente 28,2% nas emissões de CO_2eq associadas à execução da obra. Os resultados evidenciam que a utilização de geossintéticos pode contribuir simultaneamente para o aumento da eficiência estrutural das vias não pavimentadas e para a redução do impacto ambiental associado à construção de infraestrutura em operações de mineração.

PALAVRAS-CHAVE: geogrelhas rígidas multidirecionais, geossintéticos, vias não pavimentadas, reforço de pavimentos, emissões de carbono, infraestrutura de mineração.

.

ABSTRACT: Geosynthetics have become viable and sustainable alternatives for the reinforcement of pavements and soil structures, providing technical, economic, and environmental benefits. This study aims to quantitatively demonstrate how the use of multidirectional rigid geogrids can contribute to the reduction of greenhouse gas emissions (CO_2eq) during the construction of mine access roads. The analysis was based on a real access road project in an iron ore mine, where environmental gains resulting from the reduction of granular layer thickness and lower material and fuel consumption during construction were evaluated. The conventional road structure presented a total thickness of approximately 2.0 m, while the reinforced configuration incorporating geogrids allowed the structural thickness to be reduced to about 1.2 m while maintaining the required traffic performance. Considering a representative segment 1,000 m long and 20 m wide, the structural optimization resulted in an estimated reduction of approximately 30.7% in CO_2eq emissions associated with road construction. The results indicate that the use of geosynthetics can simultaneously improve the structural efficiency of unpaved roads and reduce the environmental impact associated with infrastructure construction in mining operations.

KEYWORDS: multidirectional rigid geogrids, geosynthetics, unpaved roads, pavement reinforcement, carbon emissions, mining infrastructure.

1 INTRODUÇÃO

A construção e manutenção de vias não pavimentadas em ambientes minerários representam um desafio recorrente para a engenharia geotécnica, especialmente quando essas estruturas são submetidas a tráfego pesado e condições climáticas adversas. Em operações de mineração a céu aberto, acessos viários são frequentemente utilizados por caminhões fora-de-estrada, resultando em elevados níveis de tensão transmitidos às camadas granulares e ao subleito. Nessas condições, deformações permanentes, formação de trilhas de roda (*rutting*) e perda de estabilidade superficial são problemas comuns, particularmente quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte.

A solução tradicional para esse tipo de situação geralmente consiste no aumento da espessura das camadas granulares ou na utilização de materiais pétreos de maior qualidade. Embora essas estratégias possam melhorar temporariamente a capacidade de suporte da via, elas frequentemente implicam em elevado consumo de materiais, intensificação das operações de transporte e aumento do custo e do impacto ambiental das obras. Em ambientes minerários de grande escala, onde os volumes movimentados são significativos, essa abordagem pode resultar em estruturas pouco eficientes do ponto de vista do uso de recursos.

Nesse contexto, o uso de geossintéticos tem se consolidado como uma alternativa técnica eficiente para o reforço de pavimentos não pavimentados. As geogrelhas rígidas multidirecionais atuam promovendo o confinamento dos agregados granulares e restringindo deslocamentos laterais sob carregamentos cíclicos, aumentando a rigidez aparente da camada reforçada e melhorando a distribuição de tensões sobre o subleito. Esse mecanismo permite reduzir a espessura das camadas estruturais sem comprometer o desempenho da via.

Além dos benefícios estruturais, a adoção de soluções de reforço com geossintéticos pode contribuir para a redução do impacto ambiental associado à construção dessas estruturas. A diminuição da espessura das camadas granulares reduz a demanda por materiais de empréstimo e o volume de transporte necessário para sua execução, fatores diretamente relacionados ao consumo de combustível e à emissão de gases.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar quantitativamente a redução das emissões de carbono associadas à execução de um acesso viário em ambiente minerário, decorrente da utilização de geogrelhas rígidas multidirecionais no reforço da estrutura do pavimento. O estudo é baseado em um caso real de aplicação em uma mina de minério de ferro no estado de Minas Gerais, no qual se compararam duas configurações estruturais: uma solução convencional (SC), baseada no aumento da espessura granular, e uma solução reforçada com geossintéticos (SG). A análise considera os volumes de materiais empregados, as distâncias de transporte e o consumo energético associado às atividades construtivas, permitindo avaliar os ganhos ambientais decorrentes da otimização estrutural proporcionada pelo uso de geossintéticos.

2 GEOGRELHAS RÍGIDAS MULTIDIRECIONAIS NO REFORÇO DE VIAS NÃO PAVIMENTADAS

O reforço de vias não pavimentadas com geossintéticos tem sido amplamente estudado nas últimas décadas como uma alternativa eficiente para melhorar o desempenho estrutural de vias submetidas a carregamentos repetidos. Entre os diferentes tipos de geossintéticos utilizados para esse fim, as geogrelhas apresentam papel de destaque devido à sua capacidade de promover o confinamento de materiais granulares e melhorar a distribuição de tensões na estrutura do pavimento.

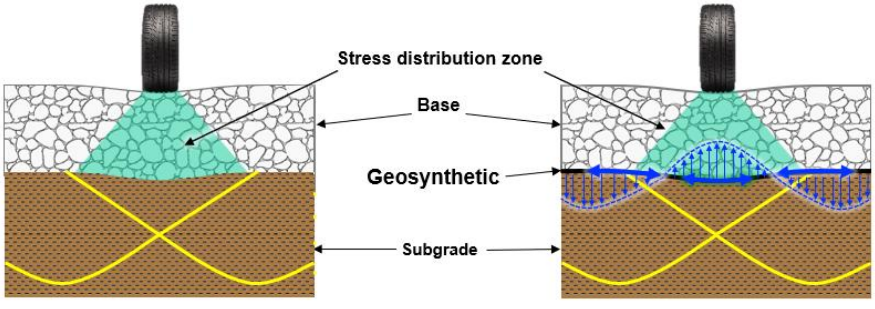


Figura 1. Comparação da distribuição de tensões em estrutura de via não pavimentada sem reforço e com reforço por geogrelha rígida multidirecional.

O principal mecanismo de atuação das geogrelhas em pavimentos granulares está associado ao intertravamento mecânico entre os agregados e as aberturas da geogrelha. Esse mecanismo limita o deslocamento lateral das partículas sob carregamento, promovendo o confinamento da camada granular e aumentando sua rigidez aparente. Como consequência, ocorre uma redução das deformações permanentes e uma melhor distribuição das tensões transmitidas ao subleito (*Giroud & Han*, 2004).

Em vias não pavimentadas construídas sobre subleitos de baixa capacidade de suporte, esse efeito de confinamento é particularmente importante. Sem reforço, o tráfego repetido provoca deslocamentos laterais nas camadas granulares, resultando em perda de suporte estrutural e formação progressiva de trilhas de roda. Com a introdução de geogrelhas, a camada granular passa a se comportar como um sistema estabilizado, no qual a mobilização de esforços proporcionados pela geogrelha contribui para limitar a deformação da estrutura.

Geogrelhas rígidas multidirecionais apresentam uma geometria de aberturas projetada para resistir a solicitações provenientes de diferentes direções de carregamento. Em acessos viários de mineração, essa característica é especialmente relevante, uma vez que as solicitações impostas pelos veículos incluem aceleração, frenagem e mudanças de direção, resultando em estados de tensão mais complexos quando comparados aos pavimentos rodoviários convencionais.

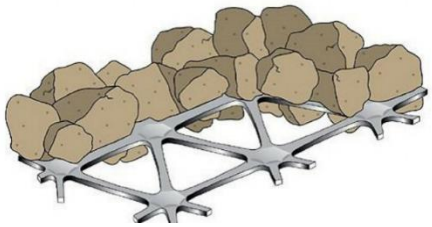


Figura 2. Esquema do mecanismo de confinamento lateral.

Além da melhoria do comportamento mecânico da estrutura, o uso de geogrelhas pode permitir a redução da espessura das camadas granulares necessárias para garantir o desempenho da via. Métodos de dimensionamento de vias não pavimentadas reforçadas com geogrelhas, como os propostos por *Giroud and Han* (2004), demonstram que o reforço pode aumentar significativamente a capacidade de suporte da estrutura, permitindo a otimização do consumo de materiais.

Essa característica torna o uso de geogrelhas particularmente interessante em ambientes minerários, onde as vias internas frequentemente demandam grandes volumes de materiais granulares e estão sujeitas a carregamentos extremamente elevados. Nesses casos, a estabilização mecânica das camadas granulares não apenas melhora o desempenho estrutural da via, mas também pode contribuir para a redução do volume de materiais empregados e, consequentemente, para a diminuição dos impactos ambientais associados à execução das obras.

No contexto do presente trabalho, a utilização de geogrelhas rígidas multidirecionais foi adotada como estratégia para melhorar a estabilidade estrutural de um acesso viário, permitindo a redução da espessura das camadas granulares e a otimização do consumo de materiais. Essa otimização estrutural constitui a base para a análise das emissões de carbono associadas à execução da obra, apresentada nas seções seguintes.

3 METOLOGIA DE ANÁLISE DE EMISSÕES DE CARBONO

A avaliação das emissões de gases de efeito estufa associadas à execução do acesso viário foi realizada por meio de uma análise comparativa entre duas configurações estruturais de pavimento: uma solução convencional baseada no aumento da espessura das camadas granulares e uma solução reforçada com geogrelhas rígidas multidirecionais. O objetivo da análise foi quantificar a diferença nas emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) decorrente das atividades construtivas de cada alternativa.

A metodologia adotada considerou principalmente as emissões relacionadas às etapas de produção de materiais, transporte e execução da estrutura do pavimento. Essas etapas representam, em geral, a maior parcela das emissões associadas à construção de vias não pavimentadas, especialmente em ambientes minerários onde os volumes de materiais granulares empregados são elevados.

A análise foi desenvolvida com base em um trecho representativo de acesso viário com 1.000 m de extensão e 20 m de largura, correspondendo a uma área total de 20.000 m². Para cada solução estrutural foram levantados os volumes de materiais utilizados na execução das camadas granulares, bem como as distâncias médias de transporte entre as áreas de extração ou estoque de materiais e o local da obra.

As emissões de carbono foram estimadas a partir da combinação entre os volumes de materiais movimentados, as distâncias de transporte e os fatores de emissão associados ao consumo de combustível dos

equipamentos utilizados nas operações de carregamento, transporte e espalhamento dos materiais. Esses fatores de emissão foram obtidos a partir de bases de dados amplamente utilizadas em estudos de avaliação ambiental de obras de infraestrutura, considerando o consumo típico de diesel em equipamentos de terraplenagem e transporte.

Para a solução convencional foram considerados os volumes de materiais necessários para a execução das camadas estruturais com espessura total aproximada de 2,0 m, compostas por camada de rachão, sub-base granular e camada de desgaste. Já para a solução reforçada foram considerados os volumes correspondentes à estrutura otimizada com espessura total de aproximadamente 1,2 m, composta por camadas granulares estabilizadas com geogrelhas rígidas multidirecionais e geotêxtil não tecido separador.

A comparação entre as duas alternativas permitiu estimar a redução das emissões de CO_2eq associada à diminuição do volume de materiais empregados e à redução das distâncias totais de transporte necessárias para a execução da obra. Dessa forma, a análise buscou avaliar o potencial de redução de emissões decorrente da otimização estrutural proporcionada pelo uso de geossintéticos no reforço de vias não pavimentadas.

4 ESTUDO DE CASO: ACESSO VIÁRIO EM MINA DE MINÉRIO DE FERRO

O estudo de caso apresentado neste trabalho foi desenvolvido em uma mina de minério de ferro localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, onde a operação é caracterizada por elevados volumes de produção e pela utilização de uma extensa rede de vias internas não pavimentadas, responsáveis pelo transporte de minério entre as frentes de lavra e o britador primário.

Essas vias são utilizadas por caminhões fora-de-estrada de grande porte, com peso bruto total superior a 400 toneladas, operando em regime contínuo ao longo do dia. Nessas condições, as estruturas das vias são submetidas a carregamentos repetidos de elevada magnitude, o que tende a acelerar a degradação das camadas granulares, especialmente quando associada à presença de subleitos com baixa capacidade de suporte.



Figura 3. Situação da via em períodos de precipitação.

Além das elevadas cargas aplicadas, a região apresenta forte sazonalidade climática, com períodos de chuvas intensas concentradas entre os meses de outubro e maio. Durante esses períodos, a infiltração de água nas camadas granulares e no subleito reduz a resistência ao cisalhamento dos materiais e favorece o desenvolvimento de deformações permanentes, resultando na formação de trilhas de roda e perda de estabilidade superficial da via.

Antes da adoção da solução com geossintéticos, os acessos viários eram executados segundo práticas convencionais de mineração, baseadas no emprego de camadas granulares de grande espessura constituídas por materiais disponíveis na própria mina. Uma seção típica de pavimento era composta por aproximadamente 1,0 m de fragmentos de rocha provenientes do britador primário formando a plataforma estrutural, sobre a qual eram executados cerca de 0,7 m de material denominado “itabirito” utilizado como sub-base, além de uma camada superficial de desgaste com espessura aproximada de 0,3 m constituída por agregado britado.

Embora essa configuração proporcionasse capacidade estrutural inicial adequada, a elevada espessura das camadas resultava em grande consumo de materiais e elevados volumes de transporte durante a execução

e manutenção das vias. Além disso, a estrutura apresentava suscetibilidade à deformação sob condições de umidade elevada, exigindo intervenções frequentes de manutenção para restabelecimento da trafegabilidade.

Como alternativa, foi adotada uma solução reforçada utilizando geogrelhas rígidas multidirecionais associadas a geotêxtil não tecido separador, posicionadas no interior das camadas granulares. Essa configuração permitiu promover o confinamento dos agregados e melhorar a distribuição de tensões sobre o subleito, possibilitando a redução da espessura total da estrutura do pavimento.

Na solução reforçada, a espessura total da estrutura foi reduzida para aproximadamente 1,2 m, composta por duas camadas granulares com espessura de 0,40 m cada, estabilizadas com geogrelha rígida multidirecional, além de uma camada superficial de desgaste com aproximadamente 0,40 m de espessura. Essa otimização estrutural permitiu diminuir significativamente o volume de materiais utilizados na execução da via.

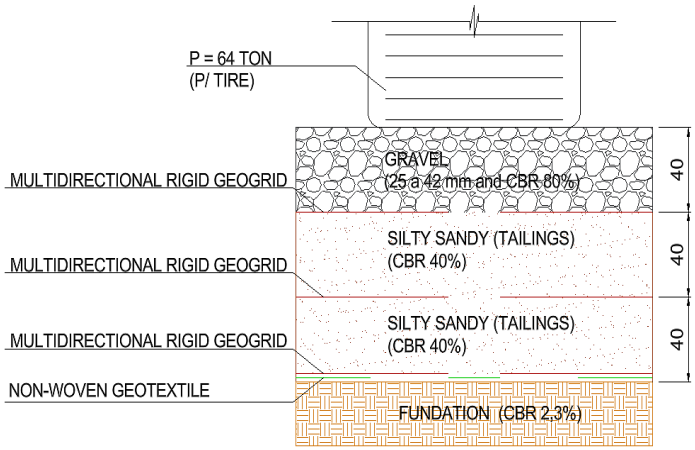


Figura 4. Seção típica da estrutura da via não pavimentada reforçada com geogrelhas rígidas multidirecionais.

A implantação da solução reforçada foi realizada utilizando os mesmos equipamentos normalmente empregados nas atividades de terraplenagem da mina, incluindo caminhões de transporte, tratores de esteiras e motoniveladoras. A instalação das geogrelhas e das camadas granulares ocorreu de forma rápida, atingindo produtividades superiores a 2.000 m² por dia, sem necessidade de equipamentos especializados e sem interferir nas atividades operacionais da mina.



Figura 5. Instalação do geotêxtil.



Figura 6. Instalação da geogrelha.



Figura 7. Geogrelha posicionada sobre a superfície.

A partir dessa nova configuração estrutural foi possível reduzir o volume de materiais empregados na execução da via, o que constitui a base para a análise comparativa das emissões de carbono associadas às duas soluções, apresentada na seção seguinte.

5 RESULTADOS

A adoção da solução reforçada com geogrelhas rígidas multidirecionais resultou em uma redução significativa do volume de materiais necessários para a execução do acesso viário analisado.

Para o trecho considerado, com 1.000 m de extensão e 20 m de largura, a solução convencional demandaria aproximadamente 20.000 m³ de fragmentos de rocha para a formação da plataforma estrutural, além de cerca de 14.000 m³ de material itabirítico utilizado como sub-base e 6.000 m³ de agregado destinado à camada superficial de desgaste.

Com a adoção da solução reforçada, a estrutura passou a demandar aproximadamente 16.000 m³ de material itabirito e 8.000 m³ de agregado para a camada superficial, além da incorporação de aproximadamente 20.000 m² de geogrelha rígida multidirecional e 20.000 m² de geotêxtil não tecido com função de separação.

A redução da espessura estrutural permitiu eliminar a necessidade da camada inferior de fragmentos de rocha e diminuir significativamente o volume total de materiais transportados e espalhados durante a execução da via. Essa otimização estrutural resultou em menor demanda por extração de agregados, menor número de viagens de transporte e redução do tempo de operação dos equipamentos de terraplenagem.

Com base nos volumes de materiais, distâncias médias de transporte e fatores de emissão associados ao consumo de diesel dos equipamentos utilizados, foi realizada uma estimativa comparativa das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) associadas à execução das duas alternativas construtivas.

Os resultados indicaram que a solução convencional apresentaria emissões totais da ordem de 1.288,8 tCO_2eq para o trecho analisado, enquanto a solução reforçada apresentou emissões estimadas de aproximadamente 925,6 tCO_2eq. Dessa forma, a adoção de geogrelhas rígidas multidirecionais possibilitou uma redução aproximada de 363,3 tCO_2eq, correspondente a uma diminuição de cerca de 28,2% nas emissões associadas à execução da obra.

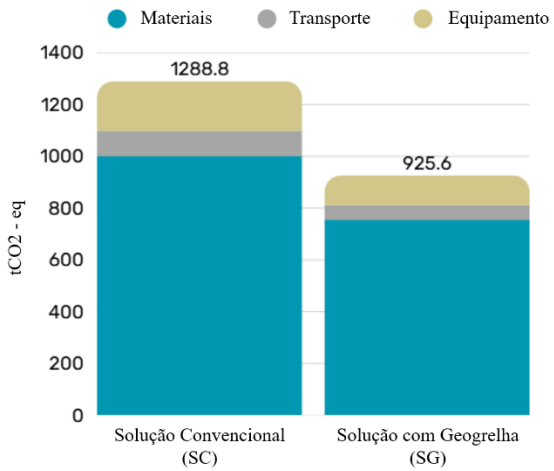


Figura 8. Emissões totais de CO_2 equivalente estimadas para as soluções convencional (SC) e reforçada com geogrelha (SG).

A maior parcela dessa redução está relacionada à diminuição do volume de materiais granulares movimentados e à consequente redução do consumo de combustível nas operações de transporte e espalhamento. Considerando a grande escala das operações minerárias, nas quais extensas redes de acessos viários são constantemente construídas e mantidas, esse tipo de otimização estrutural pode representar ganhos ambientais relevantes quando aplicado de forma sistemática.

Os resultados obtidos demonstram que o uso de geogrelhas rígidas multidirecionais, além de contribuir para o desempenho estrutural de vias não pavimentadas, pode também representar uma estratégia eficiente para reduzir o impacto ambiental associado à execução de obras de infraestrutura em ambientes minerários.

6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a utilização de geogrelhas rígidas multidirecionais em vias não pavimentadas pode representar uma alternativa tecnicamente eficiente para melhorar o desempenho estrutural dessas infraestruturas e, simultaneamente, otimizar o uso de materiais na sua execução.

Do ponto de vista geotécnico, a principal contribuição do reforço com geogrelhas está associada ao aumento do confinamento das partículas granulares e à restrição dos deslocamentos laterais sob carregamentos

repetidos. Esse mecanismo promove um comportamento mais estável da camada reforçada, reduzindo a tendência à formação de deformações permanentes e permitindo uma distribuição mais uniforme das tensões transmitidas ao subleito.



(a)



(b)

Figura 9. Vista geral da área da mina e do sistema de vias não pavimentadas utilizado para o transporte de minério.

Em vias não pavimentadas construídas sobre subleitos de baixa capacidade de suporte, como frequentemente ocorre em ambientes minerários, a perda de confinamento das camadas granulares é um dos principais fatores responsáveis pela degradação da estrutura. Sob tráfego intenso, os agregados tendem a se deslocar lateralmente, provocando a formação de trilhas de roda e a progressiva perda de capacidade estrutural da via. A presença da geogrelha atua limitando esse processo, estabilizando o conjunto granular e aumentando a rigidez da camada.

Esse comportamento permite que a estrutura do pavimento seja dimensionada com menor espessura total de materiais granulares, sem comprometer a capacidade de suporte da via. No caso analisado, a introdução do reforço possibilitou a redução significativa da espessura estrutural e do volume total de materiais empregados, mantendo condições adequadas de trafegabilidade sob carregamentos elevados.

Outro aspecto relevante diz respeito às implicações ambientais decorrentes dessa otimização estrutural. A redução do volume de materiais utilizados na construção da via implica menor demanda por extração, processamento e transporte de agregados, atividades que normalmente representam parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa em obras de infraestrutura. Dessa forma, a melhoria do desempenho mecânico da estrutura proporcionada pelos geossintéticos acaba refletindo também em ganhos ambientais associados à redução da intensidade de uso de recursos.

É importante destacar, contudo, que o desempenho de estruturas reforçadas com geogrelhas depende de uma adequada seleção dos materiais granulares e do correto posicionamento do reforço dentro da estrutura do pavimento. Além disso, aspectos como drenagem superficial e controle da infiltração de água continuam sendo fundamentais para o bom desempenho de vias não pavimentadas, especialmente em regiões sujeitas a regimes pluviométricos intensos.

Assim, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância da utilização de soluções de estabilização mecânica no projeto de vias não pavimentadas em ambientes minerários. A combinação entre melhoria do comportamento geotécnico da estrutura e redução do consumo de materiais evidencia o potencial do uso de geossintéticos como ferramenta para promover soluções mais eficientes e sustentáveis na engenharia geotécnica aplicada.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o potencial de redução de emissões de carbono associado à utilização de geogrelhas rígidas multidirecionais no reforço de vias não pavimentadas em ambiente minerário. A análise foi realizada a partir da comparação entre uma estrutura convencional de pavimento granular e uma solução reforçada com geossintéticos aplicada em um acesso viário de mina de minério de ferro.

Os resultados demonstraram que a adoção da solução reforçada permitiu reduzir a espessura total da estrutura do pavimento de aproximadamente 2,0 m para 1,2 m, eliminando a necessidade da camada inferior

de fragmentos de rocha e reduzindo significativamente o volume total de materiais empregados na execução da via.

Considerando um trecho representativo de 1.000 m de extensão e 20 m de largura, a solução convencional demandaria cerca de 20.000 m³ de fragmentos de rocha, 14.000 m³ de material itabirítico e 6.000 m³ de agregado superficial, enquanto a solução reforçada utilizou aproximadamente 16.000 m³ de material itabirítico e 8.000 m³ de agregado, além da incorporação de geossintéticos.

Como consequência da redução do volume de materiais e das operações de transporte associadas, as emissões totais estimadas para a execução do trecho analisado foram reduzidas de aproximadamente 1.288,8 tCO_2eq para 925,6 tCO_2eq, correspondendo a uma redução de 363,3 tCO_2eq, ou cerca de 28,2% das emissões associadas à execução da obra.

Os resultados indicam que o uso de geogrelhas rígidas multidirecionais no reforço de vias não pavimentadas pode contribuir simultaneamente para a melhoria do desempenho estrutural dessas infraestruturas e para a redução do impacto ambiental associado à sua construção. Dessa forma, a estabilização mecânica com geossintéticos se apresenta como uma alternativa eficiente para promover soluções mais sustentáveis na execução de acessos viários em operações de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMARCO – Cámara Argentina de la Construcción; INTI – Instituto Nacional de Tecnología Industrial; HINS (2024). *Calculadora de Huella de Carbono en Obras*. Buenos Aires, Argentina.

Giroud, J. P. and Han, J. (2004). Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads". Part I. Development of Design Method. Technical Paper ASCE.

Giroud, J. P. and Han, J. (2004). Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads". Part II. Development of Design Method. Technical Paper ASCE.

Lima, G. D. Et al. (2025). Geogrelha Rígida Multidirecional Aplicada em Acesso Viário de Mina: Desempenho Estrutural sob Tráfego Pesado. Geotecnia aplicada a Mineração, Geomin, Ouro Preto, Brasil.

Mary Adolf, P.E. (2010). Pavement - Transportation Computer Assisted Structural Engineering - PCASE2.09. User Manual. US Army Corps of Engineers.

Oliveira, E. P. V. et. Al. (2024). Performance analysis of the application of multidirectional rigid geogrids for haul road truck access. 5th Pan American Conference on Geosynthetics, GEOAMERICAS, Toronto, Brazil.

Stucki1 M., Büsser1 S., Itten1 R., Frischknecht1 R., Wallbaum H. (2011) Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional Construction Materials, European Association for Geosynthetics Manufacturers, EAGM Steering Group, 1-106, Uster, Germany.

Touze N. (2022) The role of geosynthetics in sustainable development and the circular economy, 32 Convegno Nazionale Geosintetici, 1-17, Bologna, Italy.

Yoshida, M. C.et. al. (2020). Base reinforcement for haul roads through the addition of polyethylene multidirectional rigid geogrids, for a mine in Minas Gerais, Brazil. 4th Pan American Conference on Geosynthetics, GEOAMERICAS, Rio de Janeiro, Brazil.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/52

Uso de geossintéticos para reforço de galeria sob pilha de estéril: análise técnica, econômica e ambiental

Bruna Todescan
Engenheira Civil, TDM Geossintéticos Brasil, Jaguariúna, Brasil, btodescan@tdmbrasil.com.br

Renilson Sousa Costa
Coordenador de Geotecnia, GEOCOBA, Rio de Janeiro, rsc@geocoba.com

Patricia Martins Lopes
Engenheira Geotécnica Sênior, GEOCOBA, Rio de Janeiro, pml@geocoba.com

Luiz Antonio Maranhão Pereira
Gerente de Produto, ARMCO STACO S.A., Rio Janeiro, Brasil, lamp@armcostaco.com

RESUMO: Sistemas de drenagem são fundamentais para a estabilidade e a segurança operacional de estruturas de disposição em mineração, garantindo o escoamento adequado das águas e prevenindo processos de erosão, saturação e perda de desempenho geotécnico. Quando drenagens naturais são interceptadas pelo avanço de pilhas, torna-se necessária a implantação de galerias enterradas capazes de suportar elevados carregamentos verticais, frequentemente em condições logísticas desafiadoras. Tradicionalmente executadas em concreto armado, essas estruturas podem ser substituídas por soluções flexíveis. Avaliou-se um caso real de galeria com aproximadamente 680 m de extensão, submetida a tensões da ordem de 1.500 kPa, comparando-se a solução convencional a uma alternativa composta por tubo metálico corrugado reforçado com geogrelhas e geocélulas. A análise considerou custos diretos de materiais e transporte, além das emissões de CO_2 associadas à implantação. Observou-se redução de cerca de 11,6% nos custos diretos e diminuição aproximada de 44% nas emissões, principalmente pelo aproveitamento de solo local e menor dependência de insumos industrializados.

PALAVRAS-CHAVE: galeria de drenagem, pilha, tubo metálico, geossintéticos, geocélulas.

ABSTRACT: Drainage systems are essential to the stability and operational safety of disposal structures in mining, ensuring proper water conveyance and preventing erosion, saturation, and loss of geotechnical performance. When natural drainages are intercepted by the advance of waste dumps, the installation of buried galleries capable of withstanding high vertical loads becomes necessary, often under challenging logistical conditions. Traditionally constructed in reinforced concrete, these structures may be replaced by flexible solutions. A real case study involving a gallery approximately 680 m long, subjected to stresses on the order of 1,500 kPa, was evaluated by comparing the conventional solution with an alternative composed of a corrugated steel pipe reinforced with geogrids and geocells. The analysis considered direct material and transportation costs, as well as the CO_2 emissions associated with installation. Results showed a reduction of about 11.6% in direct costs and an approximate 44% decrease in emissions, mainly due to the use of locally available soil and reduced dependence on industrialized materials.

KEYWORDS: drainage gallery, waste dump, corrugated steel pipe, geosynthetics, geocells.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de drenagem constituem elementos fundamentais na infraestrutura de empreendimentos de mineração, sendo responsáveis por garantir o escoamento adequado das águas superficiais e subterrâneas, preservar a estabilidade geotécnica das estruturas de disposição e garantir condições operacionais seguras ao longo da vida útil das instalações. Em áreas destinadas à formação de pilhas de estéril, a necessidade de transposição de drenagens naturais, interceptadas pelo avanço da disposição de material, impõe desafios

adicionais de projeto, uma vez que essas estruturas passam a ser submetidas a elevadas cargas verticais e condições construtivas frequentemente associadas a locais remotos e de difícil acesso.

Tradicionalmente, soluções baseadas em galerias moldadas em concreto armado têm sido empregadas nesses contextos, devido à sua robustez estrutural e ao comportamento consolidado frente a solicitações elevadas. Entretanto, a execução dessas estruturas demanda o fornecimento contínuo de grandes volumes de concreto, aço e materiais auxiliares, além de mão de obra especializada e significativa mobilização logística. Em empreendimentos de mineração, especialmente em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, essas características podem resultar em elevados custos de implantação, aumento dos prazos executivos e maior impacto ambiental associado ao transporte e à produção dos insumos empregados.

Nesse cenário, cresce o interesse por soluções estruturais capazes de conciliar desempenho técnico, otimização construtiva e sustentabilidade. A utilização de tubos metálicos corrugados, associados a sistemas de reforço com geogrelhas e geocélulas, permite mobilizar materiais disponíveis na própria mina como parte integrante do sistema estrutural, promovendo redistribuição de tensões, confinamento do aterro e redução da dependência de materiais externos. Além disso, essa abordagem apresenta potencial para simplificar os processos construtivos, reduzir demandas logísticas e minimizar impactos ambientais associados à implantação das obras.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma avaliação comparativa entre uma solução convencional em concreto armado e uma alternativa composta por tubo metálico corrugado, associado ao uso de geogrelhas e geocélula, no maciço de envolvimento da estrutura, desenvolvida para um projeto de galeria de drenagem sob pilha de estéril em mina a céu aberto localizada na região norte do Brasil. A comparação considera aspectos técnicos de concepção, econômicos e ambientais das soluções propostas, buscando avaliar o potencial da utilização de geossintéticos como alternativa para obras de infraestrutura mineira submetidas a elevados carregamentos.

2 O PROJETO

O estudo foi desenvolvido a partir de um caso real de implantação de sistema de drenagem sob pilha de estéril em empreendimento de mineração a céu aberto, localizado na região norte do Brasil. A obra tem como objetivo garantir a continuidade do escoamento hidráulico de uma drenagem natural interceptada pela pilha. Além disso, estabeleceu-se como requisito de projeto que a galeria possibilitasse acesso interno para inspeção e eventuais intervenções de manutenção, em atendimento aos critérios de segurança operacional da mina.

As soluções avaliadas demandaram o estudo de uma galeria enterrada, com aproximadamente 680 metros de extensão linear, implantada sob a pilha onde, ao longo de sua vida útil, a estrutura será submetida a carregamentos verticais elevados, decorrentes da disposição de material estéril, atingindo tensões da ordem de 1.500 kPa.

Desta forma, foram estudadas duas abordagens, sendo elas:

- CA – Galeria em Concreto armado, representando a solução convencional;
- TG – Tubo metálico corrugado envolvido com reforço com geossintéticos (geogrelhas e geocélulas de PEAD).

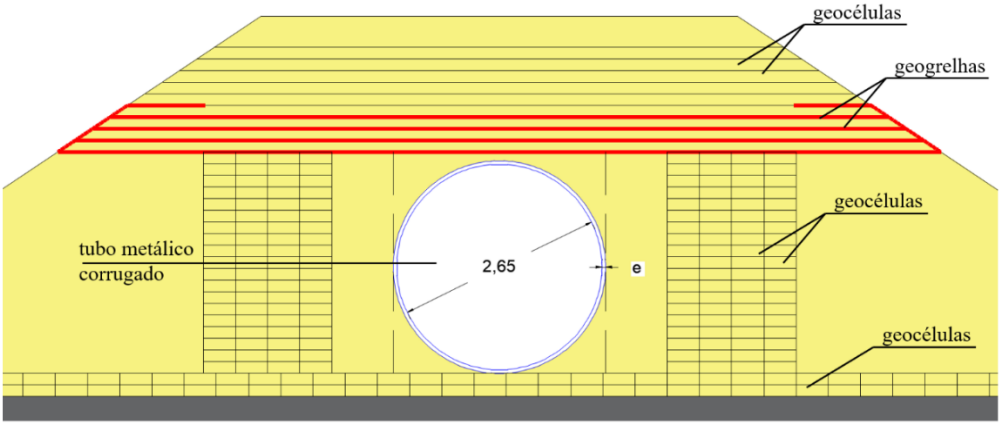
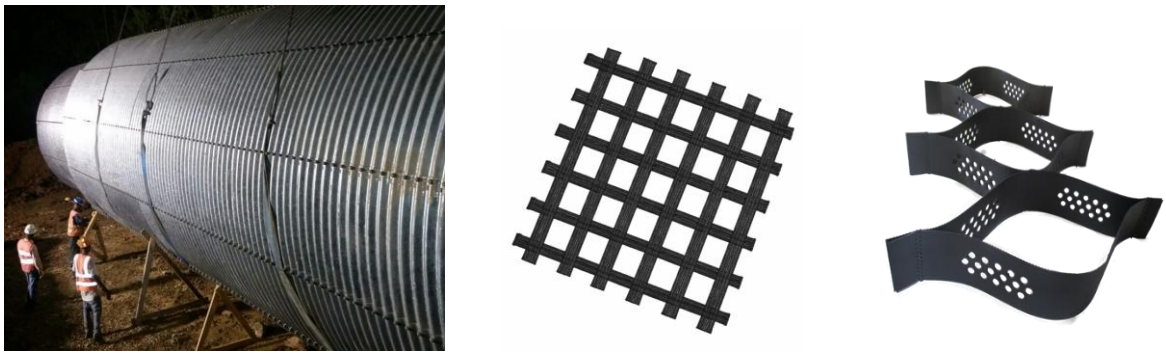


Figura 1. Seção típica – Solução em tubo metálico com reforço em geossintéticos (TG).

2.1 Materiais Empregados na Solução proposta

A solução proposta é composta pela associação entre um tubo metálico corrugado e sistemas de reforço do maciço com geogrelhas e geocélulas de PEAD, materiais que atuam de forma complementar no desempenho estrutural do conjunto. A Figura 2 apresenta os principais materiais empregados na solução proposta.



(a) (b) (c)

Figura 2. Materiais empregados: (a) tubo metálico corrugado, (b) geogrelha e (c) geocélula.

Os tubos metálicos corrugados são estruturas formadas por chapas de aço perfiladas e parafusadas, constituindo anéis estruturais contínuos capazes de conduzir o fluxo hidráulico e suportar solicitações.

As geogrelhas são geossintéticos poliméricos constituídos por uma estrutura em malha aberta, projetados para promover a interação mecânica com o material (solo) adjacente. No sistema estudado, são dispostas em camadas sucessivas no aterro de envolvimento do tubo, contribuindo para a redistribuição das tensões e para o aumento da estabilidade do conjunto.

As geocélulas de PEAD são estruturas tridimensionais de confinamento celular, formadas por faixas poliméricas interligadas por soldas ultrassônicas. Quando preenchidas com solo ou material granular, promovem o aumento do intertravamento entre partículas, da resistência ao cisalhamento e da rigidez do maciço. Na solução proposta, são empregadas como elemento de confinamento do solo de envolvimento do tubo metálico, contribuindo para o desempenho mecânico do sistema.

3 COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES

Tomando-se como base o projeto estudado, foram realizadas análises para comparação da efetividade e as vantagens do uso de tubo metálico corrugado, combinado à geossintéticos, como estrutura de drenagem sob pilha.

Para a solução convencional em concreto armado (CA), foram considerados itens usuais de execução de galeria moldada *in loco*, incluindo fôrmas, aço para armação e fornecimento de concreto usinado de 30 MPa, obtido em central localizada a 60 km da obra.

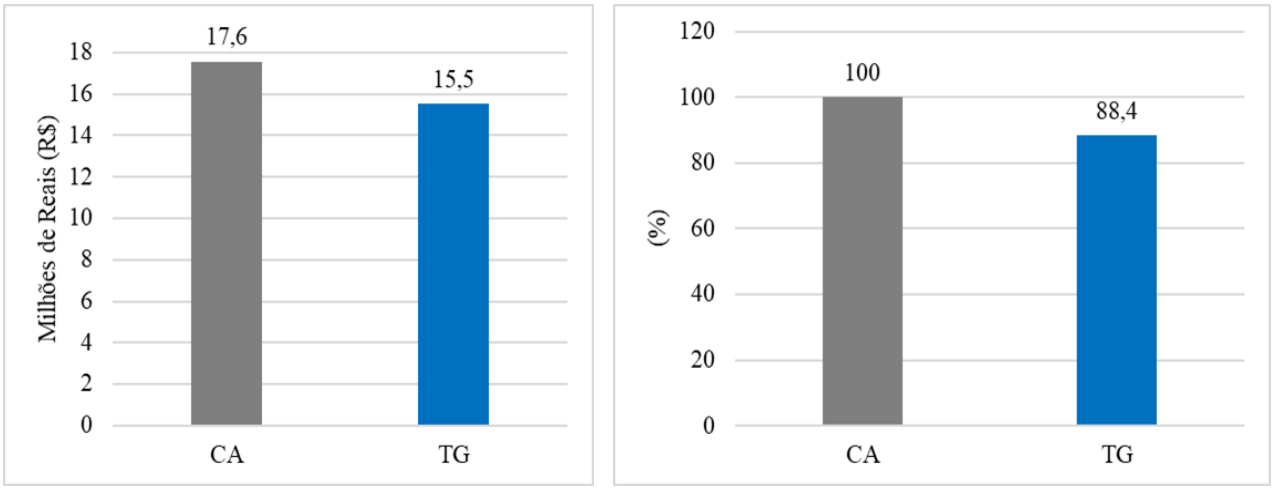
Para a solução em tubo metálico com reforço em geossintéticos (TG), foi considerada tubulação metálica corrugada com diâmetro de 2,65 metros, com variação de espessura de parede em função da variação da sobrecarga exercida pela pilha ao longo da linha de drenagem, associada à utilização de geogrelhas com resistência de 1.000 e 1.600 kN/m, bem como geocélulas de PEAD de abertura máxima de 416 x 374 mm e altura de 150 mm. O material de aterro empregado entre as camadas de reforço e preenchimento das geocélulas correspondeu a um solo disponível na própria mina, previamente caracterizado para uso geotécnico.

Além disso, ressalta-se que todos os elementos adotados foram previamente dimensionados para atender às solicitações estruturais e hidráulicas previstas para o projeto, garantindo condições equivalentes de desempenho entre as soluções avaliadas.

3.1 Avaliação de Custo

Os custos analisados referem-se exclusivamente ao fornecimento e transporte dos materiais considerados em cada solução, não sendo incluídas, nesta etapa, despesas relativas à mão de obra, equipamentos ou encargos executivos.

Com base nessas premissas, verificou-se que a solução TG apresentou economia aproximada de R$ 2,1 milhões em custos diretos de materiais quando comparada à solução convencional, conforme apresentado na Figura 3, demonstrando uma redução de 11,6% do orçamento de material.



(a) (b)

Figura 3. Estimativa de custo de galeria em concreto armado (CA) *versus* tubo metálico corrugado com reforço em geogrelhas e geocélulas (TG): (a) em reais (b) em porcentagem.

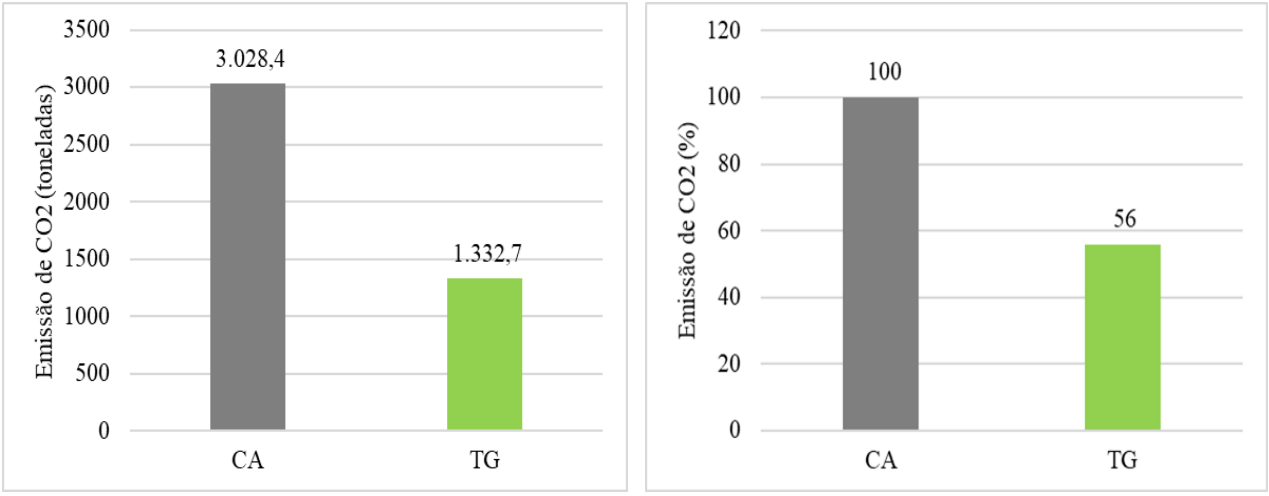
Ressalta-se que a avaliação econômica apresentada neste trabalho considera exclusivamente os custos diretos de fornecimento e transporte dos materiais. Entretanto, estudos prévios indicam que soluções que empregam geossintéticos tendem a apresentar ganhos adicionais quando analisadas sob a ótica executiva, incluindo aspectos de instalação e prazos construtivos. Segundo Caressato Junior (2025), sistemas com geossintéticos podem proporcionar reduções de custo de até 66% quando comparados a estruturas convencionais em concreto armado. De forma complementar, Andrade (2024) demonstra que obras executadas com geossintéticos podem alcançar produtividades significativamente superiores, chegando a ser até 15 vezes mais rápidas que soluções equivalentes em concreto moldado *in loco*.

3.2 Avaliação de Impacto Ambiental

Constatadas as vantagens técnicas e econômicas do uso de tubo metálico corrugado combinado a geossintéticos, se faz importante analisar de forma aprofundada as vantagens ambientais dessa solução, uma vez que também favorece a sustentabilidade em projetos de mineração.

A Figura 4 evidencia que, a adoção da solução TG representa uma diminuição de cerca de 44% nas emissões de gases de efeito estufa. Essa redução está diretamente relacionada à menor dependência de materiais industrializados de alta intensidade energética, como cimento e aço estrutural, cuja produção é reconhecidamente uma das principais fontes de emissões no setor da construção pesada.

Além disso, a utilização predominante de material granular disponível na própria área da mina reduziu significativamente a necessidade de transporte de insumos externos, contribuindo para a diminuição das emissões associadas à logística de obra.



(a) (b)

Figura 4. Estimativa de emissão de carbono para execução de galeria em concreto armado (CA) *versus* tubo metálico corrugado com reforço em geogrelhas e geocélulas (TG): (a) em toneladas (b) em porcentagem.

4 CONCLUSÕES

A análise comparativa desenvolvida demonstrou que a solução composta por tubo metálico corrugado associado a reforço com geogrelhas e geocélulas atende aos requisitos técnicos de desempenho estrutural e hidráulico exigidos para implantação de galeria sob pilha de estéril, configurando-se como alternativa viável à solução convencional em concreto armado.

Do ponto de vista econômico, mesmo considerando apenas custos diretos de materiais e transporte, observou-se redução de aproximadamente 11,6%, indicando potencial adicional de economia quando incorporados aspectos executivos, como produtividade e prazos construtivos, conforme evidenciado por estudos da literatura.

Sob o aspecto ambiental, a solução alternativa apresentou redução expressiva nas emissões de CO_2, da ordem de 44%, principalmente em função da menor utilização de insumos industrializados de alta intensidade energética e do aproveitamento de material local no maciço estrutural.

Esses resultados evidenciam o papel dos sistemas reforçados com geossintéticos como soluções alinhadas aos princípios de sustentabilidade, racionalização construtiva e eficiência operacional em obras de infraestrutura mineira submetidas a elevados carregamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, L.T., Todescan, B., Caressato Junior, W. (2024) *The Use of HDPE Geocells for Drainage Channel Coating to Replace Reinforced Concrete Structures*. In: Pan-American Conference on Geosynthetics – GeoAmericas, Toronto, Canada.

CAMARCO – Cámara Argentina de la Construcción; INTI – Instituto Nacional de Tecnología Industrial; HINS (2024). *Calculadora de Huella de Carbono en Obras*. Buenos Aires, Argentina.

Caressato Junior, W., Fierro, G. (2025) *Cost, Time and Environmental Benefits of Channel Lining with Geocells*. In: Proceedings of the 41st IAHR World Congress, Singapore.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023). *SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obras*. Disponível em: https://www.dnit.gov.br. Acesso em: outubro/2025.

Geosynthetic Institute – GRI (2016) *GRI GS15: Test Methods, Test Properties and Frequency for Geocells Made from High Density Polyethylene (HDPE) Strips*. Folsom, PA, USA.

Koerner, R.M. (2005) *Designing with Geosynthetics*, 5th ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.

SEDOP – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Obras Públicas do Pará (2024). *Tabelas de Composições de Custos Unitários*. Governo do Estado do Pará, Belém, Brasil.

Vertematti, J.C. (2015) *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, 2ª ed., Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT), São Paulo, Brasil.

COBRAMSEG 2026

ANAIS DO

XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Eixo Temático:

Geotecnia Ambiental

ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Centro-Oeste
Núcleo Regional

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/53

Agregados Reciclados e Pneus Inservíveis em Muros de Contenção Provisórios: Monitoramento de um Modelo Físico

Eric J .G. Markus
Engenheiro Civil, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, eric.markus@maua.br

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Rafael R. Plácido
Professor Doutor, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, rafael.plácido@imt.br

Mariana B. Juarez
Professora Doutora, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, mariana.juarez@imt.br

RESUMO: A geração progressiva de Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) demanda soluções sustentáveis que possam viabilizar, por exemplo, o uso de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) que atendam tanto à redução de impactos ambientais quanto o desempenho técnico. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar o comportamento de um protótipo de muro de contenção provisório construído com RCD-R e pneus inservíveis. Para tanto, um modelo físico em escala reduzida foi construído em cinco camadas compactadas manualmente e submetido a carregamentos progressivos até atingir 20kPa. Os deslocamentos da face foram medidos através de marcos de referência dispostos em seu entorno, sendo estes monitorados durante o período construtivo e após término do carregamento. Após a execução do muro, o monitoramento dos deslocamentos continuou durante 60 dias com intuito de avaliar seu desempenho frente as condições climáticas locais. Os resultados demonstraram que, durante todo o período de monitoramento (construtivo, após o carregamento e sob condição climática local) não ocorreram deslocamentos significativos ou quaisquer instabilidades no faceamento do muro. Essa estabilidade evidencia a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados e pneus inservíveis como solução provisória de contenção em aterro e reforça o potencial deste conjunto como solução sustentável para a engenharia geotécnica, contribuindo para a mitigação do descarte inadequado e para o avanço de práticas alinhadas à economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Contenção, Muro de Arrimo, Agregado Reciclado, Pneu Inservível.

ABSTRACT: The progressive generation of Construction and Demolition Waste (CDW) requires sustainable solutions capable of enabling, for instance, the use of Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW) that meet both environmental impact reduction and technical performance requirements. In this context, the present study aims to evaluate the behavior of temporary retaining wall constructed using RCDW and waste tires. To this end, a prototype was built in five manually compacted layers and subjected to progressive loading up to 20 kPa. The displacements of the wall face were measured using reference markers installed around the structure, which were monitored during construction and after loading. The face displacements were monitored until 60 days after the end of construction to assess performance under local climatic conditions. The results demonstrated that, throughout the entire monitoring period (during construction, after loading, and under local environmental conditions), no significant displacements or instabilities were observed in the wall facing. This stability demonstrates the technical feasibility of using recycled aggregates and waste tires as a temporary containment solution in embankments and reinforces the potential of this system as a sustainable solution for geotechnical engineering, contributing to the mitigation of improper waste disposal and to the advancement of practices aligned with the circular economy.

KEYWORDS: Monitoring, Retaining Wall, Gravity Walls, Recycled Aggregate, Waste Tire.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos representa um dos grandes desafios globais, especialmente no Brasil, onde a geração de resíduos vem crescendo de forma constante nos últimos anos (ABRELPE, 2022). Esse cenário evidencia a necessidade de soluções técnicas que conciliem desempenho estrutural e sustentabilidade ambiental.

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) são compostos, maioritariamente, por materiais minerais inertes como concreto, argamassa, tijolos e cerâmica (CONAMA, 2009). Embora possuam grande potencial de reutilização, sua composição heterogênea dificulta a reutilização eficiente desses materiais (Silveira; Ferreira, 2021), tornando necessária a adoção de outras estratégias de gestão, como a reciclagem. De forma semelhante, os pneus inservíveis representam um resíduo de difícil destinação, devido à sua durabilidade e não biodegradabilidade, sendo frequentemente associados a impactos ambientais e riscos à saúde pública quando descartados de forma inadequada (Lagarinhos et al., 2008).

Nesse contexto, a economia circular surge como um modelo capaz de integrar estratégias de reciclagem e reutilização, promovendo a redução do consumo de recursos naturais e a mitigação de impactos ambientais. A engenharia geotécnica apresenta-se como um campo promissor para a aplicação desses materiais alternativos, especialmente em obras de contenção, como muros de arrimo.

Muros de arrimo (ou de gravidade) são estruturas de contenção projetadas para estabilizar solos em declives por meio de seu peso próprio, prevenindo deslizamentos e garantindo a estabilidade do solo em diversas construções e infraestruturas (Gerscovich, 2010). Tais estruturas são, tipicamente, construídas com alvenarias de pedras, concreto armado ou gabiões. Recentemente, observa-se uma tendência crescente na literatura que visa diminuir o impacto ambiental dessas estruturas por meio da utilização de resíduos provenientes de outras indústrias (Arefnia; Dehghanbanadaki; Kassim, 2021; Pons et al., 2018), como o muro de contenção construído com pneus inservíveis no município de Itapira-SP (Figura 1).

Para avaliar a performance desses muros de gravidade, a norma NBR 11682 (ABNT, 2009) sugere a consideração do monitoramento geotécnico. Por meio de uma instrumentação com distintos tipos de equipamentos, é possível acompanhar os deslocamentos de uma estrutura geotécnica ao longo do tempo em diferentes condições de carregamento e do solo, utilizando os resultados como uma validação do comportamento da estrutura.

Este estudo se fundamenta no contexto das estratégias de reuso (pneus inservíveis) e reciclagem (RCD-R) explorando seu potencial como novas fontes de matéria-prima a serem reinseridas na construção civil. Portanto, o objetivo deste artigo é monitorar os deslocamentos de face de um protótipo de muro de contenção provisório submetido a carregamento estático e condições ambientais locais.



Figura 1. Muro de contenção construído com pneus inservíveis em Itapira-SP.
(Fonte: Prefeitura Municipal de Itapira, 2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados dois materiais distintos: pneus inservíveis e resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Um total de 32 pneus inservíveis de veículos leves (exceto motocicletas), destinados para a coleta e descarte pela prefeitura de SP, foram fornecidos por uma borracharia da região metropolitana de São Paulo – SP. Os pneus possuem largura em torno de 200 mm e diâmetro externo de 680 mm, com um peso unitário de, aproximadamente, 7 kg. Como material de preenchimento do modelo, foi utilizado um agregado reciclado fornecido pela usina de reciclagem Urbem Tecnologia Ambiental, localizada no município de São Bernardo do Campo – SP. Segundo informações do fornecedor, os agregados são reciclados por meio de um único processo de britagem (britador de mandíbula) e posteriormente separados por peneirador mecânico.

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização da areia reciclada

Antes da execução do protótipo, foi realizada a caracterização completa da areia reciclada. Os seguintes ensaios foram realizados em uma amostra coletada do material fornecido: massa específica (NBR 6458; ABNT, 2025), granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 17504; ABNT, 2018), limites de plasticidade (NBR 6459; ABNT, 2016a) e liquidez (NBR 7180; ABNT, 2016b), compactação proctor com energia normal (NBR 7182; ABNT, 2016c) e cisalhamento direto com moldagem dos corpos de prova em umidade natural (6,8%) e ensaios realziados sob condição inundada e não inundada (ASTM D3080; 2023).

2.2.2 Construção do protótipo

A implantação do modelo foi feita a frente de um talude no campus São Caetano do Sul do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). O preparo do terreno envolveu o posicionamento de tábuas de madeira acima da canaleta na base do talude, de modo a manter sua funcionalidade no sistema de drenagem da região. A face do talude foi coberta com lona plástica (Figura 2) para: i) viabilizar o lançamento da areia reciclada por deslizamento para alteamento do muro e ii) evitar que a areia reciclada fosse “contaminada” pelo material da superfície do talude (solo e serrapilheira).



Figura 2. Lona plástica sobre talude e instalação dos marcos referências para o plano de monitoramento.

A execução do muro envolveu a construção em camadas sucessivas, onde cada uma foi composta pelo posicionamento dos pneus, preenchimento desses com agregado reciclado em umidade natural (conforme recebida), compactação manual (com soquete de concreto) e disposição de geotêxtil não-tecido entre as camadas (somente na área de projeção dos pneus; da face) – com o objetivo de melhorar a distribuição de tensões e minimizar a perda de partículas finas. Em seguida, a areia reciclada foi transportada para a crista do talude e laçada sobre a lona para preencher o protótipo. Adotou-se o mesmo método de compactação usado para a areia reciclada que preencheu os pneus. Após o término da primeira camada, o processo foi repetido até que o muro atingisse a 5ª camada, resultando em uma altura aproximada de um metro. Cabe destacar que em cada camada foi posicionado um corpo de prova cilíndrico (5x10 cm) para a análise do grau de compactação atingido pelo processo construtivo adotado.

2.2.3 Carregamento do protótipo

Após a conclusão da construção, o modelo foi submetido a carregamento utilizando duas caixas d'água e três recipientes de plástico. O recipiente de plástico foi utilizado para calibrar o peso de areia reciclada inserido tanto na caixa d'água quanto no mesmo. Considerando o controle das massas inseridas nos recipientes (1.000 kg), e a área de projeção da caixa d'água (0,442m²), determinou-se a tensão de carregamento em que o protótipo foi submetido: 22,2 kPa. A Figura 3 apresenta o protótipo construído e carregado.



Figura 3. Modelo físico sobre carregamento.

2.2.4 Monitoramento dos deslocamentos da face

O monitoramento do muro consistiu na aferição da distância entre marcos de referência e pontos específicos na face do muro (pneus) utilizando-se uma trena metálica. A precisão das medidas foi de 0,5 mm. Foram adotados como marcos de referência indeslocáveis tubos de PVC (diâmetro nominal de 1"), cravados em frente a face do muro (Figura 4). Após conclusão de cada camada do muro, foram demarcados pontos nos marcos de referência com altura correspondente a metade da altura dos pneus de cada camada e a distância entre os pontos de referência no marco referencial e nos pneus foram medidas (Figura 5). Assim o monitoramento dos deslocamentos da face foi realizado durante i) a fase construtiva (alteamento de cada camada), ii) a aplicação do carregamento e iii) ao longo de sessenta dias após o carregamento total do protótipo.

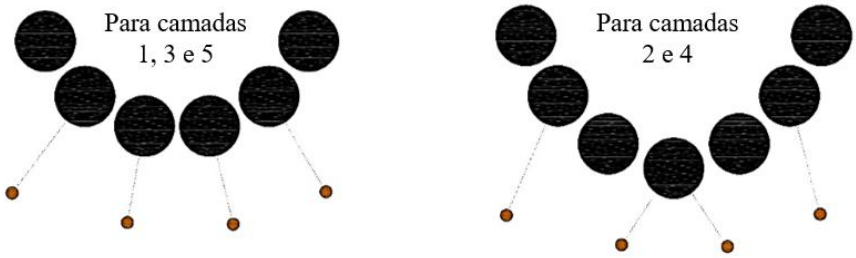
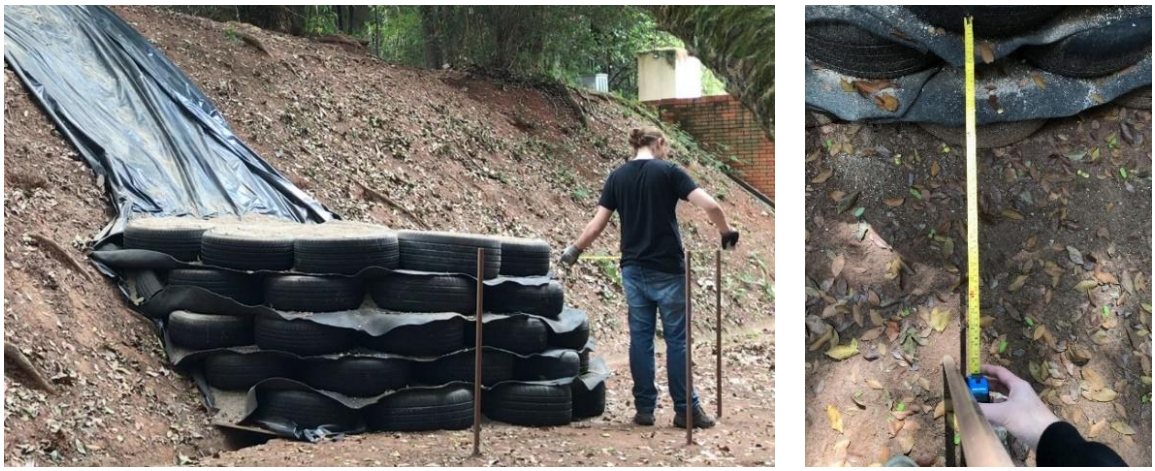


Figura 4. Desenho esquemático dos pontos instalados no faceamento para a medida dos deslocamentos.



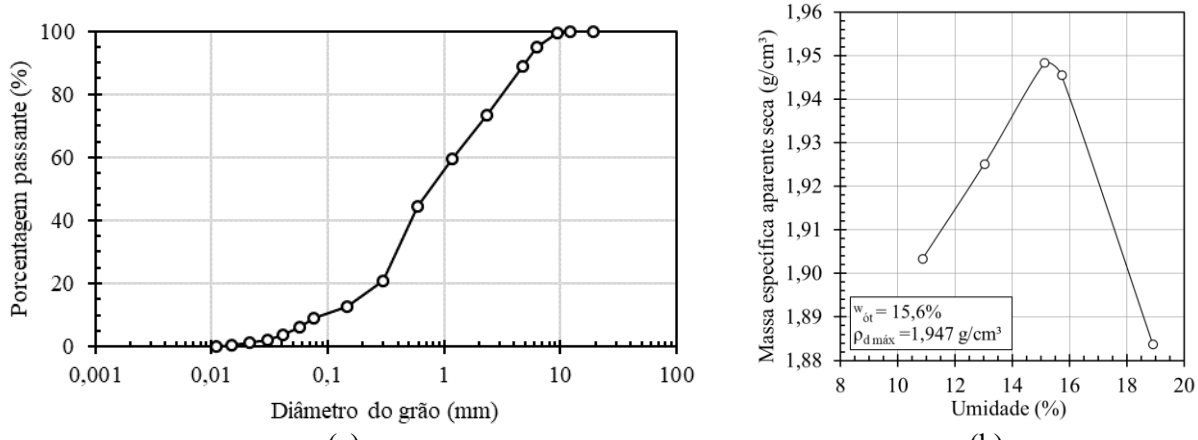
(a) (b)

Figura 5. Determinação das distâncias entre os pontos do marco de referência e da face (pneus).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do Agregado Reciclado

O perfil granulométrico (Figura 6a) do material obteve um coeficiente de uniformidade de 15,7 e coeficiente de curvatura de 2,6. De acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS) estabelecido pela ASTM D2487-17 (ASTM, 2017), o agregado reciclado foi caracterizado como uma areia siltosa (SM).

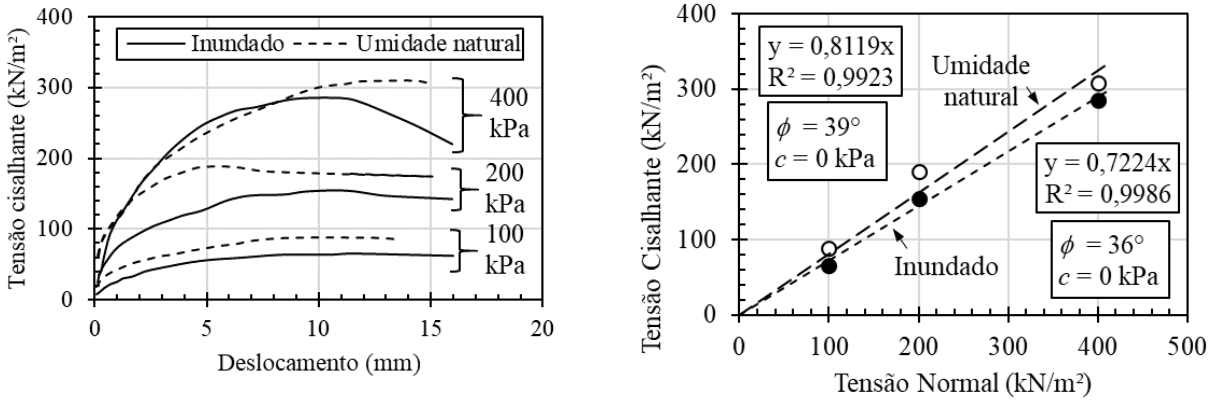


(a) (b)

Figura 6. Curvas (a) granulométrica e (b) de compactação.

O material obteve um valor para massa específica das partículas de 2,64 g/cm³, um valor próximo a agregados naturais (entre 2,5 e 2,75 g/cm³). A partir do ensaio de compactação (Figura 6b), o agregado reciclado obteve um valor de peso específico seco máximo de 1,947 g/cm³ e umidade ótima igual a 15,6%. Por se tratar de uma areia reciclada, o material comprovou ser não plástico, apesar de possuir cerca de 15% de material argiloso (grãos com dimensões inferiores a 0,02mm).

Os resultados exibidos na Figura 7 indicaram coesão nula independente da condição (inundado ou não inundado), comportamento compatível com agregados naturais arenosos. O ensaio na umidade natural obteve ângulo de atrito (ϕ) de 39º enquanto na condição inundada este parâmetro apresentou valor de 36º. Nota-se que os valores de tensão cisalhante obtidos nas condições de umidade natural foram superiores àqueles na condição inundada, independentemente do nível de tensão normal aplicada. Tal comportamento é esperado, pois a condição de inundação do ensaio aumenta a saturação e, consequentemente a poropressão. Assim, a interação entre as partículas diminui e o atrito intergranular é reduzido, resultando na redução da resistência ao cisalhamento do material.



(a) (b)

Figura 7. Resultados do ensaio de cisalhamento direto: curvas tensão-deformação e (b) envoltória de ruptura.

3.2. Monitoramento de face do protótipo construído

O período de monitoramento do modelo físico teve início durante a etapa de construção, em 19 de agosto de 2025, estendendo-se até a última medição da distância entre o faceamento e os marcos referenciais, realizada em 3 de novembro de 2025. Durante o período de monitoramento pós carregamento, recorreu-se à Estação Automática de Monitoramento de Ipiranga-SP (V0702) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para identificar as temperaturas máximas e mínimas, umidade média e precipitação. O referido ponto de monitoramento dista 1,82km do IMT. A Figura 8 apresenta essas informações ao longo do período de análise (sessenta dias).

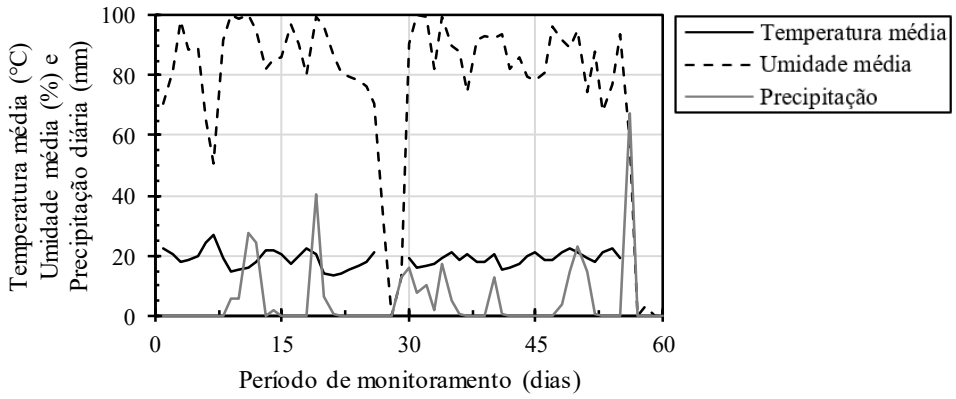


Figura 8. Temperatura média, umidade média e precipitação diária durante o período de monitoramento dos deslocamentos da face do muro após carregamento.

Ao final do período de monitormaento, foi removido da última camada executado o corpo de prova para a avaliação do grau de compactação atingido pela construção do modelo, que resultou em uma densidade de compactação de 1,44 g/cm³ e grau de compactação de 74%. Ressalta-se que este é um baixo grau de compactação comparado aos comumente adotados em aterros (GC ≥ 95%). Contudo, o menor grau de compactação atingido culmina em menor rigidez do protótipo o que favoreceria a maior deformabilidade do mesmo. Assim, apesar do carregamento de, aproximadamente, 20 kPa e das variações ambientais registadas (Figura 8), as medições efetuadas ao longo do período apresentaram valores idênticos àqueles obtidos nas leituras iniciais, evidenciando deslocamento praticamente nulo do faceamento – em verdade inferior aa margem de erro utilziada na medição (0,5mm). Ademais, a ausência de quaisquer indícios de instabilidade local ou global no muro reforça a conclusão quanto à estabilidade do sistema construído.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de um protótipo de pequeno porte, o desempenho de um muro de contenção provisório composto por agregado reciclado e faceamento de pneus inservíveis. Os resultados levaram as seguintes conclusões:

- A caracterização física do agregado reciclado usado como material de preenchimento do aterro demonstrou uma natureza predominantemente arenosa, obtendo uma classificação de areia siltosa, caráter não plástico, comportamento não coesivo e ângulo de atrito entre 36° e 39°; e

- Ao longo do período de monitoramento de 76 dias, o modelo apresentou comportamento estável, sem deslocamentos significativos no faceamento, o que indica a viabilidade do o agregado reciclado e pneus inservíveis em muros de contenção provisórios.

A pesquisa foi desenvolvida no contexto da busca por soluções sustentáveis que conciliem desempenho técnico e reaproveitamento de resíduos sólidos, especialmente os de construção e demolição (RCDs) e os pneus descartados. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a viabilidade técnica da solução composta por agregados reciclados e pneus inservíveis, reforçando seu potencial como alternativa sustentável para obras geotécnicas temporárias ou definitivas para obras de pequeno porte.

Para aprimorar a avaliação dessa solução, recomenda-se a realização de estudos complementares, tais como a aplicação de carregamentos maiores até a ruptura do modelo, ou o aumento da altura do modelo, de modo a reduzir seu fator de segurança e submeter a estrutura a empuxos mais representativos de condições reais de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2025). NBR 6458. *Solos — Determinação de massa específica.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016a). NBR 6459. *Solos — Determinação do limite de liquidez.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016b). NBR 7180. *Solos — Determinação do limite de plasticidade.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016c). NBR 7182. *Solo — Ensaio de compactação.*
Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018). NBR 17054. *Solo — Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.*
ASTM International (2023). ASTM D3080/D3080M: *Direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*
ASTM International (2017). ASTM D2487-17:2017: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes – Unified Soil Classification System.*
ABRELPE (2022) *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022*. Disponível em: <https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_Abrelpe_2022.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2025.
CONAMA (2009). *Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente.

FLEURY, Mateus P. et al (2024). *Durability of geosynthetics in reinforced structures using recycled construction and demolition waste as backfill material: in-isolation and successive effects*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPIRA. *Uso de pneus velhos em recuperação de encosta reduz impacto ambiental.* Itapira, 2016. Disponível em: https://itapira.sp.gov.br/noticia/uso-de-pneus-velhos-em-recuperacao-de-encosta-reduzem-impacto-ambiental/6112. Acesso em: 4 maio 2025.

Lagarinhos F., Tenório S. (2008). *Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 2, p. 106–118. DOI: 10.1590/S0104-14282008000200007.

Silveira, A., Ferreira L. (2021). *Economia circular no setor da construção civil*. Revista Prociências, v. 2, n. 1, p. 91–103. DOI: 10.15210/rp.v2i1.20368.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/54

Álcali-ativação de rejeito de fluorita e cinza volante pelo método "*One-Part*" para imobilização de metais na pavimentação

Tiago Luiz Costa da Silva
Mestrando, UFSC, Florianópolis, Brasil, tiagoluizcosta@mpf.mp.br

Helena Paula Nierwinski
Professora, UFSC, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Andres Maurício Lotero Caicedo
Professor, UIS, Bucaramanga, Colombia, amolotcai@uis.edu.co

Fernando Pinheiro Weber
Mestrando, UFSC, Porto Alegre, Brasil, fernandopw@vibraenergia.com.br

Nilo Cesar Consoli
Professor, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: O reuso de rejeitos representa uma estratégia relevante para o setor mineral, ao mesmo tempo em que a busca por materiais alternativos constitui uma demanda constante na engenharia de pavimentos. Nesse contexto, este estudo avalia a estabilização de rejeito de fluorita misturado a cinza volante para aplicação potencial em camadas de pavimentação por meio da técnica de álcali-ativação. Para essa finalidade, os materiais foram previamente caracterizados e utilizada uma dosagem contendo 40% de cinza volante ativada pelo método *One-Part*, adotando-se uma relação Na/Si de 2,5 e períodos de cura de 7 e 28 dias. O desempenho mecânico foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão simples não confinada (RCS), comparando-se os resultados com os requisitos da NBR 12253, além da realização de ensaios de lixiviação para avaliação ambiental do material. Os resultados indicam que a mistura apresenta desempenho mecânico satisfatório, com valores de RCS aproximadamente 10 vezes superiores ao mínimo estabelecido pela norma. Entretanto, os ensaios de lixiviação evidenciaram aumento na liberação de metais em comparação ao rejeito original, indicando um potencial limitante para sua aplicação sem tratamentos adicionais. Assim, embora a técnica demonstre potencial para melhoria das propriedades mecânicas do material, aspectos ambientais associados à lixiviação devem ser considerados em avaliações futuras de viabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de fluorita, Álcali-ativação, *One-Part*, Pavimentação, Lixiviação de metais.

ABSTRACT: The reuse of mining tailings represents an important strategy for the mineral sector, while the search for alternative materials remains a key demand in pavement engineering. In this context, this study evaluates the stabilization of fluorite tailings mixed with fly ash for potential application in pavement layers using the alkali activation technique. The materials were initially characterized, and a mixture containing 40% fly ash activated by the One-Part method was prepared, adopting a Na/Si ratio of 2.5 and curing periods of 7 and 28 days. Mechanical performance was evaluated through unconfined compressive strength (UCS) tests, and the results were compared with the requirements of NBR 12253. In addition, leaching tests were conducted to assess the environmental behavior of the material. The results indicate that the mixture presents satisfactory mechanical performance, with UCS values approximately ten times higher than the minimum value required by the standard. However, leaching tests revealed increased metal release compared to the original tailings, indicating a potential environmental limitation for its application without additional treatment. Therefore, although the technique shows potential to improve the mechanical properties of the material, environmental aspects related to metal leaching should be considered in future feasibility assessments.

KEYWORDS: Fluorite tailings, Alkali activation, One-Part method, Pavimentation, Metal leaching.

1 INTRODUÇÃO

A matriz de transporte brasileira tem suas características fortemente alicerçadas no uso do modal rodoviário. No entanto, grande parte da malha viária apresenta condições que demandam melhorias, especialmente na região Sul do Brasil, onde aproximadamente 63,6% das rodovias encontram-se em estado regular ou pior, indicando amplo espaço para avanços no desenvolvimento e na melhoria dos pavimentos. Paralelamente, políticas voltadas à sustentabilidade, como as iniciativas de Produção mais Limpa (P+L) e os princípios ESG, têm impulsionado a busca por novos materiais e tecnologias construtivas, com destaque para o reuso de resíduos e rejeitos provenientes de outros processos industriais (CNT, 2025).

Alinhado a essa perspectiva, na região Sul do país, especialmente nos estados de Santa Catarina e Paraná, dois materiais apresentam potencial de reaproveitamento em função da necessidade de destinação ambientalmente adequada: o rejeito de fluorita e a cinza volante proveniente de usinas termoelétricas.

O rejeito de fluorita de grau ácido corresponde a um subproduto gerado no processo de concentração do fluoreto de cálcio (CaF_2), envolvendo etapas de britagem, separação granulométrica e concentração gravítica em meio denso. Esse material é normalmente depositado em pilhas próximas às cavas de mineração a céu aberto. Devido ao potencial risco ambiental associado à lixiviação de contaminantes, a busca por alternativas de reaproveitamento tem despertado crescente interesse.

De forma associada, as cinzas volantes de termoelétricas são geradas durante o processo de tratamento eletrostático dos gases de combustão, resultando no acúmulo de materiais finos conhecidos como cinza volante leve. Esses materiais são subprodutos da geração de energia elétrica e frequentemente demandam alternativas de reutilização. A cinza volante do tipo F apresenta elevado potencial de aplicação, pois possui características pozolânicas, com teores combinados de Al_2O_3, SiO_2 e Fe_2O_3 superiores a 70%, constituindo assim uma importante fonte de precursores aluminosilicatos (Alterary; Lterary; Marei, 2021).

Quando analisados isoladamente para aplicação em pavimentação, esses materiais apresentam limitações associadas às suas propriedades mecânicas relativamente baixas, reduzindo seu potencial de utilização direta. Nesse contexto, técnicas capazes de melhorar as propriedades desses materiais, especialmente quando utilizados de forma combinada, tornam-se relevantes. Entre essas técnicas destaca-se a álcali-ativação pelo método "*One-Part*".

O processo de álcali-ativação envolve uma sequência de fenômenos físico-químicos, conforme descrito por Fernández-Jiménez e Paolomo (2005). Nesse processo, um ativador alcalino promove a dissolução parcial das estruturas dos precursores aluminosilicatos, resultando na formação de novas fases cimentantes por meio de reações de precipitação e policondensação. Como consequência, ocorre a densificação da matriz e a reorganização estrutural do material, formando um sólido amorfo com elevada resistência mecânica.

Nesse contexto, a destinação de volumes significativos desses materiais para aplicações em pavimentação mostra-se não apenas viável, mas também desejável do ponto de vista ambiental. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a estabilização do rejeito de fluorita misturado à cinza volante para aplicação potencial em camadas de pavimentação, utilizando a técnica de álcali-ativação pelo método *One-Part*, com foco na melhoria das propriedades mecânicas e na análise do comportamento quanto à lixiviação de metais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento da pesquisa, o primeiro passo correspondeu à caracterização do rejeito de fluorita e da cinza volante. Nos ensaios de caracterização física realizou-se a determinação dos limites de consistência, por meio dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) conforme as diretrizes da NBR 6459 (ABNT, 2025a) e do Limite de Plasticidade (LP) segundo a NBR 7180 (ABNT, 2025b). Também foi determinada a massa específica real dos grãos, conforme a NBR 6458 (ABNT, 2025c).

A caracterização química foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), com o objetivo de quantificar as concentrações dos elementos químicos presentes nas amostras, expressas na forma de óxidos.

A caracterização mineralógica foi realizada por meio de Difração de Raios X (DRX), com preparação individual das amostras de rejeito e cinza volante. As análises foram conduzidas no equipamento LabX XRD-

6100 da Shimadzu, com interpretação inicial no software *Match3*, bem como em difratômetro de raios X modelo *X'Pert*, com posterior análise pelo software *TOPAS*, utilizando o método de *Rietveld*.

Para a composição adotada, contendo 40% de cinza volante em relação ao peso seco do material, foram realizados ensaios de compactação Proctor normal, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2025d), bem como ensaios de CBR e expansão, de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2025e).

A partir desses resultados foram definidas as duas variáveis principais da pesquisa: a variação da relação Si/Na e a avaliação da resistência à compressão simples (RCS) da mistura em comparação com os requisitos da NBR 12253 (ABNT, 2012).

Para a determinação da dosagem ideal, foram realizados ensaios de RCS em triplicata, utilizando corpos de prova cilíndricos de 5 × 10 cm. Foram adotadas duas relações Si/Na indicadas na literatura clássica proposta por Fernández-Jiménez e Palomo (2005), correspondentes a 0,118 e 1,23, além de uma relação adicional Si/Na = 2,5, baseada em estudos mais recentes da literatura internacional, visando avaliar níveis mais elevados de concentração de ativadores alcalinos.

A composição dos corpos de prova considerou a relação Si/Na adotada, teor de precursor de 40%, tempo de cura de 7 dias e temperatura de cura de 70 °C nas primeiras 48 horas, seguida de acondicionamento em sacos plásticos tipo *zip-lock* durante o período restante de cura. Foi adotada umidade de moldagem de 12% e peso específico seco de 1,35 g/cm³.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, utilizou-se uma prensa eletrônica CBR/Marshall com capacidade de carga de 5 toneladas (50 kN), disponível no Laboratório de Engenharia Civil (LEC-ESUCRI). A moldagem dos corpos de prova foi realizada com velocidade aproximada de 30,0 mm/min, enquanto o ensaio de ruptura aos 7 dias foi conduzido na mesma prensa com velocidade de 1,14 mm/min, com leitura da carga em quilograma-força (kgf). Esse mesmo procedimento foi aplicado para a dosagem ótima de Si/Na, avaliando-se resistências aos 7 e 28 dias de cura.

Para a avaliação ambiental do material, foram realizados ensaios de lixiviação conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004). Foram analisados os elementos com maior representatividade identificados na FRX, incluindo alumínio (Al) e ferro (Fe), além do elemento característico do rejeito de fluorita, o flúor (F).

Quanto à origem dos materiais utilizados na pesquisa, o rejeito de fluorita foi obtido de uma mineradora localizada em Cerro Azul-PR, selecionado por apresentar características semelhantes às ocorrências encontradas em Santa Catarina, embora este último não estivesse disponível para análise nesta pesquisa. Esse material é proveniente do beneficiamento de fluorita para obtenção do grau ácido, envolvendo etapas de moagem, separação granulométrica e flotação, sendo posteriormente destinado à produção de briquetes. A amostragem foi realizada por caminhamento expedito no depósito de rejeitos, sendo o material acondicionado em sacos plásticos, quarteado antes do uso e seco em estufa a 100 ± 3 °C por 24 horas.

A cinza volante tipo F utilizada foi proveniente da queima do carvão CE-4500, empregado na geração de energia no complexo termoelétrico de Capivari de Baixo-SC. O processo de coleta, armazenamento e secagem foi realizado de forma semelhante ao adotado para o rejeito de fluorita.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na investigação experimental. Inicialmente são analisadas as características físicas, mineralógicas e químicas dos materiais, seguidas da avaliação do desempenho geotécnico da mistura por meio de ensaios de compactação, resistência mecânica e comportamento quanto à lixiviação.

3.1 Caracterização Física do rejeito e Cinza

A massa específica real dos grãos (g/cm³) do rejeito mostrou-se superior à observada para a cinza volante, apresentando valores de 2,774 e 2,071, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de ferro presente no rejeito, de forma semelhante ao observado no estudo de Gentil *et al.* (2020). Quanto aos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), ambos os materiais foram classificados como não plásticos, não sendo possível determinar valores para esses parâmetros.

A análise granulométrica (Figura 1) permitiu classificar o rejeito como areno-siltoso, com predominância de areia fina (63,60%), apresentando coloração marrom. Já a cinza volante foi classificada

como silto-arenosa, com predominância de silte (72,25%), seguida de 19,12% de areia fina, considerando a fração passante na peneira #200. Com base na classificação USCS (ASTM, 2025), o rejeito foi classificado como SM (areia siltosa) e a cinza volante como ML (silte de baixa plasticidade).

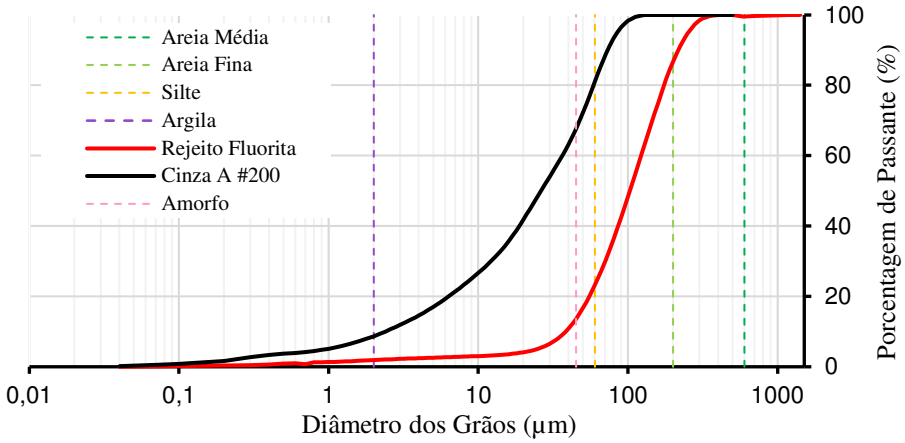


Figura 1. Curvas granulométricas do rejeito de fluorita e da cinza volante

3.2 Caracterização Mineralógica e Química

A análise mineralógica do rejeito de fluorita indicou picos de fases cristalinas de quartzo (SiO_2), muscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), ferrosilita ($FeSiO_3$) e fluorita ($CaF_2$), conforme apresentado na Figura 2. Esses resultados são coerentes com os dados obtidos por FRX (Tabela 1), nos quais se observam maiores concentrações de Fe_2O_3 (32,27%) e SiO_2 (28,89%), confirmando os picos identificados no DRX. A presença de sílica está associada à ocorrência natural de minerais quartzosos no depósito de fluorita, enquanto o Al_2O_3 é típico de solos naturais associados a esse tipo de formação mineral (Lu *et al*., 2024).

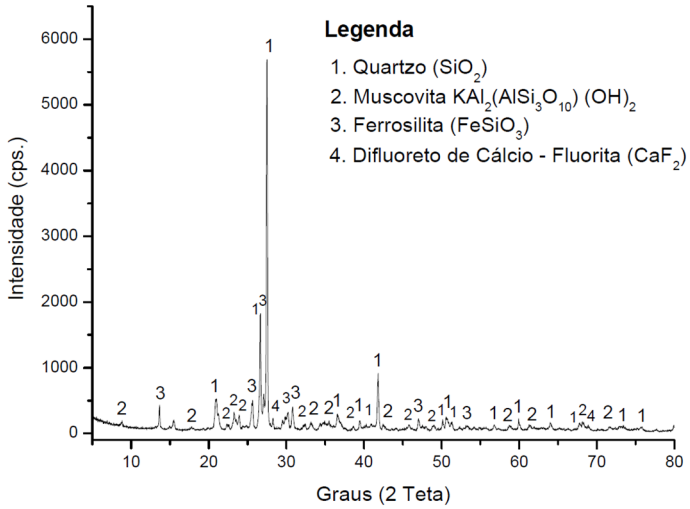


Figura 2. Difratograma de raios X do rejeito de fluorita.

Tabela 1 - Concentração de óxidos (>0,5%) obtida por FRX para o rejeito de fluorita e cinza volante.

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	SO_3
Rejeito de Fluorita (%)	28,89	9,77	32,27	8,28	5,04	1,07	-
Cinza Volante #200 (%)	60,82	23,08	6,18	3,78	2,44	1,32	0,57

Quando avaliada a estrutura mineralógica da cinza volante, verificou-se uma estrutura semicristalina, com índice de cristalinidade aproximado de 26%, indicando cerca de 74% de material amorfo, conforme

análise pelo método de Rietveld (Figura 3). Esse comportamento é compatível com o esperado para cinzas volantes, uma vez que estudos como Alterary, Lterary e Marei (2021) indicam fases cristalinas variando entre 5% e 50% da massa total.

Observou-se ainda predominância de mulita ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) e quartzo (SiO_2), além da presença de um halo amorfo entre aproximadamente 10° e 35°, característico de cinzas volantes leves, comportamento também observado por Costa *et al*. (2023).

Os resultados de FRX (Tabela 1) para a cinza volante indicaram predominância de SiO_2 (60,82%), seguida de Al_2O_3 (23,08%), além da presença de Fe_2O_3 (6,18%) e CaO (2,44%), o que permite classificá-la como cinza volante tipo F, caracterizada por elevado conteúdo de aluminossilicatos, favorável à formação de estruturas cimentantes.

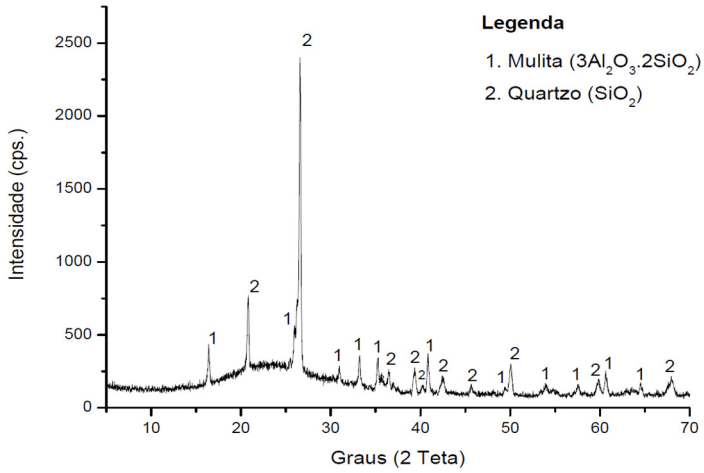


Figura 3. Difratograma de raios X da cinza volante.

3.3 Compactação

Os resultados do ensaio de compactação Proctor normal (Figura 4) indicaram que a adição de cinza volante promoveu redução da umidade ótima e da massa específica seca máxima, comportamento possivelmente associado ao aumento da fração fina da mistura, uma vez que não houve tempo suficiente para reações químicas durante a compactação, conforme observado também por Gentil *et al*. (2020). Considerando as condições favoráveis ao processo de álcali-ativação pelo método *One-Part*, que requer baixos teores de umidade, adotou-se massa específica seca de 1,35 g/cm³ e umidade de moldagem de 12%.

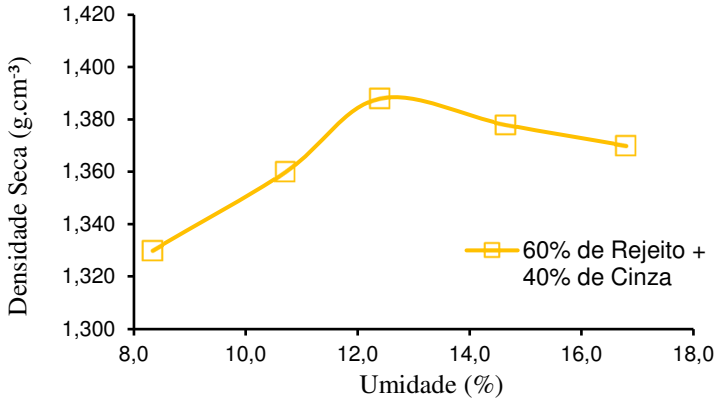


Figura 4. Curva de compactação obtida no ensaio Proctor normal.

3.4 Resistência a compressão simples não confinada (RCS)

Com base nos resultados de resistência à compressão simples (RCS), observou-se que a relação Si/Na = 2,5 apresentou o melhor desempenho para a mistura estudada. Conforme apresentado na Figura 5, essa

dosagem apresentou valores aproximadamente três vezes superiores aos obtidos para as demais relações avaliadas aos 7 dias de cura, possivelmente em decorrência da maior disponibilidade de silicato ativo para os processos de geopolimerização e formação de estruturas cimentantes. Esse comportamento indica que a relação Si/Na = 2,5 não ultrapassa o limite associado ao endurecimento rápido do gel cimentante, mantendo condições adequadas para o desenvolvimento da geopolimerização. Ao mesmo tempo, essa relação fornece quantidade suficiente de Na_2O para favorecer os processos de dissolução e policondensação, conforme discutido no estudo de Zhang *et al*. (2022).

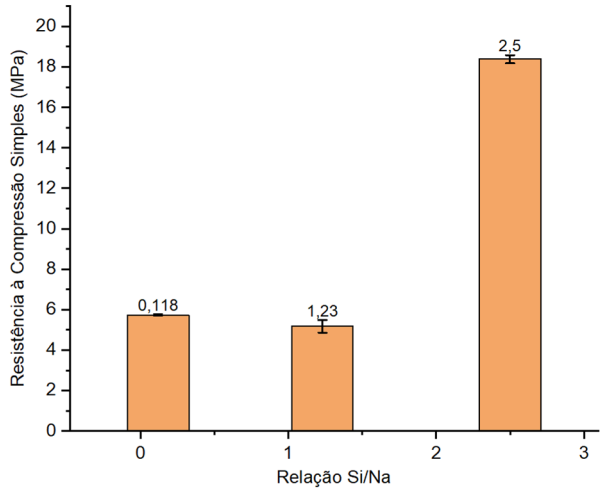


Figura 5. Resistência à compressão simples para diferentes relações Si/Na.

Partindo dessa relação e adotando o valor Si/Na = 2,5, observou-se ganho de resistência à compressão com o aumento do tempo de cura, passando de 18 MPa aos 7 dias para 21,66 MPa aos 28 dias (Figura 6). Esse comportamento é semelhante ao observado em estudos como o de Rivera *et al*. (2020), que também reportaram aumento progressivo da resistência em materiais geopoliméricos ao longo do tempo de cura.

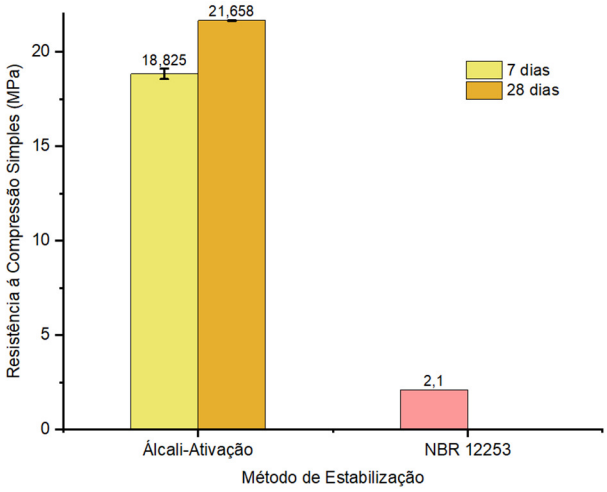


Figura 6. Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias comparada ao valor mínimo da NBR 12253.

Esse ganho de resistência está associado à ação dos ativadores alcalinos, como NaOH e Na_2SiO_3, que promovem a dissolução das estruturas de Si-O e Al-O presentes nos precursores aluminosilicatos. A hidrólise desses ativadores libera íons OH^-, responsáveis pela quebra das estruturas amorfas de SiO_2 e Al_2O_3, formando espécies reativas que posteriormente originam géis do tipo N-A-S-H (aluminato de sódio hidratado). Esses géis atuam como fase cimentante no material, promovendo densificação da matriz e aumento da resistência mecânica ao longo do processo de cura (Sun *et al*., 2020).

Os valores de resistência obtidos, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, são significativamente superiores ao valor mínimo estabelecido para camadas de subleito, conforme indicado na NBR 12253 (ABNT, 2012), que estabelece valor mínimo de 2,1 MPa. Dessa forma, os resultados indicam que a mistura contendo 40% de cinza volante e relação Si/Na = 2,5 apresenta desempenho mecânico amplamente satisfatório para aplicação em pavimentação, demonstrando potencial para melhoria das propriedades estruturais do subleito e possível redução de patologias associadas ao pavimento ao longo da vida útil.

3.5 CBR e Expansão

Os ensaios de CBR e expansão da mistura contendo 40% de cinza volante apresentaram valores de 9,3% e 0,19%, respectivamente, na energia normal de compactação. Esses resultados indicam que o material pode ser aplicado como subleito, atendendo aos critérios de expansão e CBR para pavimentos flexíveis estabelecidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

3.6 Lixiviação e liberação de elementos

Para os elementos Al, Fe e F, selecionados com base nos resultados de FRX e nas características do rejeito de fluorita, observou-se aumento significativo na concentração de metais lixiviados na mistura submetida à álcali-ativação. Foram observados valores 85,72; 7,28 e 40,08 vezes superiores para Al, Fe e F, respectivamente, em comparação ao rejeito sem tratamento.

Esse comportamento representa uma preocupação ambiental, uma vez que a liberação desses elementos pode ocorrer em condições de lixiviação decorrentes da infiltração de água da chuva, configurando um possível limitante para aplicação da técnica de estabilização One-Part em subleitos.

Esse fenômeno pode estar associado aos valores elevados de pH, que foram aproximadamente 12 para a mistura álcali-ativada e 9,23 para o rejeito sem tratamento. Em ambientes altamente alcalinos ocorre amplificação do comportamento anfótero dos metais, aumentando sua mobilidade devido à interação com íons OH^-, o que favorece processos de lixiviação (Xing *et al*., 2025).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os resultados indicam que a álcali-ativação pelo método *One-Part* apresentou comportamento geomecânico satisfatório, com valores de resistência à compressão simples superiores aos requisitos mínimos normativos para aplicação em camadas de subleito de pavimentos. Assim, a mistura de rejeito de fluorita e cinza volante demonstra potencial como alternativa para reaproveitamento desses materiais em obras de pavimentação.

Entretanto, os resultados de lixiviação indicaram aumento na mobilização de elementos, configurando um fator limitante para a aplicação direta do material nas condições avaliadas. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros investiguem o uso de agentes estabilizantes ou inibidores, como o hidróxido de cálcio, visando reduzir os efeitos de lixiviação sem comprometer os ganhos de resistência obtidos.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio nos ensaios realizados ao LDRX-UFSC, LEMA-UFSC e NANOTEC-UFSC, bem como Faculdade ESUCRI e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alterary, S.; Lterary, S.; Marei, N. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University* – Science, 33, 8 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10005. *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego com camada de pavimento*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *NBR 10004-2. Resíduos Sólidos – Classificação, Parte 2: Sistema geral de classificação de resíduos (SGCR)*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025a). *NBR 6459. Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025b). *NBR 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025c). *NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica dos sólidos, da amassa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025d). *NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025e). NBR 9895. *Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

ASTM - *American Society for Testing and Materials*. (2025). D2487. *Standard Practice for Classifications of Soil for Engineering Purposes (Unified Soil Classifications System)*. 2025, 10 p.

Confederação Nacional do Transporte. (2025). Síntese dos resultados da pesquisa CNT de Rodovias 2025 no Brasil. Brasília – DF: CNT, 33 p.

Costa, H. et al. (2023). Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais. *Ambiente Construído*, 23, p. 203.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro-RJ: IPR, 2006, 277 p.

Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35, p. 1984 – 1992.

Gentil, Gustavo *et al*. Estabilização química de rejeito de minério de ferro com Cimento Portland para aplicação em pavimentos. *In: COBRAMSEG*, 20, 2020, p. 629-635.

Lu, Q. *et al*. (2024). Preparation of high-purity fluorite and nanoscale calcium carbonate from low-grade fluorite. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31 (6), p. 1198 – 1207.

Palomo, A. *et al.* (2007). Opc-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, 42 (9), p. 2958 – 2966.

Rivera, J. *et al*. (2020). Clayey soil stabilization using alkali-activated, cementitious materials. Materiales de Construcción, 12 p.

Sun, G. *et al*. (2020). Early activation of high fly ash by ternary activator and its activation mechanism. *Journal of Environmental Management*, 267, 14 p.

Xing, Y.; Wang, B.; Yu, H. (2025). Effect of alkali-activatn conditions on microstructure and heavy metal solidification of alkali-activated converter steel slag and municipal solid waste incineration fly ash. *Environmental research*, 267, 9 p.

Zhang, P. *et al*. (2022). Influence of SiO2 /Na2O molar ratio on mechanical properties and durability of metakaolin-fly ash blend alkali-activated sustainable mortar incorporating manufactured sand. *Journal of materials research and technology*, 18, p. 35533563.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/55

Análise da Suscetibilidade à Erosão Utilizando o Modelo RUSLE Integrado a Dados Espaciais em Solos do Interior de São Paulo

Regis Eduardo Geroto
Coordenador de Geotecnia, Motiva Rodovias, Jundiaí, Brasil, regis.geroto@motiva.com.br

Luiza Caroline Marques
Engenheira Ambiental, Motiva Rodovias, Jundiaí, Brasil, luiza.marques@motiva.com.br

RESUMO: A erosão hídrica constitui um dos principais processos de degradação ambiental em regiões tropicais, sendo intensificada por intervenções antrópicas, mudanças no uso do solo e eventos pluviométricos intensos, comprometendo a estabilidade de taludes, favorecendo o assoreamento de dispositivos de drenagem e desencadeando processos erosivos concentrados. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à erosão hídrica em solos do interior do Estado de São Paulo, tendo como objeto o município de Piracicaba – SP, por meio da aplicação da Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrada a ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A metodologia baseou-se na espacialização dos fatores do modelo RUSLE: erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), fator topográfico (LS), cobertura e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P), utilizando bases de dados pedológicas, pluviométricas e topográficas disponíveis em plataformas públicas. Os resultados indicam maior suscetibilidade erosiva em áreas com declividades superiores a 12%, associadas a argissolos e setores com baixa cobertura vegetal, onde as perdas estimadas superam 10 t/ha·ano. A integração entre RUSLE e SIG demonstrou elevada capacidade de identificação espacial de áreas críticas, constituindo ferramenta relevante para o planejamento geotécnico, gestão territorial e definição de estratégias de controle de erosão.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, Vulnerabilidade, RUSLE, SIG, Solos, Interior.

ABSTRACT: Water erosion is one of the main environmental degradation processes in tropical regions, being intensified by anthropogenic interventions, land-use changes, and intense rainfall events. These factors compromise slope stability, promote sedimentation in drainage structures, and trigger concentrated erosion processes. In this context, the present study aims to evaluate the susceptibility to water erosion in soils of the interior region of the State of São Paulo, Brazil, focusing on the municipality of Piracicaba (SP), through the application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated with Geographic Information System (GIS) tools. The methodology was based on the spatialization of the RUSLE model factors: rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), topographic factor (LS), cover-management factor (C), and conservation practices factor (P), using pedological, pluviometric, and topographic datasets available from public databases. The results indicate higher erosion susceptibility in areas with slopes greater than 12%, associated with Ultisols (“Argissolos”) and sectors with low vegetation cover, where estimated soil losses exceed 10 t/ha·yr. The integration of RUSLE and GIS demonstrated a high capability for spatial identification of critical areas, representing a relevant tool for geotechnical planning, territorial management, and the definition of erosion control strategies.

KEYWORDS: Erosion; Vulnerability; RUSLE; GIS; Soils; São Paulo Hinterland.

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um processo natural intensificado por atividades antrópicas e pelo uso inadequado da superfície e do material solo, representando um dos principais agentes de degradação ambiental e geotécnica em regiões tropicais. No interior do Estado de São Paulo, a combinação entre solos tropicais intemperizados, relevo suavemente ondulado a ondulado com presença (em muitos locais) de taludes íngremes, associados à antropização do solo e atividade agroindustrial, favorece a ocorrência de processos erosivos.

No contexto geotécnico, a ocorrência de processos erosivos impacta diretamente na condição de estabilidade de taludes em corte e aterro, na integridade e desempenho de obras rodoviárias e hidráulicas, na maior possibilidade de assoreamento de corpos hídricos (fundo de vale), na degradação ambiental e perda de produtividade agrícola, entre outros fatores.

Modelos empíricos como a RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) têm sido utilizados para estimar as taxas de perda de solo e orientar práticas conservacionistas, análise correlata ao objeto desse trabalho, que consiste na avaliação da vulnerabilidade erosiva dos solos do interior do Estado de São Paulo, com base na integração de parâmetros pedológicos, topográficos e climáticos aplicados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para a produção de cartas de vulnerabilidade.

Nesse contexto, a integração de modelos de perda de solo com ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) pode contribuir para a identificação de áreas suscetíveis à erosão, permitindo subsidiar decisões relacionadas ao planejamento territorial, projetos de infraestrutura e gestão ambiental.

2 CONTEXTO TEÓRICO

2.1 Erosão Hídrica

O processo de erosão hídrica ocorre principalmente pelo impacto das gotas de chuva (efeito splash), escoamento superficial concentrado, transporte (carreamento) e deposição sedimentar. Sob a ótica da geotecnia, esses efeitos podem resultar em: exposição de camadas menos resistentes, redução da resistência ao cisalhamento e deflagração de processos erosivos, comprometendo o terreno local e estruturas apoiadas.

Para desenvolvimento do contexto teórico, apresenta-se na sequência um contexto macro dos solos (pedologia) presentes no interior de São Paulo, bem como aspectos relacionados ao modelo RUSLE.

2.2 Solos Tropicais do Interior de São Paulo

A pedogênese tropical, em especial no interior de São Paulo, impõe particularidades aos solos presentes nas áreas avaliadas, sendo estas apresentadas de forma sucinta na Tabela 1.

Tabela 1. Características Pedológicas dos Solos do Interior de São Paulo (adaptado de EMBRAPA, 2018; Lepsch, 2010; Bertoni e Lombardi Neto, 2014).

Classe de solo (SiBCS)	Características Pedológicas	Comportamento Hidrológico	Suscetibilidade Erosiva (K)
Latossolos (Vermelho; Vermelho-Amarelo)	Solos profundos, intemperizados; estrutura estável	Quando conservado, boa drenagem. Sob degradação pode ocorrer selamento	Baixa–moderada (dependente de estrutura e manejo)
Argissolos (inclui "podzólico" em legados cartográficos)	Horizonte B com argila, controlando condutividade e erodibilidade	Contraste hidráulico favorece escoamento lateral/subsuperficial	Moderada–alta (varia por textura, estrutura e manejo)
Neossolos Litólicos (rasos)	Pequena profundidade efetiva com baixa espessura "protetora"	Resposta hidrológica rápida; maior escoamento superficial em eventos intensos	Alta (baixa proteção e exposição)
Neossolos Quartzarênicos (muito arenosos)	Textura dominada por areia; baixa coesão e retenção	Infiltração alta, mas compactação aumenta runoff e erosão por destacamento	Alta (destacamento e transporte)
Cambissolos	Solos menos desenvolvidos, estrutura variável	Resposta hidrológica variável; sensível a compactação e manejo	Moderada (alta variabilidade espacial)
Nitossolos	Estrutura forte, argilosos; horizonte B nítico; boa agregação	Infiltração moderada; mais sensíveis com concentração de fluxo e perda de cobertura	Baixa–moderada (em geral menor que Argissolos/Neossolos)

2.3 Modelo RUSLE

Nesse contexto de avaliação de vulnerabilidade e risco de erosão de solos, modelos preditivos para a determinação da taxa de perda do solo (erosão), como a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), derivado da Equação Universal de Perda de Solo – USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978), tornam-se ferramentas essenciais para o planejamento e manutenção de infraestruturas, sobretudo em contextos de intensificação de eventos extremos de precipitação. Apesar das atualizações e complementos quanto às aplicações, estes novos modelos preservam sua equação básica, apresentada a seguir:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde:

A = perda média anual de solo (t/ha·ano)
R = erosividade da chuva (MJ.mm.ha-1.h-1.ano-1)
K = erodibilidade do solo (t.ha-1.MJ-1.mm-1)
LS = fator topográfico (adimensional)
C = cobertura e manejo (adimensional)
P = práticas conservacionistas (adimensional)

Embora a RUSLE tenha origem em conservação do solo agrícola, os seus fatores têm interpretação direta em geotecnia ambiental e de infraestrutura, especialmente para erosão superficial e evolução de instabilidades rasas, incorporando atualizações com: bases climáticas ampliadas, simulação de manejo agrícola dinâmico e melhor representação de processos hidrossedimentológicos.

2.4 Interpretação Geotécnica dos Fatores RUSLE

Apresenta-se na sequência a interpretação geotécnica dos fatores intervenientes na equação RUSLE, que serve como base para a matriz de suscetibilidade dos solos em ocorrência de processos erosivos.

2.4.1 Erosividade (R) e gatilhos de instabilização superficial

O fator R representa a energia das chuvas e sua capacidade de desagregar e transportar partículas. Em encostas e cortes rodoviários, chuvas intensas elevam simultaneamente: (a) o potencial de desagregação superficial e (b) o escoamento superficial concentrado quando a capacidade de infiltração é excedida. Esse mecanismo atua como gatilho de erosão laminar → sulcos → ravinas, e pode preceder processos de instabilidade rasa ao remover a camada superficial mais resistente (Renard et al., 1997; Morgan, 2005).

2.4.2 Erodibilidade (K) como indicador de comportamento geotécnico superficial

O fator K agrega efeitos de textura, estrutura, permeabilidade e matéria orgânica. Em termos geotécnicos, K se relaciona com a resistência à desagregação e à suscetibilidade ao arrancamento por cisalhamento hidráulico (Morgan, 2005). Solos mais arenosos tendem a apresentar maior desprendimento por impacto das gotas, enquanto que solos argilosos, são mais resistentes à ocorrência do desprendimento, porém, uma vez mobilizado/desprendido suas partículas em suspensão podem elevar o assoreamento (Morgan, 2005).

2.4.3 Fator topográfico (LS) e conectividade hidrossedimentológica

O fator LS controla o aumento do potencial erosivo com declividade e comprimento de rampa. Na geotecnia rodoviária, o fator LS é particularmente útil para identificar trechos com maior probabilidade de formação de caminhos preferenciais (concentração) e necessidade de dissipação de energia (Renard et al., 1997). Importante salientar que, quando o LS é derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE), este pode superestimar a contribuição de áreas onde pode haver interrupções de fluxo (bermas, sarjetas, canaletas) ou subestimar a conectividade onde existem trilhas de enxurrada não representadas (Desmet & Govers, 1996).

2.4.4 Cobertura e manejo (C) e desempenho de soluções geotécnicas superficiais

O fator C é o principal discriminador de cenários de projeto: solo exposto em obras (C alto) versus cobertura vegetal/mantas/biomantas (C baixo). Em obras lineares, "janelas" temporais de solo exposto durante a terraplenagem podem criar picos de risco erosivo, sendo necessário a avaliação com cautela, pois a perda de solo pode se concentrar em poucos eventos críticos (Renard et al., 1997; RUSLE, 2008).

2.4.5 Práticas conservacionistas (P) como intervenções geotécnicas

O fator P permite modelar medidas como terraceamento e plantio em contorno. Em infraestrutura, o equivalente inclui drenagem superficial, microterraceamento, canaletas em contorno, escadas hidráulicas, dissipadores e controle de lançamento, porém, por ser menos padronizado, exige calibração local.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Para o desenvolvimento do trabalho, a metodologia estará estruturada em quatro etapas principais.

3.1 Levantamento e Organização de Dados

A etapa inicial consistiu na definição da área de estudo e no levantamento das bases de dados necessárias para a aplicação do modelo RUSLE em ambiente SIG, sendo utilizadas bases pedológicas, topográficas, climáticas e de uso do solo provenientes de instituições oficiais e bases públicas de dados geoespaciais, como por exemplo: cartas pedológicas (IBGE e EMBRAPA), séries pluviométricas históricas (ANA), Modelo Digital de Elevação (bases altimétricas disponíveis), mapas de uso e cobertura do solo (MapBiomas) e informações complementares sobre processos erosivos registradas em literatura regional.

3.2 Aplicação em Ambiente SIG

O emprego da ferramenta SIG permite a integração eficiente dos dados obtidos na área de interesse, espacializando os fatores da equação, análise integrada dos fatores RUSLE, mapas de suscetibilidade erosiva, com abordagem ampliada e consolidada em estudos ambientais, projetos rodoviários e agrícolas.

3.3 Classificação de Suscetibilidade (Fatores da RUSLE)

Para o presente trabalho, a classificação (análise multicritérios) baseia-se nos fatores indicados/apresentados no método RUSLE, a saber:

- Fator R – Erosividade (obtido por séries pluviométricas e índices EI30, no site da ANA);
- Fator K – Erodibilidade (estimado a partir de dados do IBGE sobre a pedologia local);
- Fator LS – Topografia (derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) de terreno);
- Fator CP – Uso do solo e práticas conservacionistas (MapBiomas), resultando em fator CP.

Os fatores K e CP foram determinados considerando as bases obtidas em literatura científica, enquanto que a erodibilidade do solo (fator K) foi determinada por meio do método indireto da equação de Bouyoucos, conforme estudo apresentado por Mannigel (2002) para solos do Estado de São Paulo.

Os valores utilizados para cada classe de solo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores do fator K (Mannigel, 2002).

Classe de solo	Fator K (t.ha-1.MJ-1.mm-1)
Latossolo Vermelho Distrófico	0,0061
Latossolo Vermelho – Amarelo Distrófico	0,0112
Argissolo Vermelho – Amarelo Distrófico	0,0466

Os valores do fator CP foram obtidos a partir de diferentes estudos da literatura. A Tabela 3 apresenta os coeficientes adotados para cada classe de uso e cobertura do solo, bem como suas respectivas referências.

Tabela 3. Valores do fator CP.

Uso do solo	Fator CP	Referência
Formação Florestal	0,0004	Barbosa et al, 2015
Formação Savânica	0,0007	Carneiro, 2019
Mangue	0,0000	Barbosa et al, 2015
Formação Campestre	0,2500	Barbosa et al, 2015
Pastagem	0,0100	Barbosa et al, 2015
Agricultura	0,2500	Carneiro, 2019
Urbanização	0,0688	Pasquatto & Tomazoni, 2016
Solo exposto	1,0000	Barbosa et al, 2015
Afloramento Rochoso	0,0010	Pasquatto & Tomazoni, 2016
Água	0,0000	Barbosa et al, 2015

3.4 Elaboração da Carta de Suscetibilidade

Por fim, como resultado do trabalho, foram elaboradas as bases de referência e a Carta de Suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos, produtos esses que subsidiam o manejo, uso e ocupação do solo, através do indicativo de áreas com maior risco, denotando a necessidade de estudos mais aprofundados e intervenções mais robustas para evitar a deflagração de processos erosivos nesses locais.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada é a do município de Piracicaba – SP (Figura 1), inserida na unidade geomorfológica da Depressão Periférica Paulista, com relevo suavemente ondulado a ondulado. Os solos predominantes são Latossolos e Argissolos desenvolvidos sobre formações sedimentares da Bacia do Paraná, frequentemente associados a materiais arenosos e franco-arenosos com elevada suscetibilidade à erosão quando expostos.

Nessa região, o clima tropical apresenta estação chuvosa bem definida, associado a eventos de precipitação intensa no verão, favorecendo o escoamento superficial concentrado, sobretudo em áreas com declividades moderadas. Além disso, o município possui um histórico de uso agrícola intensivo, com destaque para a cultura da cana-de-açúcar e a expansão urbana, que contribuem para a redução da cobertura vegetal e para a compactação do solo, aumentando a suscetibilidade à erosão hídrica (Weill e Sparovek, 2008).

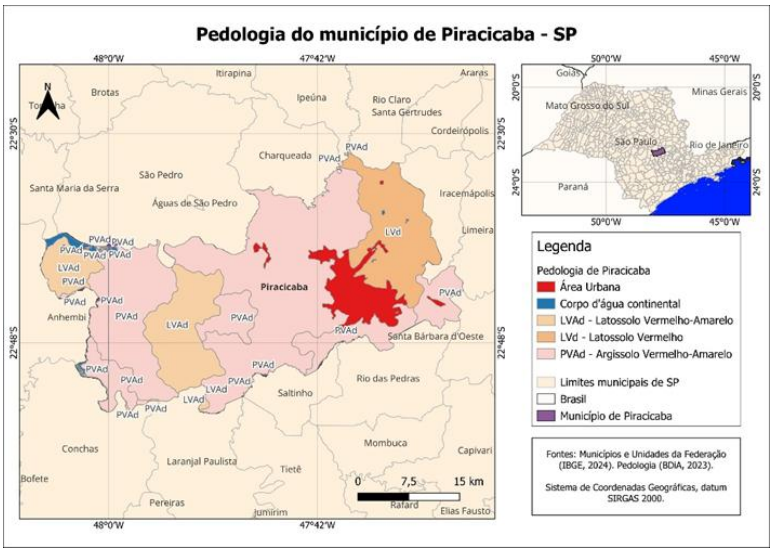


Figura 1. Pedologia e localização do município de Piracicaba – SP.

5 PRODUTOS DESENVOLVIDOS

Os produtos (bases e Cartas de Suscetibilidade) apresentados na Figura 2, foram desenvolvidos com o software QGIS e apresenta o potencial de erosão do município de Piracicaba, considerando os fatores da Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), integrando os fatores R (erosividade da chuva), K (erodibilidade do solo), LS (comprimento e declividade de vertente) e CP (uso e manejo do solo).

A representação desses parâmetros permite visualizar a distribuição espacial da perda média anual de solo (Fator A, em t/ha.ano) e, consequentemente, determinar as áreas com maior vulnerabilidade aos processos erosivos, constituindo uma ferramenta de apoio à análise ambiental e planejamento para uso da terra.

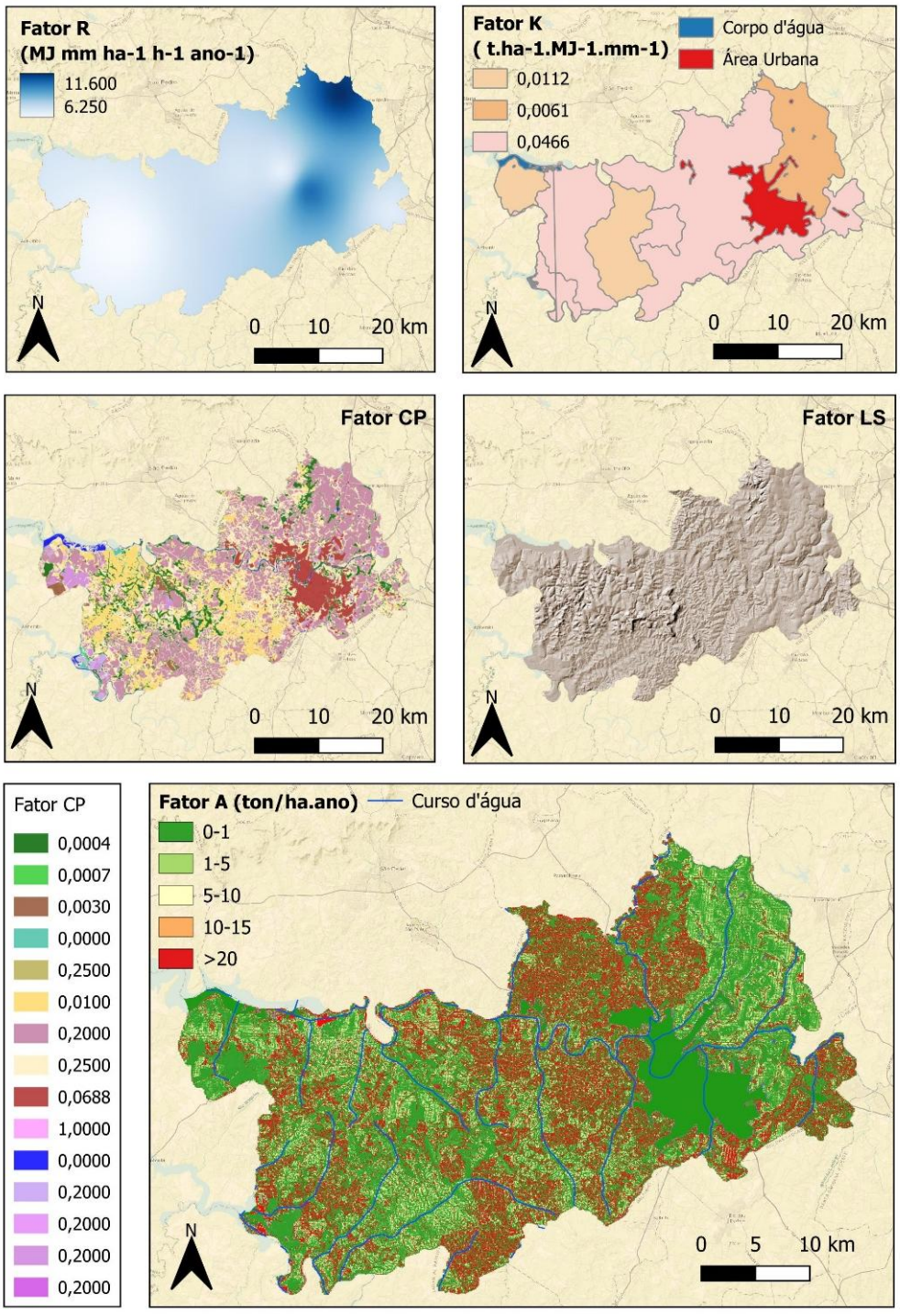


Figura 2. Bases e Carta de Suscetibilidade (potencial de erosão) no município de Piracicaba-SP.

6 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

6.1 Fatores Condicionantes da Erosão

A análise integrada dos fatores do modelo Revised Universal Soil Loss Equation para o município de Piracicaba-SP evidencia que a suscetibilidade erosiva não depende de um único condicionante, mas sim da combinação entre características naturais e intervenções antrópicas. Em áreas onde solos mais suscetíveis coincidem com maiores declividades e cobertura vegetal reduzida, observa-se potencial significativo para a ocorrência de processos erosivos concentrados.

A influência do relevo é determinante na distribuição das áreas com maiores perdas estimadas. O fator LS apresenta valores significativamente elevados em setores com declividades superiores a 12%, onde o comprimento de rampa e a inclinação potencializam a energia do escoamento superficial. Nessas áreas, o mapa final indica concentrações expressivas de classes de perda acima de 10 ton/ha.ano, reforçando o papel do relevo como condicionante geomorfológico central na dinâmica erosiva. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura de erosão hídrica, que aponta a declividade como um dos principais condicionantes da intensificação do escoamento superficial e da evolução de processos erosivos (Morgan, 2005).

A análise do fator de erodibilidade do solo (K) indica que os solos predominantes na área de estudo exercem papel fundamental na suscetibilidade à erosão. Solos com maior teor de areia e menor grau de agregação estrutural tendem a apresentar maior facilidade de desagregação quando submetidos ao impacto das gotas de chuva e ao escoamento superficial. Os Latossolos Vermelhos (K = 0,0061) e Latossolos Vermelhos – Amarelos (K = 0,0112) apresentam valores médios de erodibilidade e indicam maior resistência à desagregação e transporte de partículas pela ação da chuva, dada sua estrutura mais estável (textura e permeabilidade), enquanto que os Argissolos Vermelho – Amarelos (K = 0,0466) apresentam maiores valores de K, decorrente da marcante descontinuidade textural entre horizontes, que limita a infiltração e favorece o escoamento concentrado (CONCIANI, 2008), favorecendo o surgimento de sulcos erosivos e ravinamentos.

O fator CP, que representa a influência da cobertura vegetal e das práticas de manejo do solo, também impactam a maior (ou menor) suscetibilidade aos processos erosivos. Áreas com ausência ou baixa densidade de cobertura apresentam aumento expressivo do fator C, elevando diretamente o potencial erosivo, destacando nesse contexto as áreas agrícolas intensivas, onde práticas de manejo convencional e exposição do solo ampliam a suscetibilidade, especialmente quando associadas a vertentes mais inclinadas. Assim, áreas com cobertura florestal ou vegetação densa tendem a apresentar taxas significativamente menores de perda de solo em comparação com áreas agrícolas ou superfícies expostas

6.2 Aplicações no Planejamento Ambiental e Geotécnico

A integração entre o modelo RUSLE e ferramentas de Sistema de Informações Geográficas demonstrou elevada capacidade de identificar áreas potencialmente suscetíveis à erosão hídrica, com grande potencial de aplicação em estudos de planejamento geotécnico e gestão territorial, apoiando a tomada de decisão e seleção de medidas de mitigação para minimizar ou evitar a deflagração (e os impactos) dos processos erosivos.

As medidas de mitigação devem considerar abordagens complementares, como a implementação de práticas conservacionistas que aumentem a cobertura vegetal do solo, reduzindo a erosão hídrica através da proteção da superfície do terreno contra o impacto direto das gotas de chuva, diminuindo a desagregação e a velocidade do escoamento superficial (carreamento). Sistemas como o plantio direto permitem preservar a estrutura do solo, aumentando a infiltração de água e elevando os teores de matéria orgânica, enquanto que o terraceamento (em curvas de nível) organiza o escoamento superficial de forma controlada, reduzindo seus comprimento de rampa (energia de escoamento) e favorecendo a retenção de água no perfil geológico local.

Portanto, a integração entre os modelos e o emprego de ferramenta SIG demonstrou ser uma ferramenta estratégica para subsidiar a tomada de decisão, direcionar estudos e campanhas de investigação no campo, bem como priorizar intervenções e promover maior segurança e sustentabilidade no uso do território municipal, aumentando a eficiência das estratégias de controle de erosão.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam que a erosão hídrica deve ser compreendida como um processo resultante da interação entre fatores naturais e intervenções antrópicas no território.Observa-se que os fatores considerados na equação RUSLE e utilizados na presente análise, como o relevo (Fator LS) e tipo de solo (Fator K) exercem influência significativa sobre a suscetibilidade natural à erosão, enquanto que uso e ocupação do solo (Fator C e P) desempenham papel determinante na intensificação desses processos, principalmente na ocorrência de eventos pluviométricos intensos (Fator R)

A análise integrada realizada em específico para o município de Piracicaba - SP, evidenciou que solos com maior teor (fração) arenosa, mais suscetíveis ao desprendimento e carreamento, associado às regiões com maior declividade e baixa cobertura vegetal, apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos (perda de solo), confirmando que a dinâmica erosiva local é condicionada tanto pelas características pedológicas quanto pelo relevo, pela chuva e pelo uso da terra.

Apesar das limitações inerentes aos modelos empíricos, a metodologia RUSLE aplicada em ambiente SIG demonstrou ser eficiente para a elaboração de cartas de suscetibilidade erosiva e para o suporte ao planejamento territorial e geotécnico e apoiar decisões relacionadas a projetos ambientais, expansão urbana, manejo agrícola e implantação de obras de infraestrutura urbana e rural, demonstrando elevada capacidade de avaliação espacial preditiva da suscetibilidade erosiva, permitindo identificar áreas críticas e subsidiar o planejamento territorial e geotécnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, A. F.; Oliveira, E. F.; Mioto, C. L.; Paranhos Filho, A. C. (2015). *Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em softwares livres e gratuitos*. Instituto de Geociências, Rio de Janeiro.

Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (2014). *Conservação do solo*. 9. ed. São Paulo-SP.

Carneiro, A. F. S. (2019). *Fragilidade ambiental em bacias hidrográficas do Vão do Paranã – GO*. Monografia (Graduação) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Conciani, W. (2008). *Processos erosivos: conceitos e ações de controle*. Cuiabá: CEFET-MT.

EMBRAPA (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF.

LEPSCH, I. F. (2010). Formação e conservação dos solos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Mannigel, A. R.; Carvalho, M. P.; Moreti, D.; Medeiros, L. R. (2002). *Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo*. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 24, p. 1335–1340.

Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing.

Pasquatto, M. C.; Tomazoni, J. C. (2016). *Estudo do processo erosivo laminar na bacia de captação do rio Barro Preto, em Coronel Vivida – PR*. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 2, p. 555–570.

Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; Mccool, D. K.; Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).* Washington, D.C.

RUSLE2 (2008). United States Department of Agriculture – USDA. *Revised Universal Soil Loss Equation version 2 (RUSLE2): science documentation*. Washington, D.C.

Weill, M. A. M.; Sparovek, G. (2008). *Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 2, p. 801–814.

Wischmeier, W.H. and Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning*. USDA-SEA, Washington DC- Estados Unidos. 69p.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/56

Análise de Desempenho e Estimativa da Resistência de Misturas Cimentícias de Solo, Resíduo de Construção Civil e Pó de Pedra

Juliana Maria de Souza
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Rafaela Chagas Rudnick
Engenheira civil, UEM, Maringá, Brasil, rafaelacrudnick@gmail.com

Gleicy Loany de Alencar Cardoso
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, pg56011@uem.br

Juliana Azoia Lukiantchuki
Professora Associada, UEM, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

RESUMO: O solo-cimento é um material que apresenta comportamento satisfatório para uso em aterros, taludes, fundações e como base e sub-base de pavimentos. Entretanto, a incorporação de cimento em solos coesivos pode causar o aparecimento de fissuras de retração no material, sobretudo com maiores teores do aglomerante. A incorporação de resíduo de construção civil (RCC) e o pó de pedra é uma alternativa para a redução do uso de cimento e mitigação desses problemas, pois melhoram a distribuição granulométrica do solo e colaboram com o ganho de resistência. O objetivo desse trabalho é avaliar a incorporação de cimento Portland, RCC e pó de pedra como materiais estabilizantes de um solo laterítico argiloso de alta plasticidade e estimar a equação de resistência pelo método de dosagem porosidade/cimento proposto por Consoli *et al*. (2007). Os ensaios analisaram misturas cimentícias de solo, solo com RCC e solo com pó de pedra, contendo 50% de cada material. Os teores de cimento usados foram de 4%, 6% e 8%. A caracterização do solo natural e das misturas foi feita por meio de ensaios físicos, químicos e mecânicos. Os coeficientes de determinação (R^2) encontrados para cada misturas indicaram que as relações porosidade/cimento (η/C_{iv}^{ξ}) determinadas foram satisfatórias.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Laterítico Argiloso, Solo-cimento, Resíduo de Construção Civil, Pó de Pedra, Dosagem Porosidade/Cimento.

ABSTRACT: Soil–cement is a material that shows satisfactory performance for use in embankments, slopes, foundations, and as base and subbase layers of pavements. However, incorporating cement into cohesive soils can lead to the formation of shrinkage cracks in the material, especially at higher binder contents. The incorporation of construction waste (CW) and quarry dust is an alternative to reduce cement consumption and mitigate these issues, as they improve the soil's particle-size distribution and contribute to strength gain. This study aims to evaluate the incorporation of Portland cement, CW, and quarry dust as stabilizing materials for a highly plastic lateritic clayey soil and to estimate the strength equation using the porosity/cement dosage method proposed by Consoli *et al*. (2007). The tests analyzed cemented mixtures of soil, soil with CW, and soil with quarry dust, containing 50% of each material. The cement contents used were 4%, 6%, and 8%. The natural soil and the mixtures were characterized through physical, chemical, and mechanical tests. The coefficients of determination (R^2) found for each mixture indicated that the porosity/cement relationships (η/C_{iv}^{ξ}) determined were satisfactory.

KEYWORDS: Lateritic clayey soil, Soil-cement, Construction waste, Quarry dust, Porosity/cement dosage.

1 INTRODUÇÃO

Solos argilosos em misturas de solo-cimento são desafiadores por terem baixa resistência e alta compressibilidade, sofrerem variações volumétricas com a umidade e apresentarem alta plasticidade, o que pode causar instabilidade e deformações excessivas, prejudicando a qualidade do material. A correção granulométrica melhora o desempenho das misturas ao estabilizar a matriz do solo, favorecendo a compactação, reduzindo os vazios e elevando a resistência à compressão. Além disso, o uso de resíduos para ajustar solos argilosos contribui para a sustentabilidade e para a redução de emissões de carbono, impulsionando o desenvolvimento de materiais e técnicas alternativas que atendam aos requisitos estruturais (Briskievicz *et al*., 2025).

A estabilização de solos argilosos com resíduo de construção civil reduz a massa específica seca, aumenta a resistência à compressão não confinada, tornando a mistura mais resistente e rígida, e melhora os parâmetros de compactação (Suluguru *et al*., 2018; Kianimehr *et al*., 2019). A incorporação de pó de pedra ao solo reflete no aumento da massa específica aparente seca e diminuição da umidade necessária para compactação, além de colaborar para a redução do teor de cimento necessário para elevar a resistência do material (Pissato e Soares, 2006; Yilmaz e Yurdakul, 2017; Mishra *et al*., 2019).

Consoli *et al*. (2007) propuseram um método de dosagem para o solo-cimento que leva em consideração o volume de vazios (V_v) e o inverso do volume de cimento ($^1/_{V_{ci}}$). Para uma representação mais elegante, os autores propuseram utilizar a porosidade (η) expressando uma porcentagem do volume de vazios em relação ao volume total (Equação 1). Por sua vez, o índice volumétrico de cimento (C_{iv}) é utilizado para representar a porcentagem do volume de cimento em relação ao volume total (Equação 2).

$$\eta = \frac{V_v}{V} \tag{1}$$

$$C_{iv} = \frac{V_{cim}}{V} \tag{2}$$

Para que haja um melhor ajuste entre a resistência à compressão não confinada (q_u) e a razão vazios/cimento é preciso aplicar uma potência ξ ao parâmetro C_{iv}, em que a razão vazios/cimento fica representada pela relação $^{\eta}/_{C_{iv}^{\xi}}$ (Consoli *et al*., 2007).

A potência ξ ao parâmetro C_{iv} varia de acordo com o tipo de solo-cimento analisado. Consoli *et al*. (2007) encontraram o valor de potência de 0,28 para um solo classificado como areia argilosa. Em contrapartida, Consoli *et al*. (2011) estudaram solos classificados como argila arenosa e argila siltosa, sendo que para esses materiais a potência adequada foi de 0,35. Assim, a relação de resitência à compressão não confinada definidas nesses trabalhos para a areia argilosa, argila siltosa e argila arenosa são representadas pelas Equações 3, 4 e 5.

$$q_u(kPa) = 5{,}03.10^7 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}}\right]^{-3,32} \tag{3}$$

$$q_u(kPa) = 4{,}34.10^8 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}}\right]^{-3,55} \tag{4}$$

$$q_u(kPa) = 1{,}04.10^7 \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,35}}\right]^{-2,85} \tag{5}$$

Utilizando a porosidade da mistura compactada e o índice volumétrico de cimento ajustado por um expoente, que varia dependendo do solo e do cimento utilizado, o engenheiro pode escolher o teor de cimento e o grau de compactação adequados para que a mistura atinja a resistência do projeto a um custo apropriado. Além disso, a relação vazios/cimento é útil para o controle de compactação em campo das camadas de solo-cimento a partir da análise da curva de q_u por $^{\eta}/_{C_{iv}^{\xi}}$. Ao se identificar a compactação inadequada de uma

camada, é possível avaliar as necessidades do projeto e adotar medidas corretivas como o reforço da camada ou a redução da carga atuante (Consoli *et al*., 2007).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilização de um solo argiloso por meio da incorporação de cimento, resíduo de construção civil e pó de pedra, com ênfase no desempenho mecânico e na resistência à compressão não confinada. Adicionalmente, busca-se ajustar uma equação de dosagem baseada na relação η / C_{iv}^{ξ}, conforme o método proposto por Consoli *et al*. (2007).

2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E MISTURAS

2.1 Materiais

Os materiais selecionados para esta pesquisa foram solo laterítico, resíduo de construção civil, pó de pedra e cimento CP II–Z32, em que o aspecto visual dos materiais são mostrados na Figura 1.

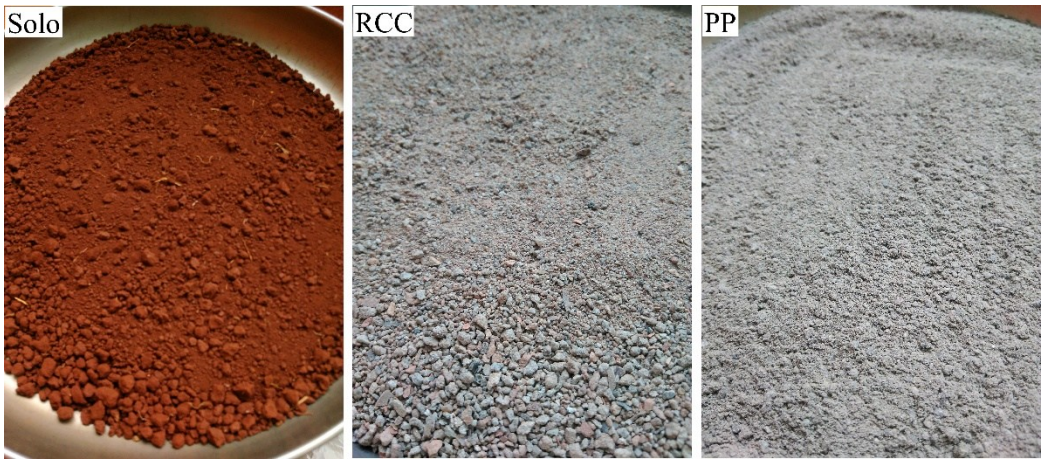


Figura 1. Aspecto visual do solo, RCC e pó de pedra

O solo foi coletado na cidade de Maringá, noroeste do estado do Paraná, no campus sede da Universidade Estadual de Maringá. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, de acordo com a Embrapa, e como laterítico argiloso (LG') pela classificação MCT. A massa específica é de 3,24 g/cm³.

O resíduo de construção civil (RCC) foi cedido pela Usina Nova Obra, na cidade de Arapongas, noroeste do estado do Paraná. O processamento do resíduo na usina era composto por triagem manual seguida de peneiramento grosso, visando a remoção de contaminantes e materiais descartados de forma irregular. Em seguida, o material era encaminhado ao britador e separado automaticamente por faixa granulométrica. O resíduo selecionado é composto principalmente por componentes de concreto, como fragmentos de elementos estruturais, resíduos de concreteiras e partes de paredes com quantidade elevada de argamassa. De acordo com as informações da usina, o RCC coletado continha de 30% a 35% de cerâmica, sendo o restante composto por concreto. O RCC usado nessa pesquisa possui massa específica de 2,77 g/cm³ e granulometria inferior a 2 mm, sendo seco até a umidade higroscópica.

O pó de pedra (PP) foi cedido pela EXTRACOM Mineração e Obras Ltda, na cidade de Maringá, noroeste do estado do Paraná. Esse material compõe cerca de 75% da Bacia do Paraná e é originário dos derrames basálticos da Era Paleozóica. Nessa pesquisa, a granulometria adotada para o pó de pedra foi inferior a 2 mm, de modo a proporcionar a adequada homogeneização com o RCC e permitir a comparação dos parâmetros. A massa específica do pó de pedra é de 3,14 g/cm³.

O cimento escolhido para essa pesquisa foi o CP II – Z32 da Votoran, devido à sua composição com 6% a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. Além disso, esse aglomerante confere certa impermeabilidade às misturas e oferece uma boa trabalhabilidade.

2.2 Misturas

Nessa pesquisa foram adotadas três misturas para avaliação de comportamento, em que a mistura de resíduos é a principal e a de solo foi utilizada como parâmetro comparativo, sendo elas:

- S: composta por solo natural;
- S_RCC: composta por 50% solo e 50% RCC;
- S_PP: composta por 50% solo e 50% pó de pedra.

À essas misturas foram incorporados os seguintes teores de cimento: 0%, 4%, 6% e 8%. Todas as misturas foram preparadas em termos de massa seca. A Tabela 1 apresenta as misturas avaliadas, sua composição e massa específica e a Figura 2 mostra as curvas granulométricas.

Tabela 1. Composição das misturas avaliadas.

Mistura	Solo (%)	RCC (%)	PP (%)	Cimento (%)	Massa específica (g/cm³)
S	100	0	0	0	3,24
S_4	96	0	0	4	
S_6	94	0	0	6	
S_8	92	0	0	8	
S_RCC	50	50	0	0	2,93
S_RCC_4	48	48	0	4	
S_RCC_6	47	47	0	6	
S_RCC_8	46	46	0	8	
S_PP	50	0	50	0	3,10
S_PP_4	48	0	48	4	
S_PP_6	47	0	47	6	
S_PP_8	46	0	46	8	

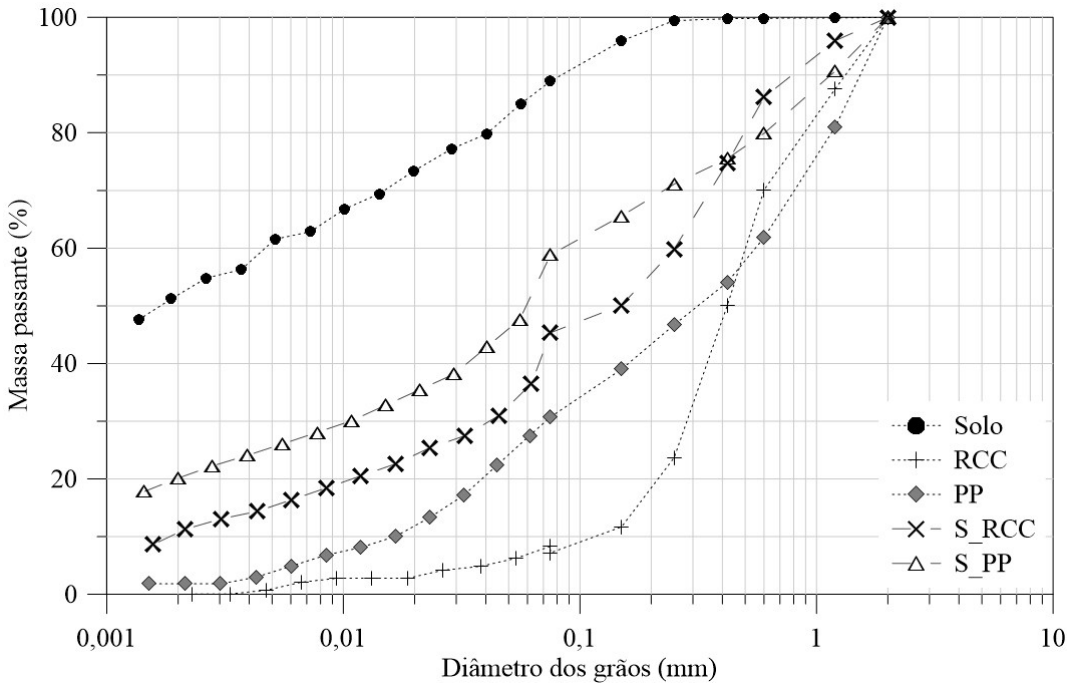


Figura 2. Curvas granulométricas dos materiais e misturas

Para a obtenção dos parâmetros de compactação, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima, foi aplicada a energia normal. A adição de cimento às misturas reflete na elevação dos valores de massa específica seca e dimiuição do teor de umidade, como visto na Figura 3.

A incorporação do RCC ao solo-cimento gera um aumento de quase 12% da massa específica seca e reduz em 45% o teor de umidade das misturas. A adição de cimento à mistura S_RCC não ocasiona uma variação expressiva nos parâmetros ótimos de compactação.

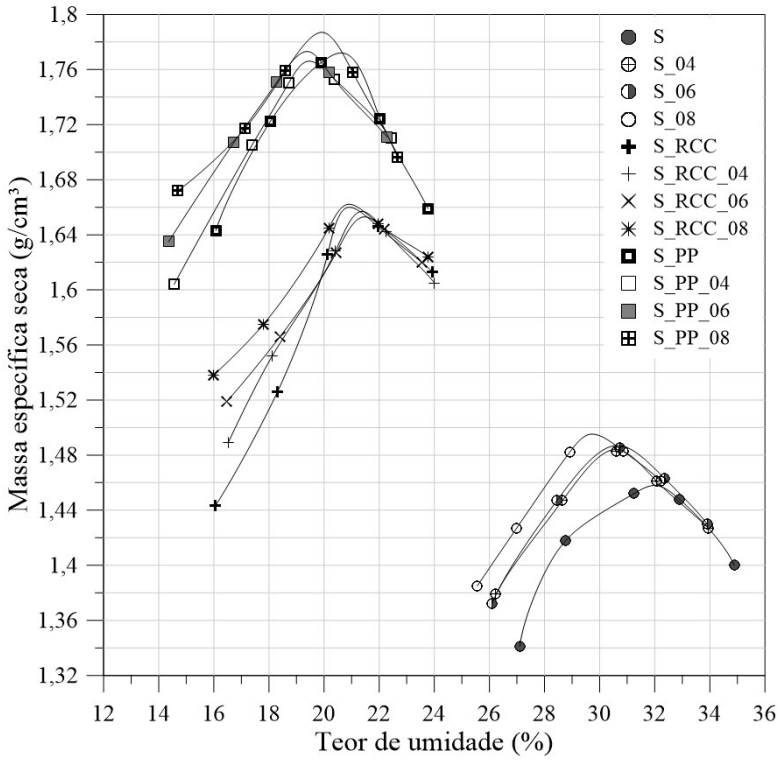


Figura 3. Curvas de compactação das misturas avaliadas

Com o incremento de pó de pedra ao solo-cimento, o aumento da massa específica seca e redução do teor de umidade é em media 19% e 55%, respectivamente. Nas misturas S_PP se observa uma variação mais significativa do teor de umidade.

A preparação das misturas para a moldagem dos corpos de prova foi realizada com base na massa seca, considerando-se a umidade higroscópica dos materiais para efeito de moldagem. Os corpos de prova, de geometria cilíndrica, apresentaram 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A moldagem foi executada empregando o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima determinados pelas curvas de compactação. Cada corpo de prova foi moldado em cinco camadas, garantindo-se grau de compactação mínimo de 95%.

3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

O ensaio de resistência à compressão não confinada foi conduzido em prensa manual, equipada com célula de carga de 20 kN e dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) com curso máximo de 5 mm, instalados no prato metálico da prensa, uma vez que o conjunto foi considerado rígido (Figura 4).

As amostras cimentadas foram ensaiadas após 28 dias de cura. Para cada condição, prepararam-se quatro corpos de prova, mantidos em caixa térmica, em câmara úmida, para minimizar interferências durante a cura. Os corpos de prova eram pesados e imersos em água 24 horas antes da ruptura, visando à saturação e à redução dos efeitos de sucção. No momento do ensaio, eram retirados da imersão, secos superficialmente e pesados novamente para verificar a absorção. As misturas sem cimento foram conservadas sob as mesmas condições, porém rompidas aos 7 dias e sem etapa de imersão, a fim de evitar perda de massa dos corpos de prova.

Como Consoli *et al*. (2007) verificaram que a sucção matricial representou apenas 3% a 8% da resistência de pico em misturas artificialmente cimentadas, sua influência foi considerada secundária, não sendo realizados ensaios específicos de sucção neste estudo.

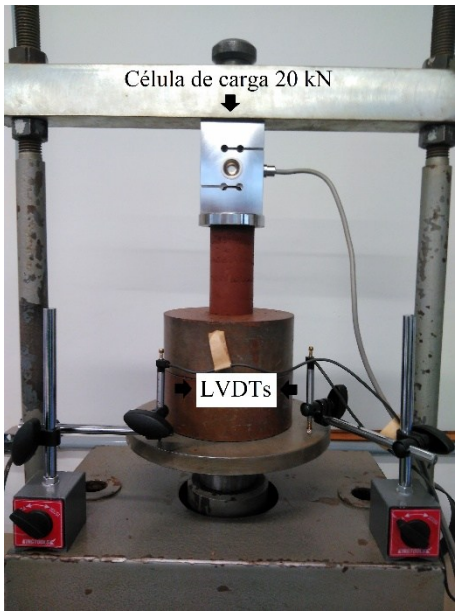


Figura 4. Montagem do ensaio de resistência à compressão não confinada

4 RESULTADOS

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão não confinada são apresentados na Figura 5. Para a mistura solo-cimento, observa-se que a adição de 4% de cimento não promove aumento significativo da resistência em relação ao solo natural, enquanto com 6% e 8% de cimento, os valores de q_u tornam-se cerca de 3 e 6 vezes superiores aos do solo sem cimento, respectivamente.

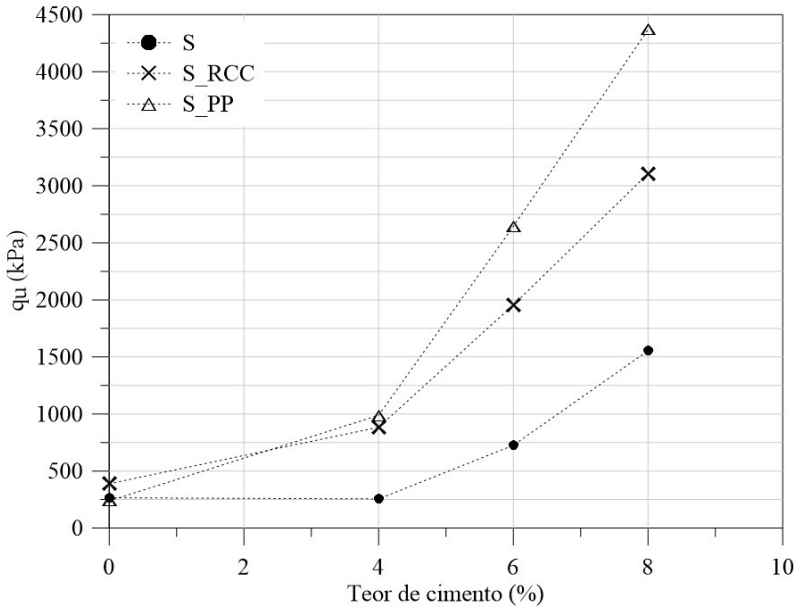


Figura 5. Resistência à compressão não confinada das misturas

Ao contrário da mistura S, S_RCC tem ganho de resistência com 4% de cimento, em que o valor de q_u é o dobro da mistura sem cimento. Com a adição de 6% e 8% de cimento, q_u aumenta 5 e 8 vezes, respectivamente, quando comparada à mistura sem aglomerante. O ganho de resistência de S_RCC cimentada pode estar associado ao menor fator água/cimento devido à menor umidade ótima, colaborando com as reações de hidratação do cimento. Em comparação à mistura sem cimento, a adição do aglomerante em S_PP resulta no aumento dos valores de resistência em 4, 11 e 19 vezes para os teores de 4%, 6% e 8%, respectivamente.

Com 4% de cimento, S_RCC e S_PP desenvolvem resistência semelhante, sendo essa aproximadamente 200% maior que a resistência de S_04. Comparada à mistura S_06, S_RCC_06 tem incremento de resistência de cerca de 156%. Com relação à mistura S_08, o aumento de q_u de S_RCC_08 é de 95%. Comparando S_PP a S, o incremento médio na resistência para teores de 6% e 8% de cimento é de 240% e 165%, respectivamente.

A mistura S_PP_06 apresenta resistência comparável à da S_RCC_08. Assim, os resultados sugerem que a estabilização granulométrica com pó de pedra é mais eficiente do que com RCC, pois permite reduzir o consumo de cimento e, ainda assim, alcançar maiores valores de resistência.

Com base no método de dosagem proposto por Consoli *et al*. (2007), que considera os volumes de vazios e de cimento, foi possível estimar a equação de q_u para as misturas analisadas. A Figura 6 apresenta as respectivas equações e as curvas ajustadas para as três misturas avaliadas com R² acima de 96%: S, S_RCC e S_PP.

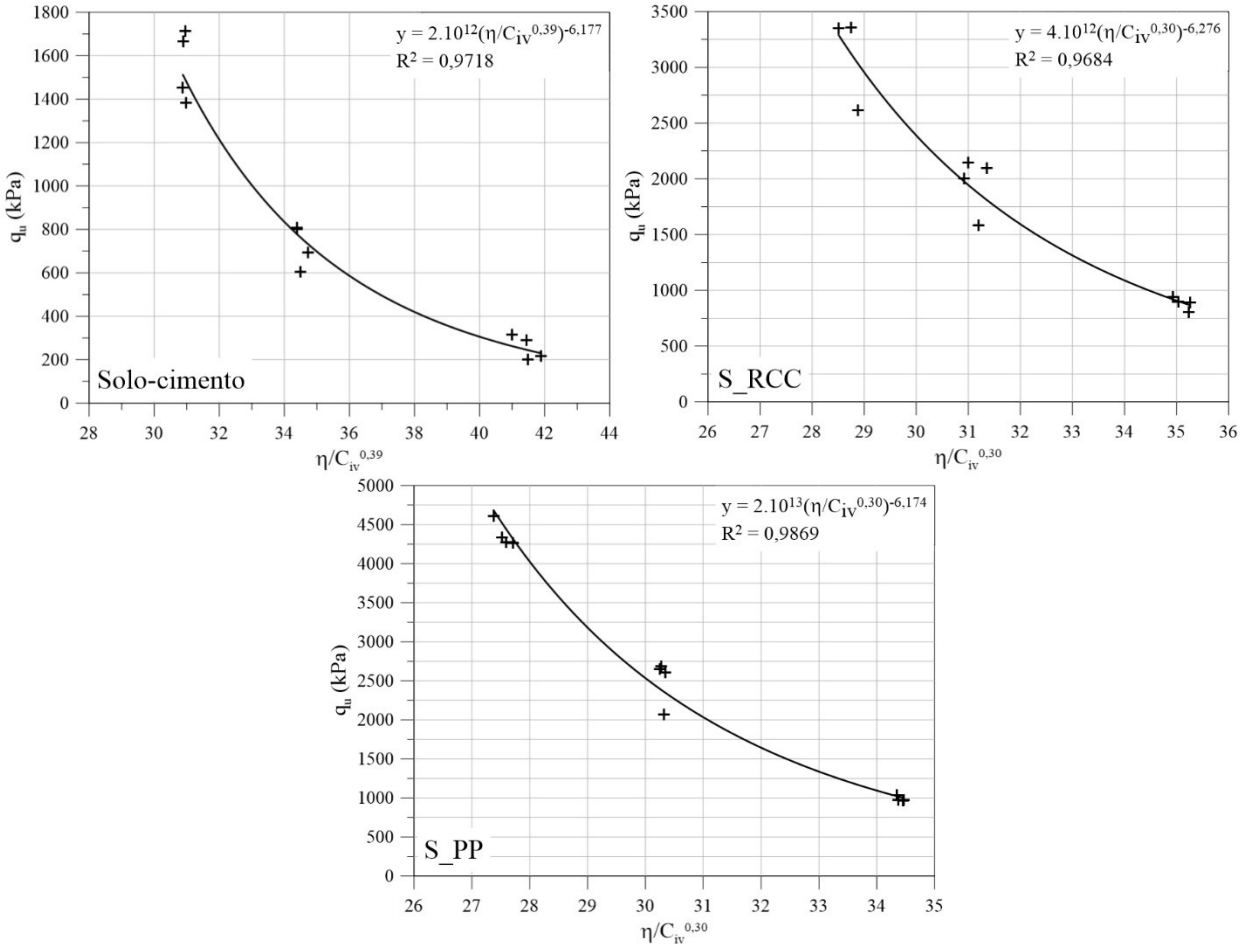


Figura 6. Equações e curvas de dosagem porosidade/cimento das misturas

Na mistura S, o expoente ideal ξ na relação porosidade/cimento foi de 0,39. Esse valor, superior ao reportado por Consoli *et al*. (2011), pode ser atribuído às características do solo adotado neste estudo: uma argila com índice de plasticidade mais elevado do que os solos avaliados pelos autores. Esse comportamento reforça a tendência de solos argilosos apresentarem expoentes maiores, refletindo a maior dependência do cimento para o desenvolvimento de resistência.

Nas misturas S_RCC e S_PP, o ξ ideal foi de 0,30, se aproximando do valor indicado por Consoli *et al*. (2007) para uma areia argilosa. Embora apresentem plasticidade superior à desse material, o expoente encontrado sugere que a correção granulométrica promovida pelos resíduos reduz parcialmente a influência da plasticidade, mantendo, ainda assim, a necessidade de cimento para o ganho de resistência, o que justifica valores de ξ relativamente elevados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a estabilização de um solo argiloso por meio da incorporação de cimento, resíduo de construção civil (RCC) e pó de pedra, com ênfase no desempenho mecânico e na resistência à compressão não confinada, além do ajuste de uma equação de dosagem baseada na relação porosidade/cimento. Os resultados de compactação indicaram que a adição de RCC e pó de pedra reduz a umidade ótima e eleva a massa específica seca máxima, sendo o pó de pedra mais efetivo nesse aspecto.

Do ponto de vista mecânico, as misturas S_RCC apresentaram resistências comparáveis às de misturas solo-cimento com maiores teores de aglomerante, sugerindo potencial de redução do consumo de cimento para atingir a resistência de projeto. Tendência semelhante foi observada para as misturas S_PP, que alcançaram desempenho equivalente ao de composições S e S_RCC com maiores teores de cimento, reforçando a eficiência do pó de pedra como estabilizante granulométrico.

As correlações obtidas pela razão η / C_{iv}^{ξ} apresentaram coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios para todas as misturas. Os expoentes ξ ajustados também foram coerentes com os ensaios de resistência, evidenciando maior dependência do teor de cimento na mistura S, enquanto S_RCC e S_PP exibiram comportamento semelhante em relação à variação do aglomerante.

AGRADECIMENTOS

À UEM por permitir o uso de suas instalações e laboratórios para o desenvolvimento dessa pesquisa. Aos técnicos pela colaboração na realização do ensaios. E à CAPES pelo financiamento proporcinado que colaborou para os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Briskievicz, J. F. Luz, C. A. Souza, F. B. (2025). Making Use of Construction Waste in Soil-Cement Mixtures: Granulometric Correction of Clay Soil. *ACS Omega*, 10, 39471 – 39481.

Consoli, N. C. Foppa, D. Festugato, L. Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133: 197-205.

Consoli, N. C. Rosa, A. D. Corte, M. B. Lopes Jr. L. S. Consoli, B. S. (2011). Porosity-cement ratio controlling strength of artificially cemented clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*. J. Mater. Civ. Eng. 2011, 23: 1249-1254.

Kianimehr, M. Shourijeh, P. T. Binesh, S. M. Mohammadinia, A. Arulrajah, A. (2019). Utilization of recycled concrete aggregates for ligth stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*, 227, 116792.

Mishra, S. Sachdeva, S. N. Manocha, R. (2019). Subgrade soil stabilization using stone dust and coarse aggregate: a cost effective approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5:20.

Pissato, E. Soares, L. (2006). Utilização de finos de pedreira em misturas de solo cimento: correção granulométrica de um solo argiloso. *Exacta*, vol. 4, n° 1. p. 143-148. São Paulo.

Suluguru, A. K. Surana, S. R. Guharay, A. Kar, A. Muktinutalapati, J. (2018). Experimental Investigations on Building Derived Materials in Chemically Aggressive Environment as a Partial Replacement of Soil in Geotechnical Applications. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37:947–963. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0662-0.

Yilmaz, F. Yurdakul, M. (2017). Evaluation of marble dust for soil stabilization. *Acta Physica Polonica A*, Vol. 132, n° 3.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/57

Análise do potencial de aplicação de resíduos de ETA a partir de estudos de suas características geotécnicas, mineralógicas e físico-químicas

Ramon Felipe dos Santos
Pesquisador, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, ramon.felipe@usp.br

Rayanne Karlla Santos da Silva
Doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, rayanne.karlla@ufpe.br

Jefferson Lins da Silva
Docente, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A potabilização da água gera volumes expressivos de lodo de ETA, um resíduo cuja gestão inadequada representa um severo passivo ambiental. Este subproduto é composto majoritariamente por sólidos suspensos da água bruta e hidróxidos metálicos derivados de coagulantes (alumínio ou ferro). O objetivo deste trabalho é analisar as propriedades físico-químicas e mineralógicas do resíduo, avaliando sua viabilidade técnica em obras de infraestrutura e materiais de construção. A metodologia consistiu em uma revisão sistemática e análise técnica de estudos, focando em ensaios de caracterização e aspectos ligados a compactação e resistência de misturas solo-lodo, além de análises físico-químicas e mineralógicas. Os resultados indicam que o lodo possui alta plasticidade e predominância de fases amorfas, quartzo e caulinita. As conclusões apontam que, embora o lodo de ETA altere a compressibilidade dos solos, sua incorporação em obras de infraestrutura e componentes estruturais é tecnicamente viável. Assim, a transformação do lodo de resíduo em insumo promove a economia circular, mitigando impactos em corpos hídricos e preservando jazidas naturais, desde que respeitados os limites de desempenho mecânico e segurança ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de ETA, valorização de resíduos, caracterização geotécnica, materiais de construção sustentáveis.

ABSTRACT: The potabilization of water generates significant volumes of WTP sludge, a waste product whose inadequate management represents a severe environmental liability. This byproduct is primarily composed of suspended solids from raw water and metallic hydroxides derived from coagulants (aluminum or iron). The objective of this work is to analyze the physicochemical and mineralogical properties of the waste, evaluating its technical feasibility in infrastructure projects and construction materials. The methodology consisted of a systematic review and technical analysis of studies, focusing on characterization tests and aspects related to the compaction and strength of soil-sludge mixtures, in addition to physicochemical and mineralogical analyses. The results indicate that the sludge possesses high plasticity and a predominance of amorphous phases, quartz, and kaolinite. The conclusions point out that, although WTP sludge alters soil compressibility, its incorporation into infrastructure works and structural components is technically viable. Thus, the transformation of sludge from waste into a raw material promotes the circular economy, mitigating impacts on water bodies and preserving natural deposits, provided that mechanical performance limits and environmental safety are respected.

KEYWORDS: Water Treatment Plant Sludge, waste valorization, geotechnical characterization, sustainable construction materials.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, os resíduos provenientes de estações de tratamento de água (ETAs) têm sido tratados como subprodutos de baixo valor agregado, frequentemente classificados como materiais sem aplicabilidade técnica definida. Essa percepção decorre, em grande medida, da limitada disponibilidade de alternativas

consolidadas para sua destinação ambientalmente adequada e tecnicamente viável. Em diversos contextos, observa-se a inexistência ou insuficiência de rotas estruturadas de reaproveitamento, o que resulta em práticas de descarte que nem sempre priorizam a valorização do material (Roque et al. 2021; Montalvan et al. 2019). A carência de diretrizes normativas específicas, aliada à escassez de estudos sistemáticos sobre caracterização físico-química, comportamento geotécnico e desempenho ambiental desses resíduos, contribui para sua subutilização. Como consequência, esses materiais deixam de ser explorados em aplicações potenciais, como em obras de infraestrutura, camadas de cobertura, materiais de preenchimento ou componentes de sistemas de engenharia ambiental. Contudo, à medida que avançam as pesquisas voltadas à economia circular e à gestão sustentável de resíduos, cresce o reconhecimento do potencial técnico desses subprodutos, desde que devidamente caracterizados e submetidos a critérios rigorosos de desempenho e segurança ambiental (Ferreira et al., 2019; Silva e Hemsi, 2018).

Apesar da quantidade considerável de lodo produzida em instalações de tratamento de água, sua aplicação prática permanece significativamente restrita, com o descarte em aterros sanitários emergindo como a principal saída. Conforme relatado por Richter (2001), a geração de lodo pode constituir até 5% do volume de água tratada, ressaltando assim as possíveis ramificações ecológicas associadas ao seu manejo inadequado. Embora a reutilização de lodo em aplicações geotécnicas ainda não seja uma prática bem estabelecida, investigações recentes corroboraram a viabilidade técnica dessa alternativa. Pesquisa conduzida por Roque et al. (2021) revela que a integração do lodo ETA em solos lateríticos gera modificações controladas nos atributos físicos e mecânicos, preservando parâmetros que são congruentes com o uso em camadas de aterros sanitários e terraplenagem. Na mesma linha, Montalvan (2016) e Ferreira et al. (2019) relataram alterações na resistência ao cisalhamento e compressibilidade, sem tornar sua aplicação inviável sob requisitos de projeto particulares.

No exterior, O'Kelly (2016) estudou o comportamento geotécnico do lodo e resíduos municipais para descarte regulamentado, enfatizando a necessidade de uma caracterização específica adaptada a cada aplicação. Embora o potencial de reutilização esteja alinhado aos princípios da economia circular defendidos pela *Ellen MacArthur Foundation (2013)* – (voltada na percepção sobre a finitude dos recursos naturais em aspectos para reposicionar a economia circular no centro das decisões empresariais, políticas e acadêmicas), os persistentes impedimentos técnicos, regulatórios e culturais continuam impedindo sua ampla investigação e implementação.

Este artigo analisa de forma integrada as características geotécnicas, mineralógicas e físico-químicas de resíduos de estações de tratamento de água, avaliando seu potencial de aplicação em obras de infraestrutura. A partir de parâmetros geotécnicos e de aspectos físico-químicos discutidos na literatura, discute-se a viabilidade desses resíduos como materiais alternativos em estruturas geotécnicas, contribuindo para soluções mais sustentáveis na engenharia.

2 INTERPRETAÇÃO GEOTÉCNICA

Uma vez gerados nas diferentes etapas do processo de tratamento (exemplo a unidade de tratamento do Guaraú administrado pela SABESP - Fig. 1a), os resíduos de ETAs (exemplo Fig. 1b) tendem a se acumular no fundo das unidades operacionais, como decantadores, flotadores e canais de drenagem, em decorrência dos mecanismos de sedimentação, coagulação e floculação empregados na remoção de partículas e impurezas da água bruta. Esse material sólido é formado principalmente pelo escoamento conduzido às estruturas de contenção e pela deposição gravitacional dos flocos produzidos durante o tratamento, concentrando-se no fundo dos tanques como lodo. Posteriormente, esse lodo é removido por sistemas de descarga hidráulica ou raspagem mecânica, sendo encaminhado para etapas de adensamento, desaguamento e destinação final.



a) b)

Figura 1. a) Estação de Tratamento de Guaraú; adaptado de SABESP (2026); b) Lodo de ETA; adaptado de Roque et al. (2021).

O'Kelly (2006) destaca que o comportamento geotécnico de materiais finos é fortemente influenciado pela mineralogia, microestrutura e histórico de tensões, ressaltando a necessidade de caracterização integrada para prever compressibilidade e resistência. Esses aspectos são particularmente relevantes para lodos de ETA, cujo desempenho pode variar significativamente conforme a estrutura inicial e as condições de carregamento e umidade.

Montalvan e Boscov (2016) avaliaram misturas solo–lodo de ETA, observando que a adição de cerca de 6% de lodo (massa seca) a um solo laterítico arenoso argiloso não alterou significativamente os limites de consistência nem a classificação geotécnica, embora tenha aumentado a compressibilidade. Apesar disso, o comportamento da mistura foi considerado tecnicamente aceitável para aplicações em obras geotécnicas, desde que controladas as condições de umidade e compactação.

Em virtude da diversidade de aplicações em obras de engenharia de infraestrutura, a compreensão detalhada do comportamento do material torna-se fundamental para garantir o adequado desempenho técnico da estrutura ao longo de sua vida útil. A caracterização geotécnica permite avaliar se o material atende às exigências específicas de projeto, seja quanto à sua capacidade de suporte e resistência mecânica, ao controle de deformações, à redução da permeabilidade para impedir ou controlar o escoamento de fluidos, ou ainda à sua atuação como material complementar em misturas com solos naturais ou outros insumos da construção. Assim, o entendimento de suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas é condição indispensável para assegurar estabilidade, durabilidade e segurança nas diferentes soluções de engenharia.

A Tabela 1 apresenta uma compilação de diferentes estudos realizados em distintas épocas e localidades, reunindo propriedades geotécnicas de resíduos provenientes de estações de tratamento de água. A organização comparativa desses dados permite observar a variabilidade dos parâmetros físicos e mecânicos em função da origem do material, das condições operacionais das ETAs, contribuindo para uma análise mais abrangente sobre o comportamento geotécnico desses resíduos e seu potencial de aplicação em obras de infraestrutura (em que GS-massa especifica dos sólidos; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade).

Tabela 1 - Dados de plasticidade de lodo de ETA reportados na literatura

Referência	GS	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Silva e Hemsi (2018)	2,8	228–156	85–75	154–71
Zekkos et al. (2017)	2,7	38	32	6
Gonçalves et al. (2017)	2,7	–	NR	NR
Basim (1999)	2,7–1,7	690–53	228–NR	670–NR
Dąbska (2019)	2,8–2,7	63–58	41–34	31–17
Shah et al. (2020)	2,5-2,8	40-55	NR - 30	NR - 34
Scapin et al. (2021)	2,4-2,7	40-43	20-36	NR- 20
Silva (2021)	2,4	536	236	300
O'Kelly e Quille (2009)	2,0–1,8	550–430	325–240	290–105
O'Kelly (2008)	1,9	490	240	250
Arulrajah et al. (2013)	1,8	110	80	30
Aydilek et al. (1999)	1,8	–	NR	NR
Bağrıaçık e Güner (2020)	–	98	45	53
Machado e Müller (2019)	–	–	NR	NR

Fonte: adaptada de Marchiori et al. (2023).

Os dados da tabela 1, demonstram uma variabilidade significativa nas características físicas do lodo, o que reflete discrepâncias ligadas à proveniência da água bruta. A massa específica de sólidos (Gs) apresenta uma faixa de aproximadamente 1,8 a 2,8, frequentemente caindo abaixo dos solos argilosos naturais, o que pode ser atribuído à presença de hidróxidos de alumínio e ferro, componentes amorfos e, em certos casos, matéria orgânica. Os limites de liquidez são amplamente dispersos, abrangendo proporções moderadas a extremamente altas, ultrapassando 500%, o que coloca assim uma afinidade pela água e uma arquitetura predominantemente floculada e coloidal. O limite de plasticidade e, consequentemente, o índice de plasticidade também manifestam uma variabilidade considerável, incorporando comportamentos não plásticos e índices altos, o que significa que o material pode apresentar características que variam do comportamento granular ao altamente plástico. No contexto geotécnico, limites e índices elevados de plasticidade estão correlacionados com maior compressibilidade e maior sensibilidade às variações no teor de umidade, enquanto valores reduzidos sugerem um comportamento mais granular, particularmente após processos de dessecação. Coletivamente, os resultados das características do lodo ETA, representa uma substância heterogênea, cuja aplicação exige uma caracterização criteriosa e específica para cada fonte, particularmente quando se destina ao uso em camadas impermeabilizantes ou sistemas de barreira.

Contudo, cabe destacar que as propriedades dos resíduos de estações de tratamento de água apresentam variações significativas conforme a localidade de geração, sobretudo em função dos diferentes processos de tratamento empregados, tais como tipo e dosagem de coagulantes (à base de alumínio ou ferro por exemplo), condições de floculação, sistemas de desaguamento e métodos de disposição. Essas variáveis influenciam diretamente a composição mineralógica, a estrutura microfloculada e o teor de matéria orgânica do lodo, refletindo em comportamentos geotécnicos distintos. Em especial, parâmetros relacionados à resistência mecânica, como coesão não drenada e ângulo de atrito interno, à resistência ao cisalhamento e ao desempenho sob esforços de compressão, bem como às características de compactação (umidade ótima e massa específica seca máxima), têm sido reportados com ampla dispersão em diferentes estudos (Montalvan, 2020; Boscov et al., 2021; Tsugawa e Boscov, 2023; Fendrich et al., 2024), reforçando a necessidade de caracterização específica para cada fonte de resíduo. Tal variabilidade reforça a necessidade de caracterização específica para cada fonte de resíduo, evitando generalizações e assegurando maior confiabilidade técnica na sua aplicação em obras de infraestrutura.

3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

No que se refere à análise em escala composicional e aos aspectos físicos, químicos, biológicos e mineralógicos do lodo de ETA, ressalta-se que sua constituição exerce influência determinante sobre o comportamento geoquímico do material e, por conseguinte, sobre seu potencial de impacto ambiental. A natureza das fases minerais predominantes, frequentemente associadas a hidróxidos de ferro e alumínio formados a partir do uso de coagulantes, bem como a presença de argilominerais, matéria orgânica e frações finas, condiciona propriedades como reatividade superficial, capacidade de adsorção, troca iônica e estabilidade química. Esses fatores controlam diretamente a retenção ou a mobilização de espécies químicas potencialmente agressivas e tóxicas, especialmente em cenários de exposição a variações de pH, potencial redox e percolação de fluidos. A depender da composição mineralógica e das condições ambientais, pode ocorrer a liberação de metais e outros constituintes adsorvidos ou coprecipitados, elevando o risco de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Dessa forma, a caracterização mineralógica detalhada do lodo de ETA constitui etapa essencial na avaliação de sua viabilidade de disposição ou reaproveitamento, fornecendo subsídios técnicos para a análise de estabilidade e segurança ambiental a curto, médio e longo prazo.

Se tratando da composição química, a composição do lodo de ETA está intrinsecamente ligada ao tipo de coagulante que utilizado durante o processo de tratamento: i. Influência do Coagulante: Lodos provenientes de estações que utilizam sulfato de alumínio apresentam altas concentrações de alumínio, enquanto o uso de cloreto férrico resulta em lodos ricos em ferro (Boscov et al. 2021). ii. Constituintes Orgânicos e Inorgânicos: O resíduo contém matéria orgânica proveniente da água bruta e subprodutos químicos do tratamento (Roque e Carvalho, 2006). iii. Mineralogia: A fase mineral é frequentemente composta por minerais argilosos, quartzo e hidróxidos metálicos amorfos ou cristalinos resultantes da coagulação. No caso de lodos de indústrias de

celulose, pode haver a presença de "dregs" (resíduos de calcinação) quando misturados para a produção cerâmica (Wolff et al. 2007).

A presença de matéria orgânica, que em alguns casos atinge teores de 15,5%, atua como um agente estruturante que retém grandes volumes de água, resultando em altos limites de Atterberg e um comportamento compressível sob carga (Tsugawa e Boscov, 2023). Do ponto de vista químico, a composição é dominada por óxidos metálicos, especialmente alumínio e ferro, dependendo do coagulante empregado (sulfato de alumínio ou cloreto férrico). Além disso, estudos recentes destacam a presença de micropoluentes, como resíduos farmacêuticos em lodos de esgoto, o que exige cautela em sua aplicação direta no solo sem tratamento prévio de estabilização (Bisognin et al. 2021; Müller et al. 2023; Studart et al. 2023). A mineralogia desses resíduos revela uma predominância de fases amorfas, embora minerais como quartzo e caulinita sejam frequentemente identificados, refletindo a geologia da bacia hidrográfica de origem. O uso de aditivos, como cal ou cimento, tem sido explorado para melhorar a estabilidade mecânica e reduzir a lixiviação de metais, tornando o lodo apto para uso em coberturas de aterros sanitários ou como material para cerâmica estrutural.

A Tabela 2 apresenta a compilação dos principais constituintes identificados em estudos selecionados da literatura, permitindo uma análise comparativa entre diferentes materiais, metodologias e contextos experimentais. Esse compilado contribui para a compreensão das variações composicionais observadas, bem como para a identificação de tendências e lacunas de conhecimento relevantes ao tema investigado.

Tabela 2 - Resumo das pesquisas sobre aspectos físico-químicos e mineralógicos

Categoria	Constituintes e Propriedades Principais	Autores de Referência
Químicos (Óxidos e Metais)	Predominância de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. Presença de CaO, MgO e traços de metais pesados (Bário, Mercúrio).	Boscov, Tsugawa e Montalvan (2021); Roque e Carvalho (2006); Fiore et al (2020).
Mineralógicos	Elevado teor de matéria amorfa; presença de Quartzo, Caulinita, Gibbsita e Goethita.	Roque, Montalvan e Boscov (2021); Studart et al. (2023)
Físicos e Geotécnicos	Alta umidade natural, baixa massa específica seca, alta plasticidade e compressibilidade. Alteração da curva de compactação em solos.	Montalvan (2020); Fendrich et al. (2024); Tsugawa e Boscov (2023).
Orgânicos e Contaminantes	Matéria orgânica (até 15,5%); presença de micropoluentes como fármacos (Sulfonamidas, Fluoroquinolonas) e microrganismos.	Bisognin et al. (2021); Roque et al. (2021); Andreoli et al. (2008)
Aplicações e Reuso	Cerâmica vermelha (tijolos e telhas), coberturas de aterros, base de pavimentos e adensamento em bags geotéxteis.	Wolff et al. (2007); Tsugawa e Boscov (2023); Müller et al. (2023).
Parâmetros Químicos de Solo	Solo ácido (pH ≈ 6,4) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC) elevada (73,3 mmolc/kg).	Roque, Montalvan e Boscov (2021).
Aditivos e Misturas	Uso de cal, cimento, cinzas de biomassa vegetal (VBA) e resíduos industriais ("dregs").	Studart et al. (2023); Wolff et al. (2007); Tsugawa e Boscov (2023).

Fonte: Autores (2026).

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o potencial de aplicação do lodo de ETA está diretamente associado aos seus constituintes físico-químicos e mineralógicos apresentados na Tabela 2. Observou-se predominância de fases amorfas, quartzo, caulinita, óxidos de alumínio e ferro, além de elevada plasticidade, alta umidade e variabilidade composicional, características que condicionam seu desempenho geotécnico e ambiental. Esses aspectos evidenciam que o comportamento do resíduo não pode ser interpretado de forma isolada, sendo necessária uma avaliação conjunta entre composição, estrutura e resposta mecânica para definição de aplicações tecnicamente seguras.

A análise integrada permitiu verificar que não existe uma aplicação universal para o resíduo, sendo sua viabilidade dependente da compatibilidade entre composição, processamento e requisitos de desempenho da aplicação final. Os estudos revisados indicam potencial para uso em coberturas de aterros, misturas solos–resíduo, materiais cerâmicos e aplicações geotécnicas de baixa solicitação. Entretanto, o aproveitamento do material requer caracterização prévia e controle das propriedades relacionadas à resistência, compressibilidade, estabilidade química e interação com o meio, de forma a minimizar riscos ambientais e garantir desempenho adequado em longo prazo.

Além disso, observou-se que diferenças associadas à origem da água bruta, aos processos de tratamento empregados e ao tipo de coagulante utilizado influenciam diretamente as propriedades finais do lodo, reforçando a necessidade de avaliações específicas para cada cenário de aplicação. Nesse contexto, a adoção de abordagens integradas de caracterização torna-se essencial para ampliar a confiabilidade técnica e reduzir incertezas relacionadas ao reaproveitamento do material.

Dessa forma, este trabalho contribui ao consolidar evidências de que a caracterização integrada dos constituintes do lodo constitui etapa essencial para transformar um passivo ambiental em recurso técnico, fortalecendo princípios de economia circular e reduzindo a demanda por materiais naturais. Ao reunir resultados geotécnicos, mineralógicos e físico-químicos reportados na literatura, o estudo fornece subsídios para futuras aplicações em engenharia e para o desenvolvimento de critérios mais consistentes de aproveitamento sustentável de resíduos de ETA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreoli, C. V.; Garbossa, L. H. P.; Lupatini, G.; Pegorini, E. S. (2008) Wastewater sludge management: A Brazilian approach. In: Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), p. 117–130.

Arulrajah, A.; Disfani, M. M.; Suthagaran, V.; Bo, M. W. (2013) Laboratory evaluation of the geotechnical characteristics of wastewater biosolids in road embankments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (11), p. 1682–1691. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000739.

Aydilek, A. H.; Edil, T. B.; Fox, P. J. (1999) Consolidation Characteristics of Wastewater Sludge. In: Edil, T. B.; Fox, P. J. (eds.) *Geotechnics of High Water Content Materials*. ASTM STP 1374. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Bağrıaçık, B.; Güner, E. D. (2020) An Experimental Investigation of Reinforcement Thickness of Improved Clay Soil with Drinking Water Treatment Sludge as an Additive. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, p. 3619–3627. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-020-0111-5.

Basim, S. C. (1999) Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals. Dissertation, New Jersey Institute of Technology. Disponível em: https://digitalcommons.njit.edu/dissertations/977.

Bisognin, R. P.; Wolff, D. B.; Carissimi, E.; Prestes, O. D.; Zanella, R. (2021) Occurrence and fate of pharmaceuticals in effluent and sludge from a wastewater treatment plant in Brazil. *Environmental Technology*, 42 (15), p. 2292–2303. DOI: https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1701561.

Boscov, M. E. G.; Tsugawa, J. K.; Montalvan, E. L. T. (2021) Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. *Sustainability*, 13 (17), art. 9848. DOI: https://doi.org/10.3390/su13179848.

Dąbska, A. (2019) Hydraulic conductivity of compacted lime-softening sludge used as landfill liners. *Water, Air and Soil Pollution*, 230, art. 280. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-019-4281-z.

Ellen MacArthur Foundation (2013) Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation.

Fendrich, B. W.; Souza, S. G.; Souza, A. A. U.; Aguiar, C. R. (2024) Lodo proveniente de ETA desidratado com emprego de manta geotêxtil: revisão bibliográfica. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7 (2), e70824. DOI: https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-110.

Ferreira, K. S. M.; Montalvan, E. L. T.; Sawatani, T. F.; Boscov, M. E. G. (2019) Influência da secagem nos parâmetros de resistência à compressão simples de misturas compactadas de solos lateríticos com lodo de ETA. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 9. Anais..., p. 353–360.

Fiore, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. (2020) Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. *Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 15 (5), p. 1–12. DOI: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565.

Gonçalves, F.; Souza, C. H. U.; Tahira, F. S.; Fernandes, F.; Teixeira, R. S. (2017) Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Revista DAE*, 65, p. 5–14. DOI: https://doi.org/10.4322/dae.2016.018.

Machado, M. F. B.; Müller, M. C. R. (2019) Avaliação das características geotécnicas do lodo de estação de tratamento de água frente à bentonita. Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Marchiori, L.; Albuquerque, A.; Cavaleiro, V. (2023) Water Treatment Sludge as Geotechnical Liner Material: State-of-Art. In: Yukselen-Aksoy, Y.; Reddy, K. R.; Agnihotri, A. K. (eds.) *Sustainable Earth and Beyond*. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 370. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4041-7_47.

Montalvan, E. L. T. (2020) Geotechnical properties of mixtures of water treatment sludge and residual lateritic soils from the State of São Paulo. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: https://doi.org/10.11606/T.3.2020.tde-08032021-094316.

Montalvan, E. L. T.; Boscov, M. E. G. (2016) Geotechnical characterization of a soil-water treatment sludge mixture. In: Geo-Chicago 2016, p. 418–427.

Montalvan, E. L. T.; Ferreira, K. S. M.; Godoy, R. V. S.; Boscov, M. E. G. (2019) Influence of water treatment sludge addition on the compressibility and shear strength parameters of two lateritic soils. In: Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16. Anais..., p. 2422–2430. DOI: https://doi.org/10.3233/STAL190310.

Müller, M.; Vidal, D.; Guanaes, E. A.; Freitas, M. R. de. (2023) Sludge dewatering with geotextile refill in a draining container: case study in a water treatment plant. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 16 (45), p. 1732–1747. DOI: https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n45-016.

O'Kelly, B. C.; Quille, M. E. (2009) Compressibility and consolidation of water treatment residues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*, 162 (2), p. 85–97. DOI: https://doi.org/10.1680/warm.2009.162.2.85.

O'Kelly, B. C. (2008) Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (5), p. 715–725. DOI: https://doi.org/10.1139/T07-109.

O'Kelly, B. C. (2006) Geotechnical properties of municipal sewage sludge. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, p. 833–850. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-005-6611-8.

O'Kelly, B. C. (2016) Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. *Geotechnical Research*, 3 (4), p. 148–179. DOI: https://doi.org/10.1680/jgere.16.00013.

Richter, C. A. (2001) Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher.

Roque, A. J.; Carvalho, M. (2006) Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 5, Cardiff, UK. Anais..., v. II, London: Thomas Telford / ICE Publishing, p. 1535–1542. DOI: https://doi.org/10.1680/ieg.34747.1535.

Roque, A.; Montalvan, E. L. T.; Boscov, M. E. G. (2021) Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba. *Revista Geotecnia*, 151, p. 33–52. DOI: https://doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.03.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2026) Visite a Sabesp. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/a-sabesp/educacao/visite-sabesp. Acesso em: 25 fev. 2026.

Scapin, J.; Santos, E. F.; Pinheiro, R. J. B. (2021) Análise de misturas de lodo de ETA com solo siltoso da região de Santa Maria – RS. In: Encontro Nacional de Lodo de Estação de Tratamento de Água, 1. Anais..., p. 6–9.

Shah, S. A. R.; Mahmood, Z.; Nisar, A.; Aamir, M.; Farid, A.; Waseem, M. (2020) Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. *Construction and Building Materials*, 230, art. 116953. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116953.

Silva, A. R. da. (2021) Comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica e lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba, município de Suzano, São Paulo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: https://doi.org/10.11606/D.3.2021.tde-28092021-153915.

Silva, A. S.; Hemsi, P. S. (2018) Efeito do teor de sólidos na resistência ao cisalhamento de um lodo de ETA visando seu uso em cobertura diária de aterros sanitários. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19. Anais.

Studart, A.; Marchiori, L.; Albuquerque, A.; Cavaleiro, V.; Boscov, M. E. G.; Rocha, F.; Silva, E. F. (2023) Geotechnical comparison of water treatment sludge and biomass ashes for soft soils' application: a greener approach analysis. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 9, Chania, Greece. Anais..., Chania: ISSMGE, p. 196–205. DOI: https://doi.org/10.53243/ICEG2023-268.

Tsugawa, J. K.; Boscov, M. E. G. (2023) Potential reuse of drinking water treatment sludge mixed with additives in landfills covers or other low solicitation applications. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 9, Chania, Crete. Anais..., Chania: ISSMGE, v. 4. DOI: https://doi.org/10.53243/ICEG2023-234.

Wolff, E.; Schwabe, W. K.; Landim, A. B.; Vitorino, M. D.; Santos, W. L. (2007) A substituição da argila por lodo de ETA na produção de cerâmica vermelha. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51, São Paulo. Anais..., p. 14–29.

Zekkos, D. F. X.; Li, L.; Woods, R.; Sanford, L. (2017) Geo-characterisation of lime water treatment sludge. *Environmental Geotechnics*, 4 (3), p. 209–219. DOI: https://doi.org/10.1680/jenge.15.00028.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/58

Análise Estatística (ANOVA) Aplicado ao Estudo da Resistência à Compressão de um Solo-Cimento Estabilizado com Resíduo de Construção Civil

Anna Clara Ploeger Biffe
Engenheira civil, UEM, Maringá, Brasil, annacpbiffe@gmail.com

Juliana Maria de Souza
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Gleicy Loany de Alencar Cardoso
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, pg56011@uem.br

Juliana Azoia Lukiantchuki
Professora Associada, UEM, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

RESUMO: A busca por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o aproveitamento de resíduos na melhoria de solos, aliando desempenho técnico à responsabilidade ambiental. Este trabalho apresenta um estudo de confiabilidade estatística na validação de resultados laboratoriais de resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com resíduo de construção civil (RCC) e cimento. A estabilização granulométrica com RCC visa não apenas o reaproveitamento ambientalmente adequado do resíduo, mas também a melhoria das propriedades geotécnicas do solo e a redução do uso de aglomerantes. Foram realizados ensaios laboratoriais com diferentes teores de cimento (0%, 4%, 6% e 8%) e tempos de cura (7 a 28 dias). Os dados passaram por testes de normalidade e homocedasticidade, atendendo aos pressupostos do ANOVA. Os resultados indicaram influência significativa do teor de cimento e do tempo de cura na resistência, com ganhos superiores a 30%. O teste de Tukey identificou diferenças estatísticas entre as misturas, revelando que análises estatísticas e geotécnicas podem divergir quanto à interpretação dos ganhos de resistência. Modelos de regressão linear explicaram parte significativa da variação nos resultados, e as superfícies de resposta demonstraram de forma clara a interação entre os parâmetros analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estatística, ANOVA, Resistência à compressão não confinada, Solo-cimento, Resíduo de construção civil.

ABSTRACT: The pursuit of sustainable solutions in geotechnical engineering has driven the reuse of waste materials to improve soil performance while promoting environmental responsibility. This study presents a statistical reliability analysis to validate laboratory results of unconfined compressive strength for a lateritic clayey soil stabilized with construction waste (CW) and cement. Particle size stabilization using CW aims not only to provide an environmentally sound destination for the waste but also to enhance geotechnical properties and reduce the use of binders. Laboratory tests were carried out with different cement contents (0%, 4%, 6%, and 8%) and curing periods ranging from 7 to 28 days. Data were subjected to normality and homoscedasticity tests, meeting the assumptions for ANOVA. Results showed a significant influence of cement content and curing time on strength, with average gains exceeding 30%. Tukey's test identified statistical differences among mixtures, highlighting that statistical and geotechnical interpretations may diverge, as statistically similar mixtures can present meaningful geotechnical gains depending on practical applications. Linear regression models explained a considerable portion of the variability in strength results, and response surface methodology clearly demonstrated the interaction between cement content, curing time, and the effect of CW incorporation.

KEYWORDS: Statistical analysis, ANOVA, Unconfined compressive strength, Soil-cement, Construction waste.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia civil tem impulsionado a busca por alternativas ao uso intensivo de recursos naturais, especialmente no campo da geotecnia. Uma das estratégias mais promissoras é o aproveitamento de resíduos sólidos, como o resíduo de construção civil (RCC), na estabilização de solos, com destaque para misturas de solo-cimento. Essa prática contribui não apenas para a melhoria do desempenho mecânico dos solos, mas também para a mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos e pela extração excessiva de materiais naturais (Kumar et al, 2021; Kaur et al, 2022).

Estudos recentes demonstram que a adição de RCC a solos argilosos, em combinação com cimento, pode promover ganhos significativos na resistência mecânica e na durabilidade do material, sendo aplicável em obras de infraestrutura, como pavimentações e fundações (Yuan et al, 2023; Kumar e Arora, 2020). Contudo, a heterogeneidade dos materiais envolvidos, bem como as variações intrínsecas dos solos naturais, introduzem um nível elevado de variabilidade nos resultados obtidos em ensaios laboratoriais, exigindo uma abordagem estatística rigorosa para validar os dados e interpretar os efeitos dos parâmetros analisados (Rahman et al, 2020).

Nesse contexto, a resistência à compressão não confinada (q_u) se destaca como um parâmetro essencial na avaliação do comportamento de misturas solo-cimento e solo com RCC, por sua simplicidade de execução e sensibilidade às variações nos teores de ligante e nos tempos de cura (Kardani et al, 2021). A análise estatística, por sua vez, possibilita a identificação de tendências, relações causais e a análise da confiabilidade dos resultados experimentais, especialmente quando associada a ferramentas como a análise de variância (ANOVA), testes de comparações múltiplas (Tukey) e modelos de regressão linear (Dejarnette e Mamidala, 2023; Ialongo, 2021).

A aplicação dessas técnicas estatísticas permite não apenas verificar a significância das diferenças observadas entre os tratamentos testados, mas também modelar o comportamento das misturas em função de variáveis como o teor de cimento e o tempo de cura. O uso de testes de normalidade e homocedasticidade assegura a validade das inferências realizadas via ANOVA, enquanto os testes pós-ANOVA, como o de Tukey, oferecem um detalhamento mais preciso sobre as combinações com desempenho estatisticamente distinto. Além disso, a utilização de modelos de regressão e superfícies de resposta contribui para a construção de modelos preditivos robustos, capazes de estimar o comportamento do solo estabilizado e fornecer subsídios quantitativos para o projeto e aplicação em campo (Tabachnick e Fidell, 2019; Bewick et al, 2021).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar estatisticamente a resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento Portland e RCC, por meio de testes laboratoriais e aplicação de métodos estatísticos inferenciais. Dessa forma, se busca compreender a influência dos teores de cimento e do tempo de cura sobre o desempenho das misturas, contribuindo para o avanço no uso sustentável de materiais na engenharia geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O levantamento de dados experimentais é baseado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada obtidos por Souza (2020). Foram avaliados aproximadamente 130 resultados experimentais para as misturas de solo-cimento (S) e solo com RCC (S_RCC). Os dados experimentais foram obtidos variando o teor de cimento (0%, 4%, 6% e 8%) e o tempo de cura (7, 14, 21 e 28 dias), como mostra a Tabela 1. Essas variações foram utilizadas como dados para o desenvolvimento do planejamento fatorial.

Tabela 1. Composição das misturas avaliadas.

Mistura	Solo (%)	RCC (%)	Cimento (%)	Mistura	Solo (%)	RCC (%)	Cimento (%)
S	100	0	0	S_RCC	50	50	0
S_4	96	0	4	S_RCC_4	48	48	4
S_6	94	0	6	S_RCC_6	47	47	6
S_8	92	0	8	S_RCC_8	46	46	8

2.2 Métodos

Após a obtenção dos dados experimentais de resistência à compressão simples (q_u), foi feita uma análise estatística exploratória com o objetivo de avaliar a distribuição dos valores e a qualidade dos dados obtidos. Os resultados foram organizados em planilhas conforme os teores de cimento e os tempos de cura, possibilitando a construção de histogramas para observação da forma da distribuição, detecção de dados discrepantes e análise da centralidade dos valores.

Para verificar se os dados atendiam aos pressupostos da estatística paramétrica, aplicaram-se testes de normalidade, como o de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro-Wilk (S-W), ambos utilizados para comparar a distribuição empírica dos dados com uma distribuição teórica normal. A verificação da normalidade é essencial para a aplicação da análise de variância (ANOVA), que exige essa premissa para a validade dos resultados inferenciais. Também foram avaliadas a homogeneidade de variâncias (homocedasticidade) e a independência dos resíduos.

Confirmados os pressupostos, executou-se a ANOVA de fator duplo com repetição, a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas significativas entre os grupos de misturas em função das variáveis independentes: teor de cimento e tempo de cura. Em seguida, se aplicou o teste de comparações múltiplas de Tukey para identificar, par a par, quais combinações apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Esse teste controla a taxa de erro do tipo I e fornece uma medida precisa da diferença mínima significativa entre médias.

Complementando a análise, foram ajustados modelos de regressão linear com base nos dados obtidos. A regressão permitiu quantificar o efeito individual e combinado das variáveis sobre a resistência à compressão. A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), que indica a proporção da variância da q_u explicada pelas variáveis independentes. Também foram geradas superfícies de resposta para facilitar a visualização das interações entre os parâmetros analisados, contribuindo para a interpretação dos efeitos do teor de cimento e do tempo de cura sobre o desempenho das misturas solo-cimento e solo com RCC.

3 RESULTADOS

Os histogramas da Figura 1 indicam que a distribuição da resistência à compressão não confinada é aproximadamente normal para a maioria dos grupos analisados, conforme sugerido também pela curva de ajuste (FDM). Entretanto, observa-se uma exceção no grupo apresentado na Figura 1(a), no qual o ajuste não reproduz adequadamente a forma do histograma, indicando desvio relevante do comportamento gaussiano.

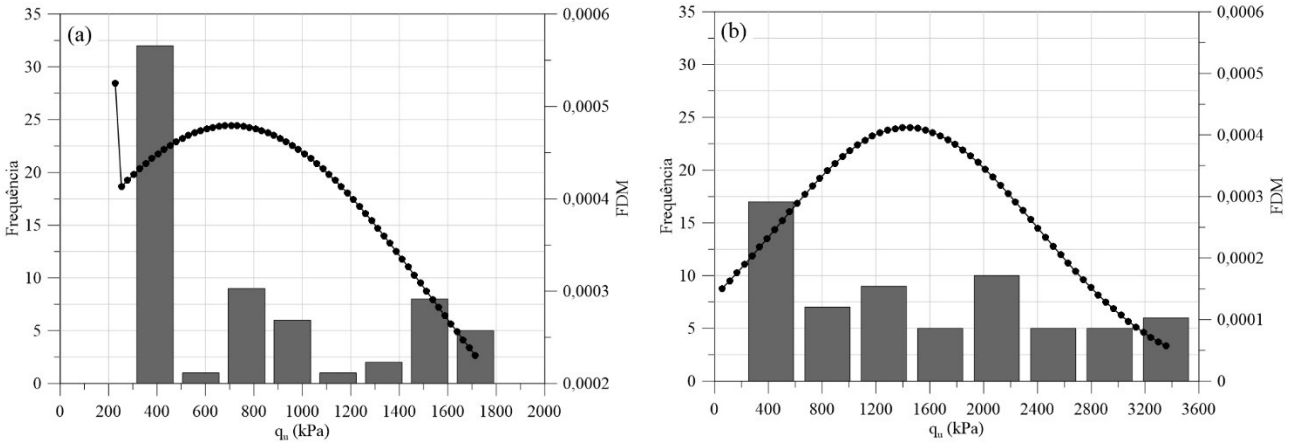


Figura 1. Curvas de normalidade para o (a) solo e (b) S_RCC.

Para o grupo de solo natural, a curva de ajuste evidencia assimetria positiva acentuada, caracterizada por uma cauda longa à esquerda, o que sugere a presença de valores discrepantes de alta resistência influenciando a média e distorcendo a distribuição. A ocorrência de assimetria à esquerda indica a existência de resultados de q_u muito baixos em relação ao conjunto, corroborando a heterogeneidade do material e a

possibilidade de condições de amostragem e moldagem menos favoráveis em parte dos corpos de prova. Esse comportamento é compatível com a interpretação de que o incremento de cimento tende a promover ganho expressivo de resistência, reduzindo a incidência de valores muito baixos e aproximando a distribuição de um padrão mais próximo do normal em amostras estabilizadas com o aglomerante.

Para confirmar a hipótese de distribuição normal, indicada pelos histogramas, foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que compara a distribuição empírica dos dados com uma distribuição teórica normal. Os resultados do teste K-S (Tabela 2) indicaram que, para todas as amostras considerando seus respectivos teores de cimento e tempos de cura, os valores de P foram superiores ao nível de significância de 0,05. Dessa forma, não houve evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula, indicando que os dados apresentam distribuição normal. Os valores de P foram menores que F de significância, confirmando que a hipótese nula não pode ser rejeitada e viabilizando a análise de variância (ANOVA).

Tabela 2. Teste de aderência para o solo-cimento e S_RCC com variação do teor de cimento e tempo de cura

Amostra	valor-P	F de significância	Hipótese
S_0	0,32241	0,62394	Nula
S_4	0,26006	0,62394	Nula
S_6	0,23692	0,62394	Nula
S_8	0,26109	0,62394	Nula
S_RCC_0	0,20624	0,62394	Nula
S_RCC_4	0,28056	0,62394	Nula
S_RCC_6	0,33141	0,62394	Nula
S_RCC_8	0,26719	0,62394	Nula

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada adotando-se a resistência à compressão simples das diferentes misturas como variável dependente (Y) e o teor de cimento e o tempo de cura como variáveis independentes (X). Essa abordagem permitiu avaliar a significância estatística dos efeitos por meio da comparação entre o valor calculado de F e o F crítico, bem como entre o valor de P e o nível de significância $\alpha = 0{,}05$. Os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 mostram o efeito dos teores de cimento (0%, 4%, 6% e 8%), dos tempos de cura (7, 14, 21 e 28 dias) e do efeito combinado entre esses dois fatores.

Conforme apresentado na Tabela 3, os resultados para o teor de cimento com $F > F_{crítico}$ e $p < 0{,}05$ indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, evidenciando incremento de q_u associado à incorporação de cimento. Para o fator tempo de cura, obteve-se $F = 1{,}295$ e $p = 0{,}287$, o que não caracteriza efeito significativo do tempo de cura sobre a resistência das amostras de solo natural, dentro do nível de significância adotado. Por outro lado, a análise das interações apresentou significância, demonstrando que o efeito do teor de cimento depende do tempo de cura e a evolução da resistência é influenciada pela combinação entre ambos os fatores.

Tabela 3. ANOVA para a amostra de solo-cimento.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Teor de cimento	14782840,876	3	4927613,625	635,042	1,3072E-38	2,798
Tempo de cura	30135,869	3	10045,290	1,295	0,287	2,798
Interações	210587,932	9	23398,659	3,015	0,006	2,082
Dentro	372456,359	48	7759,507			
Total	15396021,036	63				

Os resultados da ANOVA para as amostras S_RCC (Tabela 4) indicaram influência estatisticamente significativa apenas do teor de cimento, uma vez que $F = 92{,}441$ é superior a $F_{crítico}$ e e $p < 0{,}05$. Em contrapartida, o fator correspondente ao tempo de cura e o termo de interação entre os fatores não apresentaram significância estatística para o modelo.

Embora a ANOVA permita verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas, ela não especifica quais grupos diferem entre si. Assim, foi necessária a aplicação de um teste *post-hoc* e, para identificar os pares de grupos com diferenças significativas, foi empregado o teste de Tukey.

Tabela 4. ANOVA para a amostra S_RCC.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Teor de cimento	48929242,560	3	16309747,520	92,441	5,8928E-20	2,798
Tempo de cura	629527,495	3	209842,498	1,189	0,324	2,798
Interações	1030363,114	9	114484,790	0,649	0,750	2,082
Dentro	8468838,801	48	176434,142			
Total	59057971,970	63				

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do teste de Tukey. Foram incluídas apenas as combinações de amostras cuja diferença absoluta entre as médias foi menor que a diferença mínima significativa (DMS). Isso significa que, para um nível de confiança de 95%, essas combinações não apresentam diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão e, por isso, são agrupadas com a mesma letra (por exemplo, “a - a” ou “b - b”). As demais comparações resultaram em letras distintas (por exemplo, “a - b”), indicando médias estatisticamente diferentes.

Tabela 5. Resultados do teste de Tukey.

Combinação	Cura (dias)	Média 1	Média 2	Módulo da média	DMS	Classificação
S_0 – S_4	7	295,129	266,573	28,556	166,354	a - a
S_0 – S_4	14	295,129	268,075	27,054	166,354	a - a
S_0 – S_4	21	295,129	279,623	15,506	166,354	a - a
S_0 – S_4	28	295,129	255,613	39,516	166,354	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	7	389,307	747,659	358,352	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	14	389,307	848,742	459,435	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	21	389,307	877,981	488,674	793,247	a - a
S_RCC_0 – S_RCC_4	28	389,307	884,063	494,756	793,247	a - a
S_RCC_6 – S_RCC_8	28	1955,605	2329,698	374,094	793,247	b - b
S_8 – S_RCC_8	28	1554,375	2329,698	775,323	819,878	a - a

Com base nos dados mostrados, se observa que na combinação “S_0 – S_4” a amostra de solo natural apresentou resistência semelhante à resistência da amostra de solo com 4% de cimento, independente da variação do tempo de cura. Estatisticamente, utilizar solo natural sugere a obtenção da mesma resistência que um solo com 4% de cimento, gerando economia de aglomerante.

Na combinação “S_RCC – S_RCC_4”, se entende que a amostra S_RCC possui resistência estatisticamente semelhante às amostras_RCC_4, não sendo estatisticamente necessária a aplicação de cimento para se obter resistência satisfatória. Esse fato pode ser explicado pela diferença mínima significativa (DMS), que considera as duas misturas como a mesma matriz. Porém, em termos geotécnicos, a resistência é praticamente dobrada com o acréscimo de 4% de cimento, o que torna viável a utilização da mistura com a incorporação de cimento a depender da finalidade prática.

As combinações “S_RCC_6 – S_RCC_8” e “S_8 – S_RCC_8” aos 28 dias de cura apresentaram semelhança estatística entre as médias de resistência, portanto o S_8 pode ser utilizado em substituição a S_RCC com 6% ou 8% de cimento. Essa conclusão estatística está diretamente associada às matrizes comparadas no teste, que apresentaram diferenças mínimas significativas semelhantes e não foram distinguidas pelo critério adotado. Contudo, essa equivalência não se sustenta sob uma perspectiva prática de desempenho mecânico, pois a mistura de S_8 apresentou resistência média de 1554,375 kPa, enquanto a mistura de S_RCC_8 atingiu 2329,698 kPa, o que corresponde a um incremento de resistência da ordem de 50%.

Em seguida, foi conduzida uma análise espacial por meio da geração de superfícies de resposta no software SURFER® (Golden Software, Inc.), que representam a influência combinada do teor de cimento e do tempo de cura sobre a resistência à compressão não confinada das misturas de solo estabilizado.

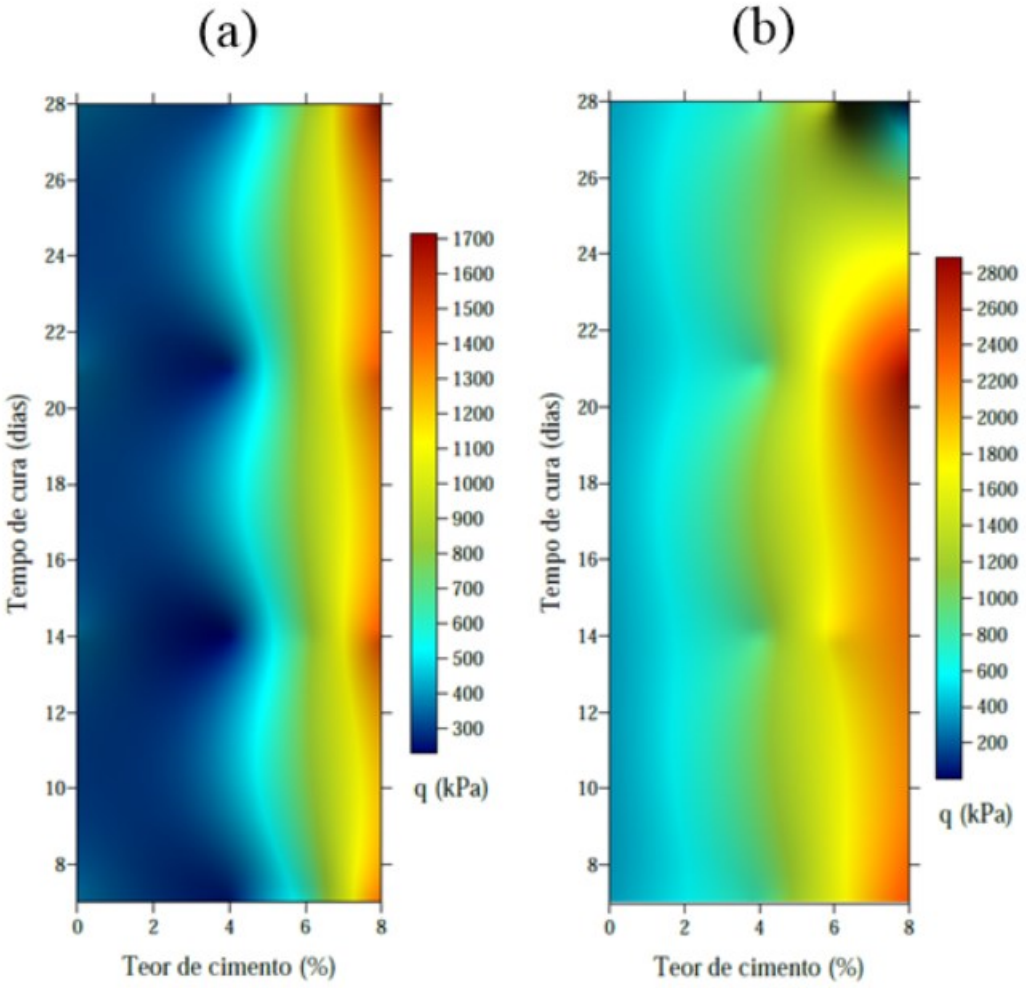


Figura 2. Superfícies de resposta de q_u para o (a) solo-cimento e (b) S_RCC

O aumento do teor de cimento e do tempo de cura resultou na elevação progressiva da resistência do solo natural (Figura 2a), porém os incrementos observados foram menos pronunciados do que aqueles obtidos na mistura contendo resíduo de construção civil. Esse comportamento sugere que o solo natural apresenta menor potencial de ganho de resistência associado ao processo de cimentação, em razão de limitações microestruturais e químicas do próprio material. Embora o cimento favoreça a formação de ligações entre partículas, a ausência de contribuição pozolânica, presente nas misturas com RCC, restringe o desenvolvimento de produtos cimentantes adicionais e, consequentemente, limita o aumento de resistência mesmo em idades de cura mais elevadas.

Como conclui Souza (2020), a mistura de solo-cimento apresentou menor desenvolvimento da etringita comparada a mistura S_RCC, o que pode ser ilustrado pelo desenvolvimento da resistência nas diferentes misturas decorrente dos diferentes estágios da hidratação do cimento para o mesmo tempo de cura e quantidade de aglomerante.

A superfície da Figura 2 (b) mostra um crescimento expressivo na resistência da mistura S_RCC, mesmo com baixos teores de cimento, sugerindo que o RCC colabora com o incremento de resistência estrutural à mistura.

A análise de regressão linear (Tabela 6) confirmou a significância dos modelos estudados e o impacto das variáveis no modelo, complementando o que foi discutido a respeito da ANOVA e do teste de Tukey.

Tabela 6. Regrssão linear para S e S_RCC

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,816
R-Quadrado	0,666
R-quadrado ajustado	0,661
Erro padrão	287,995
Observações	64

O coeficiente de determinação (R^2) do modelo que compara a resistência das amostras S e S_RCC indica que o ajuste explica apenas 66,6% da variabilidade dos dados. O erro padrão de 287,995 também é elevado, sugerindo grande dispersão dos resíduos e indicando que ambos os modelos podem apresentar baixa precisão.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho averiguou a aplicabilidade da análise de variância (ANOVA) na interpretação de resultados de resistência à compressão não confinada de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento, considerando misturas solo-cimento e solo com RCC. A consistência das inferências foi assegurada pela verificação das premissas do método, por meio de testes de normalidade (Kolmogorov–Smirnov) e homocedasticidade, conferindo robustez à avaliação estatística dos efeitos dos fatores estudados.

Os resultados indicaram efeito significativo do teor de cimento e do tempo de cura sobre a resistência, com evidências de interação entre esses fatores, principalmente nas misturas com RCC, nas quais o incremento de cimento tende a potencializar a evolução resistente ao longo da cura. O teste de Tukey complementou a ANOVA ao discriminar quais grupos diferiram estatisticamente, permitindo identificar comparações relevantes entre combinações de teor de cimento e tempo de cura. Entretanto, foi observado que equivalências estatísticas nem sempre refletem diferenças práticas de desempenho, ressaltando a necessidade de interpretação conjunta estatística e geotécnica.

De modo geral, a abordagem ANOVA associada ao pós-teste mostrou-se adequada para validar e interpretar dados experimentais de estabilização, contribuindo para análises mais consistentes em estudos com múltiplos fatores. Além disso, os resultados reforçam o potencial do RCC como material incorporado para melhoria do desempenho mecânico e para a otimização do consumo de cimento visando atingir resistências especificadas. Dessa forma, o emprego de ferramentas estatísticas robustas se apresenta como suporte relevante para a tomada de decisão em dosagens e para o desenvolvimento de soluções tecnicamente eficientes e ambientalmente mais sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

À UEM por permitir o uso de suas instalações e laboratórios para o desenvolvimento dessa pesquisa. E à CAPES pelo financiamento proporcinado que colaborou para os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bewick, V. Cheek, L. Ball, J. (2021). Statistics review 7: Correlation and regression. *Critical Care*, London, v. 25, n. 2, p. 301–306.

Dejarnette, B. Mamidala, S. (2023). Fundamentals of ANOVA in engineering data analysis. *Engineering Statistics Journal*, v. 45, n. 2, p. 112–128.

Ialongo, C. (2021). Understanding linear regression in clinical research. *Biochemia Medica*, Zagreb, v. 31, n. 2, p. 020201.

Kardani, R. Goli, A. Saberian, M. (2021). Stabilization of expansive soils using industrial and construction wastes: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 289, p. 125726.

Kaur, J. Sharma, R. Kumar, P. (2022). Geotechnical behavior of cement-treated soil blended with recycled aggregates. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 68–75.

Kumar, A. Arora, S. (2020). Use of construction and demolition waste as a stabilizer in clayey soils. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119027.

Kumar, S. Bhardwaj, P. Gupta, A. Rai, A. K. Singh, A. Kumar, P. (2021). Recycling of construction and demolition waste for sustainable building materials: A review. *Environmental Technology & Innovation*, v. 21, p. 101252. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101252.

Rahman, M. A. Islam, M. S. Haque, A. (2020). Effectiveness of recycled materials in improving soil strength: Statistical and geotechnical analysis. *Materials Today: Proceedings*, v. 42, p. 1681–1686.

Souza, J. M. (2020). *Estabilização de um solo argiloso através da incorporação de cimento Portland, resíduo de construção civil (RCC) e resíduo de pó de pedra*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

Tabachnick, B. G. Fidell, L. S. (2019). *Using multivariate statistics*. 7. edition. New York: Pearson.

Yuan, Y. Liu, C. Wang, Z. (2023). Sustainable utilization of construction waste for soil stabilization: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 194, p. 106783.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/59

Análise Estatística Comparativa de Resultados de Cisalhamento Direto em Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos e RSU: Perspectivas e Possibilidades de Simulação

Maria Clara Moreira Fort
Mestre em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, maria.c.fort@ufv.br

Rejane Nascentes
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

RESUMO: Frente ao desafio da determinação de propriedades geotécnicas em resíduos sólidos urbanos (RSU), tem emergido em diferentes locais a aplicação dos resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) como alternativa para obtenção desses parâmetros em ensaios geotécnicos convencionais. Os RSMS são materiais produzidos em laboratório a partir da mistura de diferentes elementos limpos, com composição e dimensões controladas a fim de simular o comportamento dos RSU. Este trabalho apresenta uma análise comparativa detalhada entre um banco de dados de resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSMS e outro banco de dados, reunido por Daciolo *et al*. (2022), do mesmo ensaio utilizando RSU, com o objetivo de avaliar estatisticamente a capacidade dos RSMS em representar o comportamento mecânico dos RSU. Foram reunidas 97 observações de nove estudos internacionais com o foco da análise nos parâmetros ângulo de atrito e coesão, muito importantes para a análise de estabilidade de taludes. O ângulo de atrito dos RSMS apresentou coeficiente de variação de 32,1% (6º a 48,5º), com média de 28º, enquanto a coesão mostrou maior dispersão, com coeficiente de variação de 74,1% e média de 17,6 kPa. A coesão apresentou parâmetros de forma e escala da Weibull relativamente próximos nos dois bancos de dados, corroborando com a similaridade dos comportamentos. Para o ângulo de atrito, a distribuição normal mostrou boa adequação para aplicações práticas e testes t para médias amostrais indicaram ausência de diferença significativa entre os ângulos de atrito médios dos RSMS e RSU (valor-p=0,63). Esses resultados são os primeiros indicativos para validar o uso dos RSMS como ferramentas efetivas em estudos geotécnicos, facilitando a padronização experimental e proporcionando maior controle e reprodutibilidade em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: RSMS, resistência ao cisalhamento, aterros sanitários, coesão, ângulo de atrito

ABSTRACT: Faced with the challenge of determining geotechnical properties in municipal solid waste (MSW), the application of synthetic municipal solid waste (SMW) has emerged in different locations as an alternative for obtaining these parameters in conventional geotechnical tests. SMW materials are produced in the laboratory from the mixture of different clean elements, with controlled composition and dimensions in order to simulate the behavior of MSW. This work presents a detailed comparative analysis between a database of direct shear test results on SMW and another database, compiled by Daciolo et al. (2022), of the same test using MSW, with the aim of statistically evaluating the ability of SMW to represent the mechanical behavior of MSW. Ninety-seven observations from nine international studies were gathered, focusing the analysis on the friction angle and cohesion parameters, which are very important for slope stability analysis. The friction angle of the RSMS showed a coefficient of variation of 32.1% (6º to 48.5º), with an average of 28º, while cohesion showed greater dispersion, with a coefficient of variation of 74.1% and an average of 17.6 kPa. Cohesion presented relatively similar shape and Weibull scale parameters in both databases, corroborating the similarity of behaviors. For the friction angle, the normal distribution showed good suitability for practical applications, and t-tests for sample means indicated no significant difference between the average friction angles of the RSMS and RSU (p-value = 0.63). These results are the first indications to validate the use of RSMS as effective tools in geotechnical studies, facilitating experimental standardization and providing greater control and reproducibility in the laboratory.

KEYWORDS: MSWS, shear strength, landfills, cohesion, angle of friction

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de resíduos *per capita*, somado ao crescimento populacional e econômico, amplia os problemas relacionados à destinação e disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estima-se que no ano de 2020 tenham sido gerados globalmente 2,1 bilhões de toneladas de resíduos sólidos, cujas projeções indicam que esta quantidade possa subir para 3,8 bilhões de toneladas anuais em 2050 (United Nations Environment Programme, 2024).

Na gestão dos RSU, os aterros sanitários têm destaque como método de disposição de resíduos sobre o solo, sendo utilizado sistematicamente sobretudo nos países em desenvolvimento (Lindamulla *et al*, 2022). Para a análise da estabilidade de taludes de aterros sanitários, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos é tida como uma condição de entrada crítica. Entretanto, a determinação das propriedades geotécnicas dos RSU é considerada um desafio devido à heterogeneidade do material, à grande variação na distribuição do tamanho das partículas e à degradação dependente do tempo (Reddy et al, 2009).

Sem dúvidas, para obtenção dos parâmetros geotécnicos o ideal seria a realização de ensaios em materiais não perturbados, mas há obstáculos importantes como a dificuldade em se recuperar e testar amostras representativas de resíduos, devido entre outros fatores, ao grande tamanho de alguns de seus constituintes (Bray et al, 2009). Outro ponto é a grande variação entre as amostras obtidas, o que torna difícil quantificar a contribuição de cada elemento para o comportamento do global dos RSU (Dixon et al, 2008).

Buscando melhorar a obtenção destes dados, nos últimos anos tem aumentado a utilização de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) no estudo do comportamento mecânico dos RSU. Os resíduos sintéticos são aqueles produzidos em laboratório a partir da mistura de diferentes materiais e na composição desejada com a finalidade de simular RSU para a realização de testes (Singh e Uchimura, 2023).

A opção de utilizar RSMS no lugar de resíduos sólidos frescos possui diversas vantagens, podendo citar entre elas o melhor controle da composição da amostra, reduzindo a incerteza nos componentes com base no tamanho, forma e propriedades do material; bem como a utilização de componentes mais limpos, superando preocupações sanitárias e de segurança no laboratório (Singh e Uchimura, 2023).

Trabalhos como o de Cho et al (2011) e Pulat e Yukselen-Aksoy (2013), apontaram não haver diferença significativa no comportamento de RSMS quando comparados a faixa de valores esperados para RSU. Enquanto isso, trabalhos como o de Reddy et al (2009), Reddy et al (2011), Singh e Uchimura (2023) e Dixon (2008) destacam que alguns comportamentos destoantes entre as amostras de RSMS e a literatura podem ser explicados pela forma de constituição dos resíduos sintéticos.

Na literatura sobre resistência ao cisalhamento nos ensaios com RSU é evidente a grande dispersão dos resultados e os métodos estatísticos são pertinentes para a análise e interpretação dessas informações, proporcionando apontar padrões de comportamento da resistência ao cisalhamento de RSU e padronizar métodos experimentais (Daciolo et al, 2022).

Porém, para os RSMS ainda não há um padrão normativo ou mesmo meodológico entre os trabalhos publicados, tendo sido aplicados diferentes métodos de teste e diferentes formas de constituição dos RSMS. Isso, junto com a variabilidade de constituições dos RSU e suas variações simuladas nesses trabalhos, resultam na dispersão significativa dos dados publicados.

Portanto, este trabalho se propõe apresentar uma análise comparativa entre um banco de dados de resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSMS e outro banco de dados, reunido por Daciolo *et al*. (2022), do mesmo ensaio porém utilizando RSU, com o objetivo de avaliar estatisticamente a capacidade dos RSMS em representar o comportamento mecânico dos RSU.

2 METODOLOGIA

Com o intuito de entender se os RSMS simulam de modo efetivo o comportamento dos RSU, formou-se um banco de dados de trabalhos com resultados de ensaios de cisalhamento direto (CD) publicados na literatura. Este tipo de ensaio foi escolhido por estar presente na maioria dos trabalhos que utilizam RSMS e por possuir aplicabilidade na prática de projetos de aterros sanitários.

Para o levantamento, foram considerados por "resíduos sólidos municipais sintéticos" aquele material constituído em laboratório que simultaneamente fizesse a simulação de gravimetrias pré-definidas pelos pesquisadores (através da mistura de dois ou mais materiais excluindo-se o solo) e alterações no tamanho dos constituintes, podendo os ter reduzido tanto por moagem, corte, trituração ou outro método.

Trabalhos que realizaram os ensaios em materiais triturados obtidos em aterros ou centrais de triagem, mas que não manipularam sua constituição foram excluídos desta análise, bem como os que apenas acrescentaram um único material de reforço ao solo. No total, foram analisados 9 diferentes estudos, perfazendo 102 observações e um resumo desse banco de dados está reunido na Tabela 1.

Tabela 1. Características do Banco de Dados utilizado

Referência	Nº de observações	País	Simulação
Cho et al (2011)	40	EUA	China Continental
Dixon et al (2008)	9	Reino Unido	Resíduos dos EUA + Variações na composição
Ojuri e Adegoke (2015)	2	Nigéria	Nigéria
Reddy et al (2009)	3	EUA	EUA
Reddy et al (2011)	5	EUA	Resíduos dos EUA + Resíduos degradados
Singh e Uchimura (2023)	9	Japão	Japão + Variações na composição
Viswanadham et al (2023)	3	Índia	Índia
Xie et al (2022)	5	Austrália	Austrália + Variações na composição

As variáves estudadas foram os parâmetros de resistência ao cisalhamento ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c). Quando os valores de ϕ e c não estavam disponíveis de forma tabelada em um estudo, foram obtidos analisando as curvas tensão-deformação dos testes de cisalhamento direto para a deformação no valor de 15%, devido ao comportamento do material estudado raramente apresentar ruptura na curva.

A princípio foram feitas análises estatísticas de descrição e dispersão para os parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) obtidos em ensaios de RSMS.

Também foi verificado os três melhores ajustes da distribuição de frequência entre Exponencial, Gama, Maior Valor Extremo, Menor Valor Extremo, Lognormal, Normal e Weibull. Tais resultados foram comparados aos resultados obtidos por Daciolo *et al* (2022) para um banco de dados de ensaios de cisalhamento direto em RSU.

3 RESULTADOS

As análises estatísticas descritivas foram compiladas na Tabela 2. Tanto o ângulo de atrito como a coesão tiveram como resultado coeficientes de variação altos, respectivamente 32,1% (variando de 6 a 48,5º) e 74,1% (variando de 0 a 49,6 kPa).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas para os parâmetros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) em RSMS

Estatísticas descritivas	φ (º)	c (kPa)
Tamanho da amostra (N)	97	97
Média ($\bar{x}$)	28,18	17,59
Desvio padrão (s)	9,05	13,02
Coeficiente de variação (CV)	32,1%	74,1%
Erro Padrão (SE)	0,92	1,32
Média aparada (x')	28,40	17,20
Mínimo	6	0
P15	20	3,02
Mediana (P50)	28,7	16
P85	38	33,3
Máximo	48,5	49,6

P15 = Percentil 15%; P85 = Percentil 85%

Na análise do seu banco de dados, Daciolo *et al* (2022) também encontraram valores semelhantes, Tabela 3, inclusive com a dispersão da coesão também sendo muito maior que a do ângulo de atrito.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas para os parametros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) do banco de dados de Daciolo et al (2022) em RSU

Estatísticas descritivas	φ (º)	c (kPa)
Tamanho da amostra (N)	313	313
Média ($\bar{x}$)	27,65	19,11
Desvio padrão (s)	10,19	15,94
Coeficiente de variação (CV)	36,9%	83,4%
Erro Padrão (SE)	0,58	0,90
Média aparada (x')	27,85	17,85
Mínimo	2,7	0
P15	16,6	2,5
Mediana (P50)	28,1	15,6
P85	38,5	34,6
Máximo	50,7	83,7

P15 = Percentil 15%; P85 = Percentil 85%

Alguns autores indicam que o RSU herda propriedades de atrito das tensões de contato e do intertravamento de material moderadamente a não biodegradável. Porém, ainda não há consenso sobre o que contribui para as propriedades coesivas nos RSU. Existe tanto a hipótese de que a coesão esteja relacionada a resíduos orgânicos, bem como alguns trabalhos relacionam a "aparente coesão" ao comportamento das fibras no maciço de resíduos (Reddy *et al,* 2009; Hettiarachchi, 2011).

Para compreender melhor o comportamento estatístico e possibilitar uma comparação válida ao banco de dados de Daciolo *et al* (2022), diferentes modelos de distribuição de função foram analisados, sendo apresentados na Tabela 4 as três funções com melhor aderência.

Tabela 4 – Resultados para os testes de qualidade ao ajuste das FDP

	φ (º)	c (kPa)
1º melhor ajuste de distribuição	Weibull	Weibull
Estatística de Anderson-Darling	0,393	1,432
Valor -p (5% de significância)	0,491	0,360
Parâmetro de localização	-	-
Parâmetro de forma	5,046	1,218
Parâmetro de escala	42,892	18,936
2º melhor ajuste de distribuição	Normal	Gumbel
Estatística de Anderson-Darling	0,455	1,690
Valor -p (5% de significância)	0,597	0,251
Parâmetro de localização	28,184	11,397
Parâmetro de forma	-	-
Parâmetro de escala	9,004	10,548
3º melhor ajuste de distribuição	Gumbel	Normal
Estatística de Anderson-Darling	0,797	1,880
Valor -p (5% de significância)	0,242	0,108
Parâmetro de localização	32,571	17,585
Parâmetro de forma	-	-
Parâmetro de escala	8,179	12,956

Para o parâmetro ângulo de atrito, o melhor ajuste foi o de Weibull, com estatística Anderson-Darling de 0,393 e valor-p significativo, 0,491. O parâmetro de forma elevado, 5,046, sugere uma distribuição menos assimétrica que a coesão, o que está alinhado com a menor dispersão observada no ângulo de atrito em relação à coesão.

Entretanto, a distribuição normal também pode ser considerada uma alternativa adequada para modelar o ângulo de atrito (φ) no banco de dados de RSMS, pois apresentou ajuste estatisticamente aceitável para o parâmetro. Por isso, apesar da distribuição Weibull ter apresentado melhor ajuste estatístico com base nos critérios Anderson-Darling e valor-p, a distribuição normal segue sendo uma alternativa válida, principalmente para fins práticos de comparação.

A distribuição Weibull destacou-se como o melhor ajuste também para a variável Coesão, conforme evidenciado pela estatística Anderson-Darling relativamente baixa, 1,432, e valor-p significativo, 0,360, indicando boa aderência dos dados a essa distribuição. A Weibull é uma distribuição flexível que permite modelar dados com assimetria positiva e cauda mais longa, característica observada neste banco de dados. Justamente por essas características, o segundo melhor ajuste para a coesão foi a distribuição Gumbel de maior valor extremo, que se mostra adequada em modelar os valores elevados raros da coesão no banco de dados. Já a distribuição Normal, no caso da coesão, aparece apenas em terceiro lugar, por ser menos eficiente para capturar os valores extremos e assimetria presentes nos dados.

Enquanto isso, no banco de dados de Daciolo *et al* (2022), para o ângulo de atrito, há uma boa aderência à distribuição Normal, com estatística de Anderson-Darling de 1,021 e valor -p significativo, 0,011, com a função de Weibull como segundo melhor ajuste do banco de dados de ângulo de atrito, com uma estatística AD de 1,670.

Por sua vez, para o parâmetro de coesão do banco de dados de Daciolo *et al* (2022) houve boa aderência ao PDF de Weibull, com estatística AD de 0,851 e valor de p de 0,028, sendo o segundo melhor ajuste com a PDF Gamma (estatística AD de 1,368).

Para o ângulo de atrito, como os dois bancos de dados permitem ser descritos pela distribuição normal, realizou-se um Teste t de Student para duas médias amostrais com 95% de confiança, que apresentou um valor-p de 0,63, indicando não haver diferença significativa entre as médias.

Uma análise de diagrama de caixa (boxplot), Figura 1, permite observar que o comportamento do ângulo de atrito do presente banco de dados obtido em RSMS é semelhante ao comportamento do banco de dados obtidos por Daciolo et al (2022), com forte similaridade na mediana, dispersão e amplitude interquartil.

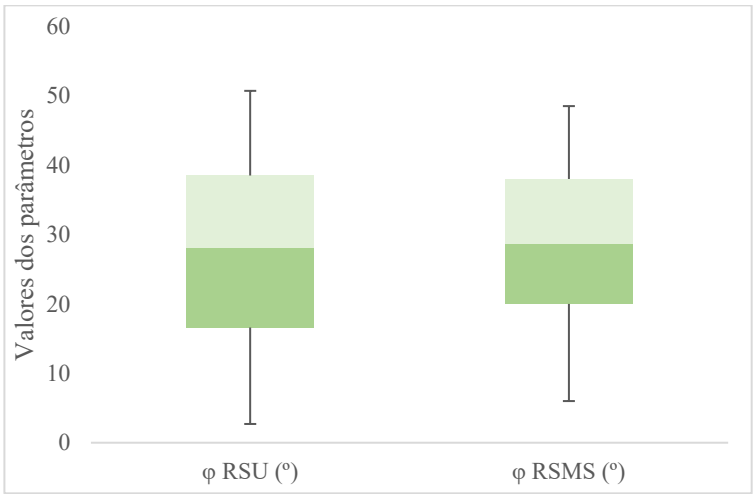


Figura 1 - Distribuição comparativa do ângulo de atrito (φ) para os bancos de dados RSU e RSMS

A FDP de Weibull para o banco de dados de Daciolo *et al* (2022) possui parâmetro de forma igual a 1,305 e parâmetro de escala de 22,459. Ao comparar com o banco de dados deste trabalho, percebe-se que a diferença relativa no parâmetro de forma é cerca de 6,9%, enquanto que para o parâmetro de escala é aproximadamente 17%. Os parâmetros da distribuição de Weibull, especificamente o parâmetro de forma (k) e o parâmetro de escala (λ), são essenciais para descrever o comportamento probabilístico da variável coesão.

No caso dos bancos analisados, a diferença relativa entre os parâmetros de forma foi apenas de 6,9%, e para os parâmetros de escala cerca de 17% para o parâmetro de forma.

Assim, a similaridade observada entre os parâmetros Weibull da coesão nos dois bancos de dados analisados pode ser observada na Figura 2.

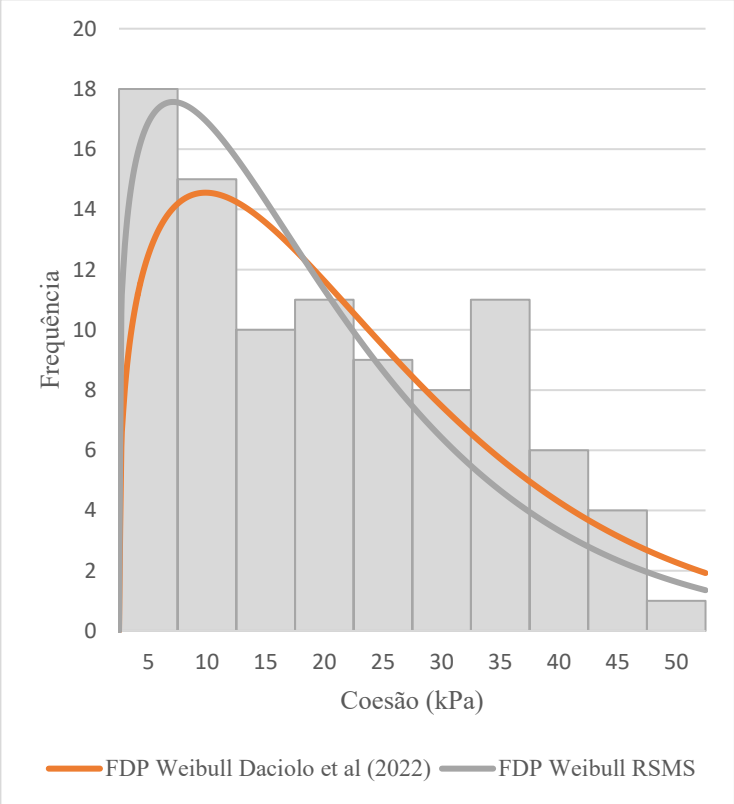


Figura 2: Frequência da coesão em RSMS e comparação das funções de densidade de probabilidade Weibull ajustadas para coesão (kPa)

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que os resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) apresentam capacidade consistente de reproduzir o comportamento em ensaios de cislhamento direto observado em resíduos sólidos urbanos (RSU), especialmente no que se refere aos parâmetros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c). A convergência entre as estatísticas descritivas dos dois conjuntos de dados, mesmo diante da elevada variabilidade inerente ao comportamento dos resíduos, corrobora a validade dos RSMS como modelos representativos para a modelagem geotécnica de aterros sanitários.

A análise das distribuições de densidade de probabilidade (FDP) demonstrou que a distribuição normal fornece um ajuste adequado para o ângulo de atrito dos RSMS, permitindo seu uso em aplicações práticas e em procedimentos de verificação com base em testes de hipóteses. Para a coesão, a aderência da distribuição de Weibull e a similaridade dos parâmetros de forma e escala em relação ao banco de dados de RSU compilado por Daciolo *et al* (2022) evidenciam uma forte convergência estatística entre ambos.

Em conjunto, os resultados de estatística descritiva, ajuste de distribuições de probabilidade e comparação entre bancos de dados apontam que os RSMS constituem uma alternativa tecnicamente viável para a simulação de RSU em ensaios de cisalhamento direto, contribuindo para maior controle experimental, padronização metodológica e reprodutibilidade em laboratório.

Do ponto de vista aplicado, tal constatação é um indício que o emprego de RSMS em estudos de estabilidade de taludes em aterros sanitários é bastante promissor, reduzindo limitações operacionais, de segurança e de amostragem associadas ao uso de resíduos reais. Recomenda-se, contudo, a ampliação de

estudos envolvendo diferentes configurações de composição sintética, condições de tensão e estados de degradação, de modo a consolidar faixas de projeto e diretrizes normativas específicas para o uso de RSMS em análises geotécnicas de aterros.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAY, Jonathan D. et al. Shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.

CHO, Young Min et al. Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 26-32, 2011.

DACIOLO, Leonardo Vinícius Paixão; DE SOUZA CORREIA, Natalia; BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: Proposal for data classification. **Waste Management**, v. 140, p. 245-259, 2022.

DIXON, Neil; LANGER, Ulrich; GOTTELAND, Philippe. Classification and mechanical behavior relationships for municipal solid waste: Study using synthetic wastes. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 134, n. 1, p. 79-90, 2008.

LINDAMULLA, Lahiru et al. Municipal solid waste landfill leachate characteristics and their treatment options in tropical countries. **Current pollution reports**, v. 8, n. 3, p. 273-287, 2022.

PULAT, Hasan Firat; YUKSELEN-AKSOY, Yeliz. Compaction behavior of synthetic and natural MSW samples in different compositions. **Waste management & research**, v. 31, n. 12, p. 1255-1261, 2013.

REDDY, Krishna et al. Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 429-438, 2009.

REDDY, Krishna R. et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste management**, v. 31, n. 11, p. 2275-2286, 2011.

SINGH, Vidit; UCHIMURA, Taro. Effect of material composition on geotechnical properties—Study on synthetic municipal solid waste. **Geotechnics**, v. 3, n. 2, p. 397-415, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2024). **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939 DOI: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/60

Análise Geoespacial da Dinâmica Hídrica do Rio Una e Intervenções Antrópicas na Mitigação de Alagamentos em São José da Coroa Grande/PE

Elyverson A. A. O. de Jesus[1]
Graduando em Engenharia de Agrimensura e Cartografia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasil, elyverson.jesus@ceca.ufal.br

Rosilene Mendonça Nicácio Jimenez[2]
Docente no Curso Engenharia de Agrimensura e Cartografia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasil, rosilene.nicacio@ceca.ufal.br

RESUMO: A foz do rio Una, localizada em São José da Coroa Grande (PE), apresenta histórico de alagamentos intensificados por ações antrópicas. A bacia, que abriga ecossistemas sensíveis como manguezais e planícies de inundação, sofre com o avanço urbano desordenado e intervenções diretas, especialmente a abertura manual de canais na praia para facilitar o escoamento durante cheias. O entendimento e o monitoramento destas atuações antrópicas nos diversos ecossistemas são essenciais. Diante disto este trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal dos índices *NDVI* (N*ormalized Difference Vegetation Index*) e *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) e sua relação com intervenções antrópicas. Parte-se da hipótese de que alterações no uso e ocupação do solo, associadas à ausência de planejamento territorial, intensificam os riscos de inundação. A metodologia envolveu técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG, utilizando imagens Landsat 5-TM. Foram analisadas duas datas: 15 de maio de 1986 (período chuvoso) e 26 de setembro de 2000 (período seco), considerando a variação sazonal. A mediana do índice NDVI da classe "vegetação" caiu de 0,570 (1986) para 0,538 (2000), variação coerente com a diferença entre períodos úmido e seco, refletindo maior vigor vegetativo em 1986. Por outro lado, o NDWI da classe "água" apresentou redução acentuada, passando de 0,376 (1986) para 0,009 (2000). Mesmo sob influência sazonal, a queda do valor sugere aumento da turbidez, aproximando a assinatura espectral da água à de solo úmido, podendo estar relacionado ao processo de assoreamento do canal. Essas alterações na cobertura do solo e o assoreamento do rio reduziram a capacidade de armazenamento e escoamento natural das águas. A análise espacial, aliada às observações de campo, mostrou que medidas de engenharia, como o muro de contenção à beira-rio, não acompanharam as transformações territoriais. A estrutura encontra-se degradada e é frequentemente galgada durante cheias, quando o nível do rio ultrapassa sua altura, demonstrando falha em sua função e contribuindo para a maior suscetibilidade a alagamentos. Conclui-se que o uso de geotecnologias é fundamental para o monitoramento temporal e para subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação de desastres. Recomenda-se a adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como a restauração de manguezais e a recuperação de várzeas, visando reduzir riscos de inundação e promover o planejamento sustentável da bacia.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto; Hidrologia; Intervenção antrópica.

ABSTRACT: The mouth of the Una River, located in São José da Coroa Grande (PE), has a history of intensified flooding due to human activities. The basin, which harbors sensitive ecosystems such as mangroves and floodplains, suffers from disordered urban expansion and direct interventions, especially the manual opening of channels on the beach to facilitate drainage during floods. Understanding and monitoring these human actions in the various ecosystems is essential. Therefore, this work aims to analyze the spatio-temporal dynamics of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) and their relationship with human interventions. It is hypothesized that changes in land use and occupation, associated with the absence of territorial planning, intensify the risks of flooding. The methodology involved geoprocessing techniques in a GIS environment, using Landsat 5-TM images. Two dates were analyzed: May 15, 1986 (rainy season) and September 26, 2000 (dry season), considering seasonal

variation. The median NDVI index for the "vegetation" class fell from 0.570 (1986) to 0.538 (2000), a variation consistent with the difference between wet and dry periods, reflecting greater vegetative vigor in 1986. On the other hand, the NDWI for the "water" class showed a sharp reduction, going from 0.376 (1986) to 0.009 (2000). Even under seasonal influence, the drop in value suggests an increase in turbidity, bringing the spectral signature of water closer to that of moist soil, which may be related to the silting process of the channel. These changes in land cover and river silting reduced the storage capacity and natural flow of water. Spatial analysis, combined with field observations, showed that engineering measures, such as the riverbank retaining wall, have not kept pace with territorial transformations. The structure is degraded and is frequently overflowed during floods, when the river level exceeds its height, demonstrating a failure in its function and contributing to greater susceptibility to flooding. It is concluded that the use of geotechnologies is fundamental for temporal monitoring and to support public policies aimed at mitigating disasters. The adoption of Nature-Based Solutions (NbS), such as mangrove restoration and floodplain recovery, is recommended to reduce flood risks and promote sustainable basin planning.

KEYWORDS: Remote Sensing; Hydrology; Anthropogenic intervention.

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Una, localizada no município de São José da Coroa Grande, Pernambuco, apresenta elevada importância ecológica, social e econômica. O distrito da Várzea do Una abriga ecossistemas sensíveis, como manguezais e planícies de inundação, que desempenham papel fundamental na regulação hídrica e na manutenção da biodiversidade. Contudo, as intensas transformações antrópicas, especialmente o avanço urbano desordenado e a abertura artificial da foz do rio, vêm modificando significativamente a dinâmica natural da bacia.

Historicamente, durante eventos de cheia, moradores realizam a abertura manual de um canal na praia, a fim de facilitar o escoamento das águas acumuladas. Embora essa prática forneça alívio imediato, intervenções análogas em zonas costeiras têm sido associadas a alterações na dinâmica sedimentar e na estabilidade de ecossistemas estuarinos, conforme apontam Silva *et al*. (2021) e Correia & Andrade (2023). Assim, compreender como tais ações influenciam o comportamento hidrológico do rio Una é essencial para avaliar riscos e orientar a gestão territorial.

Neste trabalho a dinâmica hídrica do rio Una foi analisada por meio de indicadores espaciais derivados dos índices NDVI e NDWI. O uso de índices espectrais tem se consolidado como uma técnica robusta para a identificação de áreas de inundação e de vulnerabilidade hídrica (Xavier *et al*., 2009). Estudos aplicados na região Nordeste, como o de Gonzaga *et al*. (2011), já demonstraram a eficácia da combinação do NDVI e NDWI para compreender o comportamento da paisagem sob diferentes intensidades pluviométricas. Essas mudanças refletem processos hidrológicos fundamentais.

Diante deste cenário, compreender as transformações espaciais e temporais ocorridas na bacia é fundamental para subsidiar políticas de manejo sustentável. Assim, este estudo busca analisar, por meio de geotecnologias, as alterações ambientais oriundas de ações antrópicas na foz do rio Una entre os anos de 1986 e 2000.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende a bacia do rio Una, localizada no município de São José da Coroa Grande, no litoral sul de Pernambuco. A região possui clima tropical úmido, com chuvas concentradas entre abril e agosto, e vegetação predominante de mangue e restinga. A bacia é caracterizada por uma planície

de baixa declividade e drenagem meandrante, o que favorece processos de alagamento durante eventos pluviométricos intensos. (SGB, 2023; APAC-PE, 2025).

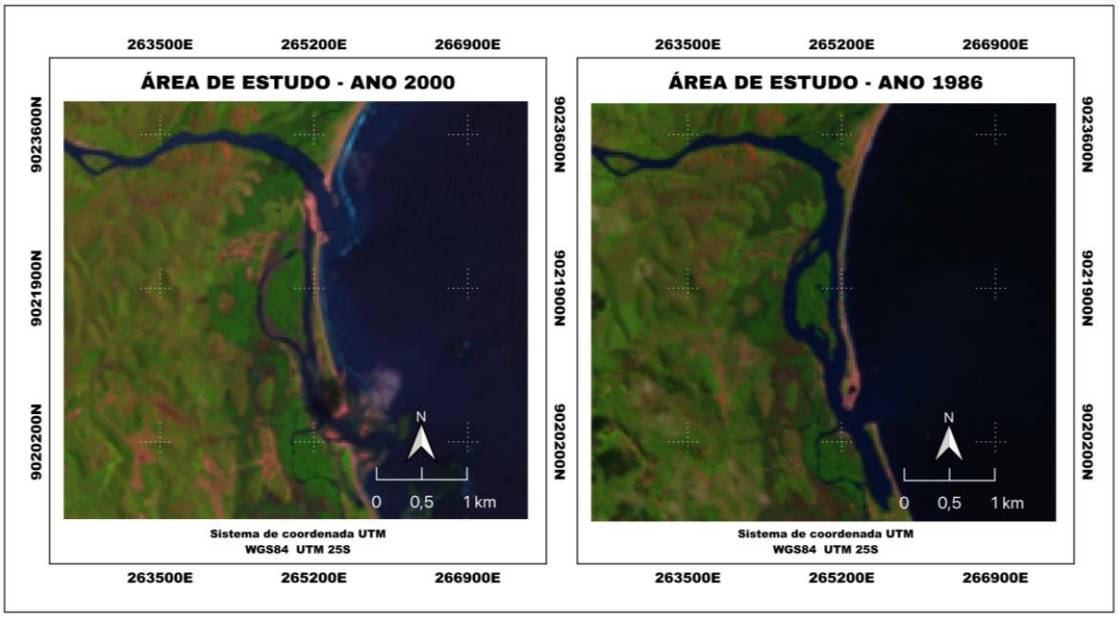


Figura 1. Área de estudo (RGB 543).

2.2 Dados utilizados

Foram utilizadas duas imagens do satélite Landsat 5-TM, referentes às datas de 15 de maio de 1986 e 26 de setembro de 2000, obtidas no portal *EarthExplorer* (USGS). As cenas correspondem ao órbita/ponto 214/066 e foram selecionadas por apresentarem baixa cobertura de nuvens. O sistema de referência adotado foi o WGS-84 / UTM Zone 25S.

2.3 Procedimentos metodológicos

O processamento das imagens e a análise espacial foram realizados no *software* QGIS LTR 3.44. O fluxo metodológico foi estruturado em quatro etapas principais: pré-processamento, calibração radiométrica, geração dos índices e interpretação espacial.

2.3.1 Pré-processamento das imagens

As imagens Landsat 5 TM foram obtidas no portal *EarthExplorer* (USGS), considerando o nível 1 de processamento em formato GeoTIFF, com correção geométrica padrão. Para garantir a precisão posicional, realizou-se uma correção geométrica das cenas a partir de uma imagem ortorretificada do IBGE, ajustando-as ao sistema WGS 84 / UTM Zone 25S. Após este procedimento, a cena foi enquadrada na área de interesse, com as seguintes coordenadas geográficas UTM Zone 25S Datum WGS84: 262.433,79 m, 9.019.346,50 m ; 267.563,46 m, 9.023.966,21m.

2.3.3 Conversão radiométrica e cálculo dos índices espectrais.

Para calcular os índices espectrais, os números digitais (*DN*) foram convertidos em radiância (*Equação 01*) e reflectância (*Equação 02*) da superfície segundo as equações do *relatório de calibração do Landsat 5* (USGS, 2018). Essa padronização assegurou comparabilidade radiométrica entre as imagens de 1986 e 2000.

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (01)$$

onde, a_i e b_i correspondem a radiância mínima e máxima, respectivamente, obtidas de acordo com Chander *et al*. Em seguida, foi calculada a reflectância espectral ($\rho\lambda_i$), que é definida como a razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente no topo da atmosfera. Conforme (Equação 02), que converte a radiância espectral ($L_{\lambda i}$) em reflectância espectral. Para isso, utilizou-se a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($k_{\lambda i}$), a constante solar espectral (dr) e o ângulo zenital solar (*Z*), conforme Allen *et al*. (2007). O ângulo zenital (*Z*) (*Equação 03*) foi determinado a partir do ângulo de elevação solar (*E*), informação obtida no arquivo metadado da imagem. A constante solar espectral (*dr*) (Equação 04), que corrige a variação da irradiância, foi calculada com base no dia sequencial do ano (*DSA*).

$$\rho\lambda i = \frac{(\pi * L_{\lambda i})}{k_{\lambda i} * \cos Z * dr} \quad (02)$$

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (03)$$

$$dr = 1 + 0{,}33 * \cos\left(\frac{DSA * 2\pi}{365}\right) \quad (04)$$

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi calculado a partir das bandas espectrais do vermelho (RED – Banda 3) e do infravermelho (NIR – Banda 4) do sensor Landsat 5, conforme proposto por Rouse *et al*. (1973), segundo a equação:

$$NDVI = \frac{(NIR + RED)}{(NIR - RED)} \quad (05)$$

A fundamentação física do índice está associada ao comportamento espectral da vegetação: a clorofila presente nas folhas absorve fortemente a radiação na região do vermelho do espectro eletromagnético para a realização da fotossíntese, enquanto a estrutura interna das folhas promove alta reflectância no infravermelho próximo devido à dispersão múltipla da radiação no mesófilo foliar (Jensen, 2007).

Assim áreas com vegetação vigorosa apresentam valores elevados de NDVI, geralmente superiores a 0,4, indicando maior biomassa e atividade fotossintética. Valores próximos de zero estão associados a superfícies com baixa cobertura vegetal ou solo exposto, enquanto valores negativos tendem a representar corpos d'água ou superfícies não vegetadas com baixa reflectância no NIR (Rouse *et al*., 1973; Jensen, 2007).

Já o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) foi calculado a a partir das bandas espectrais do verde (*GREEN* - Banda 2 - Verde) e do infravermelho próximo (*NIR* - Banda 4) do sensor *Landsat* 5, conforme proposto por McFeeters (1996), conforme equação 06. Este índice evidencia áreas com maior teor de umidade ou corpos hídricos abertos e difere da abordagem complementar de Gao (1996), que foca no conteúdo de água líquido da própria vegetação. A fundamentação física deste índice baseia-se na propriedade de reflectância da água, que apresenta maior refletividade na região do visível (banda do verde) e alta absorção na região do infravermelho próximo (*NIR*).

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (06)$$

As imagens resultantes foram reclassificadas em intervalos de intensidade (alta e baixa) e exportadas para análise estatística.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para evidenciar a transição física dos alvos (ex: áreas de espelho d'água que sofreram assoreamento), foram coletadas amostras dos índices considerando as classes água, vegetação e solo exposto e mantendo as coordenadas entre as coletas das amostras dos anos 1986 e 2000. A análise dessas amostras indicou uma expressiva alteração entre os índices nas duas diferentes imagens.

Os índices NDVI e NDWI revelaram mudanças expressivas na paisagem entre 1986 e 2000, refletindo tanto a variação sazonal (maio/1986 chuvoso versus setembro/2000 seco) quanto os impactos antrópicos. Em 1986 (período chuvoso), a bacia apresentava um caráter predominantemente natural. A análise espacial da figura 2 (NDVI 1986) demonstra uma ampla predominância de vegetação densa, especialmente nas margens do rio e zonas de manguezal. Isso é confirmado quantitativamente pela figura 3, que registra um NDVI mediano para a vegetação de 0,570, indicando alto vigor e saúde. Paralelamente, a figura 2 (NDWI 1986) evidencia alta disponibilidade de água superficial, com valores positivos predominando nas calhas do rio e várzeas. A figura 3 corrobora isso, com um NDWI mediano para a água de 0,376, um valor positivo característico de corpos hídricos com baixa turbidez.

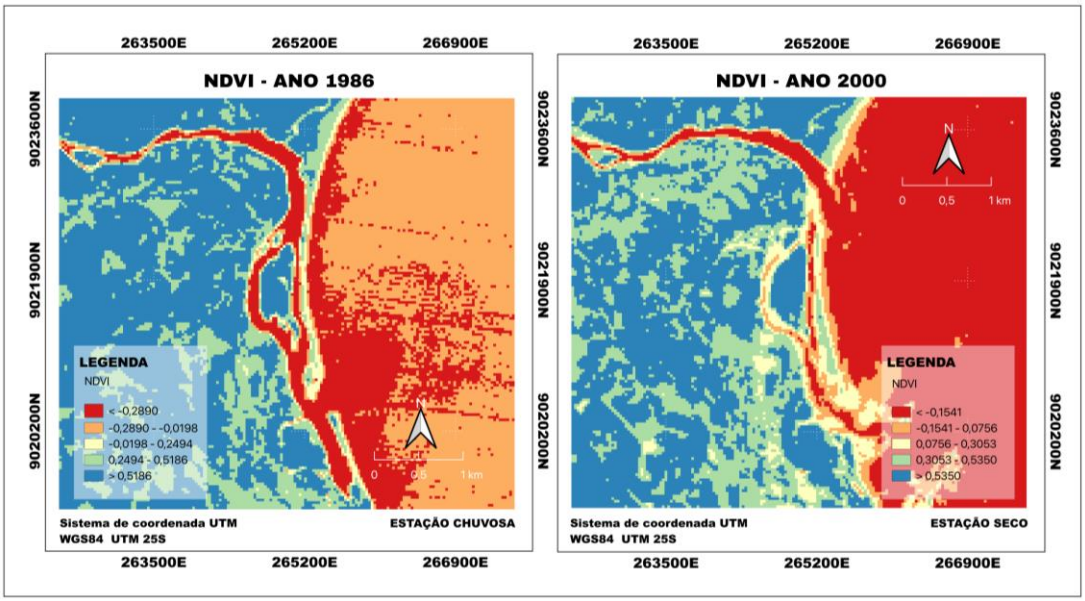
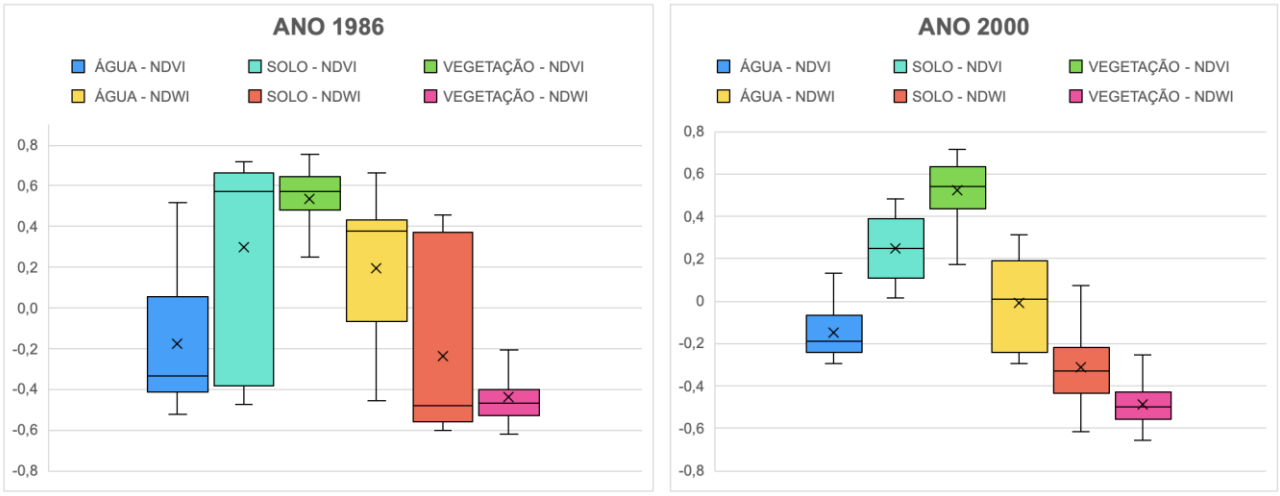


Figura 2. NDVI para os anos de 1986 e 2000.

A análise estatística apresentada na Figura 3 permite observar a distribuição dos índices espectrais para as classes de cobertura do solo no período chuvoso de 1986. Nota-se que a mediana (Q2) da classe vegetação apresenta valores elevados, em torno de 0,570, o que caracteriza um vigor vegetativo típico de áreas preservadas de manguezal. Quanto ao *NDWI*, os valores da classe água concentram-se em patamares positivos, com mediana de 0,376, indicando a presença de corpos hídricos com baixa turbidez e espelhos d'água bem definidos na foz do rio Una.



(a) (b)

Figura 3. Análise estatística da imagem de 1986 e 2000.

Em 2000 (período seco), o cenário é de nítida alteração. A figura 2 (NDVI 2000) mostra uma visível redução espacial das áreas com vegetação densa e um aumento de superfícies com NDVI próximo de zero, indicando solo exposto e avanço de áreas antropizadas. Observando a figura 3b, que detalha o comportamento dos índices no período seco de 2000, percebe-se que a mediana do NDVI da vegetação apresentou ligeira queda para 0,538. No entanto, a alteração mais expressiva é observada na classe água, onde o *NDWI* mediano regrediu para um valor de 0,009. Esta intensa modificação na característica espectral da água no canal principal parece sugerir um processo de assoreamento, aproximando a resposta do alvo à de solo úmido ou lama, o que compromete diretamente a dinâmica de escoamento e agrava o risco de alagamentos.

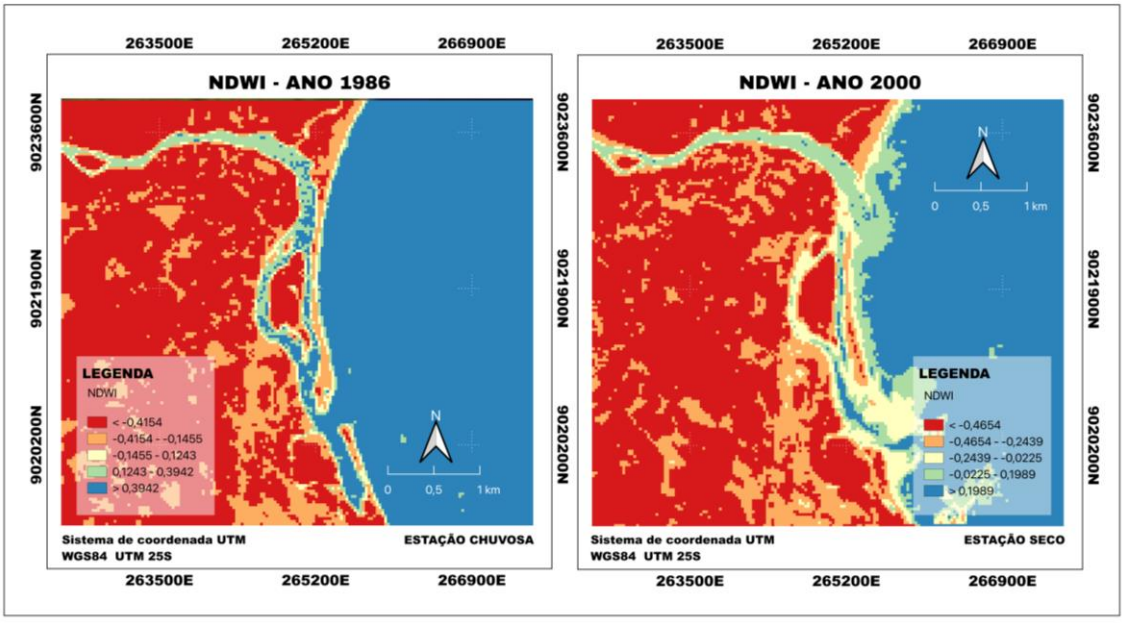


Figura 4. NDWI para os anos de 1986 e 2000.

Essas modificações espaciais (Figuras 2-4) e quantitativas (Figura 3) evidenciam o impacto cumulativo das intervenções antrópicas. A supressão da vegetação marginal intensifica a erosão, levando ao assoreamento

do canal (refletido na redução do NDWI mediano). A construção de canais artificiais e a ocupação irregular das margens reduziram a capacidade natural de escoamento, intensificando os processos de inundação.

Portanto, a análise multitemporal dos índices permitiu não apenas identificar a degradação, mas também compreender a relação direta entre as alterações antrópicas (desmatamento, ocupação) e a intensificação dos eventos de alagamento (causados pelo assoreamento). Isso reforça a necessidade de adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como recuperação de áreas de várzea e replantio de vegetação ripária, para mitigação sustentável dos riscos hídricos.

4 CONCLUSÕES

A análise multitemporal da Bacia do Rio Una entre 1986 e 2000 evidenciou expressivas transformações ambientais decorrentes das intervenções antrópicas. A redução da cobertura vegetal e o avanço da urbanização alteraram a dinâmica natural do rio, intensificando o risco de alagamento.

O emprego de índices espectrais (NDVI e NDWI) mostrou-se eficiente para quantificar as mudanças de uso e cobertura do solo, permitindo identificar as áreas mais críticas em termos de vulnerabilidade hídrica. A adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) – como restauração de manguezais e recuperação de várzeas – apresenta-se como alternativa viável para mitigar impactos e promover a resiliência ambiental da região.

Recomenda-se a ampliação do estudo por meio da integração de modelagens hidrológicas (HEC-HMS) e hidrodinâmicas (HEC-RAS), visando simular o comportamento do escoamento e subsidiar ações de planejamento territorial sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). (2026). *Climatologia por município*. Disponível em : <https://www.apa.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>. Acesso em: 09 fev. 2026.

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, S. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *133*(4).

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, *113*(4), 893-903.

Correia, I. O., & Andrade, A. C. da S. (2023). Erosão costeira e faixas de proteção no delta do rio São Francisco. *Revista de Geociências*.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257–266.

Gonzaga, E. P., Santos, V. V., & Nicácio, R. M. (2011). Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, 1736–1743.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2022). *Bases cartográficas contínuas - Imagens ortorretificadas*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 set. 2025.

Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the deineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425-1432.

Rouse, J. W., et al. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, *1*, 309–317.

Serviço Geológico do Brasil (SGB). (2026). *GeoSGB – Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil*. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/geosgb/>. Acesso em: 09 fev. 2026

Silva, M. S. G., et al. (2021). Active mechanisms controlling morphodynamics of a coastal barrier: Ilha Comprida, Brazil. *Geomorphology*, *389*.

United States Geological Survey (USGS). (2025). *Earth Explorer*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02 out. 2025.

United States Geological Survey (USGS). (2018). *Landsat 4-5 Collection 1 (C1) Level 1 (L1) Data Format Control Book*. USGS.

Xavier, A. C., Rudorff, B. F. T., & Moreira, M. A. (2009). Desenvolvimento de índices espectrais para identificação de áreas de inundação. *Revista Brasileira de Cartografia*, *61*(2), 121–134.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/61

Análise Laboratorial de Mistura Solo-Fosfogesso para Camada de Base de Aterro Sanitário

Leonardo Cabrera Parra Ramos
Engenhario Civil, Araraquara, Brasil, ld1_h@hotmail.com

Simone Cristina de Jesus
Professora do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triangulo Mineiro, Uberaba, Brasil, simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo estudar, a partir de análise laboratorial, o comportamento físico e mecânico de mistura de solo-fosfogesso destinados a camada de base de aterros sanitários. O fosfogesso é um resíduo resultante da produção de ácido fosfórico, principal componente de fertilizantes fosfatados. É gerado em grande escala, originando sérios problemas no seu acondicionamento. O traço 1:1 foi definido de maneira a incluir a maior quantidade de fosfogesso, em massa, e que permitisse a determinação das suas características físicas e mecânicas. A caracterização dos materiais incluiu a determinação da massa específica dos grãos, dos limites de liquidez e plasticidade, da granulometria, análises químicas e ensaios de compactação, na energia Normal, e adensamento. A análise granulométrica do solo mostrou a maior concentração de areia. Já para mistura não foi possível analisar, já que após 4 minutos do início das leituras no densímetro notou-se a completa sedimentação do material. O resultado do ensaio de compactação para a mistura apresentou valores para a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) de 1,298 g/cm³ e teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 37,9 %. Esses dados foram essenciais para a moldagem de corpo de prova do ensaio de adensamento. Através do ensaio de adensamento determinou o coeficiente de adensamento (cv) com valor médio de 3,9 x 10^{-6} m^2/s. Comportamento compressível foi verificado, já que com a inserção das cargas o relógio comparador apresentava variação constante durante toda as 24 horas do carregamento. Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível determinar a permeabilidade média da mistura de 9,98 x 10^{-9}m/s. Valor este adequado segundo Boscov (2012) que cita que a permeabilidade recomendada para solos compactados de camada de base de aterros sanitários deve ser igual ou menor a 10^{-9} m/s. A partir dos resultados obtidos foi comparado a viabilidade do traço escolhido aos padrões recomendados, chegando a uma resposta positiva entre os resultados apresentados e os requisitos impostos por normativas nacionais, internacionais e bibliográficas.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito, Sustentabilidade, Mineração, Ensaios de Solo, Revestimento de Fundo.

ABSTRACT: This study aims to investigate, through laboratory analyses, the physical and mechanical behavior of a soil–phosphogypsum mixture intended for use as a base liner layer in sanitary landfills. Phosphogypsum is a by-product generated during the production of phosphoric acid, the main component of phosphate fertilizers. It is produced on a large scale, creating significant challenges regarding its storage and disposal. A 1:1 mixture ratio was selected in order to incorporate the highest possible amount of phosphogypsum by mass while still allowing the determination of its physical and mechanical properties. Material characterization included the determination of specific gravity, liquid and plastic limits, grain size distribution, chemical analyses, standard Proctor compaction tests, and consolidation tests. The grain size analysis of the soil revealed a predominance of sand particles. However, grain size analysis could not be completed for the mixture because complete sedimentation of the material was observed after only four minutes from the beginning of the hydrometer readings. The compaction test results for the mixture indicated a maximum dry density (ρd,max) of 1.298 g/cm³ and an optimum moisture content (wopt) of 37.9%. These parameters were essential for preparing the specimens used in the consolidation tests. The consolidation tests yielded an average coefficient of consolidation (cv) of 3.9×10^{-6} m²/s. Compressible behavior was observed, as the dial gauge showed continuous deformation throughout the entire 24-hour loading period. Based on the results obtained from these tests, the average permeability of the mixture was determined to be 9.98×10^{-9} m/s. This value is considered suitable according to Boscov (2012), who states that the recommended

permeability for compacted soils used as landfill base liner layers should be equal to or less than 10^{-9} m/s. The results obtained were used to evaluate the feasibility of the selected mixture ratio in comparison with recommended standards. The analysis indicated that the mixture satisfies the requirements established by national and international standards, as well as those reported in the technical literature, demonstrating its potential suitability for the proposed application.
KEYWORDS: Tailings, Sustainability, Mining, Soil Testing, Backfill.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da adoção de políticas ambientais rigorosas e capazes de alcançar em âmbito legal a preservação do meio ambiente é um aspecto progressivo, além de ser um direito garantido pela Constituição Federal de 1988 em seu Artigo 23. Portanto, sendo dever de todos os entes federativos "proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas".

A Lei de número 12.305/2010, conhecida também como Política Nacional de Resíduos Sólidos, visa regular a gestão dos resíduos sólidos, possibilitando a diminuição no volume de produção, reuso, reciclagem e reutilização.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR, 2019), dos 5570 municípios da federação, apenas 3712 prestam informações ao SINIR e somente 2487 possuem planos de gestão de resíduos sólidos. Ademais, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), 39,8% dos municípios brasileiros não destinam adequadamente seus resíduos.

Quanto à destinação final dos resíduos, o aterro sanitário é construído sob critérios de engenharia e normas operacionais, sendo o único método de disposição permitido por lei no Brasil.

Em se tratando de aterro sanitário, a camada de impermeabilização inferior ou camada de base se configura como uma das maiores preocupações deste projeto, por ter como função reduzir o transporte de poluentes para camadas de solos inferiores, evitando, deste modo, a contaminação do subsolo e da água subterrânea.

A camada de base pode ser composta por camadas de solo compactadas, geossintéticos ou geocomposto argiloso, ou uma combinação destas (BOSCOV, 2012). A incorporação de rejeitos na camada de base é estudada por razões ambientais e econômicas, incluindo resíduos da construção e demolição e o subproduto da produção de ácido fosfórico conhecido como fosfogesso, sendo utilizações deste material analisadas por Silva (2016) e Rufato (2017).

Em vista disto, o presente artigo apresentou a análise do uso do fosfogesso incorporado a camada de base de aterro sanitário. Para tal, foram realizados ensaios e análises a partir da incorporação deste resíduo junto ao solo presente ao aterro municipal de Uberaba – Minas Gerais. O projeto visou absorver a demanda do resíduo, incorporando-o na camada e assegurando o mínimo de alterações em suas características físicas e mecânicas, viabilidade de implantação do método e redução do impacto ambiental quando comparado ao solo original.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado neste estudo foi cerca de 50kg, coletado na área do Aterro Sanitário do município de Uberaba, MG, localizado na Avenida Filomena Cartafina km 17 e encaminhado para o laboratório didático B1/B2 - Laboratório de Mecânica dos Solos, Geologia, Materiais de Construção Civil e Estrutura e Transporte do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (ICTE/UFTM). Este solo é o mesmo utilizado na área para a camada de base do aterro e foi coletado de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 2016).

O fosfogesso utilizado foi disponibilizado pela empresa Mosaic Fertilizantes localizada no município de Uberaba, MG. O resíduo foi fornecido no seu estado natural e estava acondicionado em dois sacos de 50 kg no laboratório didático B1/B2.

A mistura utilizada (50% de solo e 50% de fosfogesso, em massa) foi escolhida de acordo com a quantidade máxima de rejeito que pode ser incorporado ao solo da camada de base de aterro sanitário, sem causar prejuízos nas características físicas e mecânicas dessa estrutura. Silva (2016) e Rufato (2017) avaliaram o comportamento mecânico da mistura de solo e fosfogesso (80% solo + 20% fosfogesso, em massa) e encontrou parâmetros adequados para o uso como revestimento de fundo de aterros sanitários.

2.2 Métodos

O solo e a mistura foram submetidos a um programa de ensaios para a caracterização física e análise química e físico-química, sendo que, antecedendo aos ensaios, o solo e o fosfogesso foram dispostos em bandejas para a secagem até a umidade higroscópica e preparados conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016).

A caracterização física foi composta pelos ensaios de massa específica dos sólidos, análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade. Após a caracterização física, a mistura foi submetida ao ensaio de compactação na Energia do Proctor Normal e ensaio de Adensamento Unidimensional. Os ensaios foram realizados seguindo as normas pertinentes e apresentadas a seguir.

2.2.1 Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL)

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. O intuito foi avaliar o comportamento do solo e da mistura quanto à consistência, visto que, estes parâmetros são requisitos para a viabilidade do material como base de aterro sanitário (BOSCOV, 2012).

O limite de plasticidade é usado para avaliar a capacidade do solo de suportar cargas sem perder sua estabilidade, determinando-se a umidade máxima na qual o solo pode ser moldado sem quebrar e mantendo sua forma após a remoção da carga.

Segundo Jesus *et al*. (2016), não é possível determinar LL e LP do fosfogesso já que este em contato com a água apresenta comportamento semelhante a fluídos não newtonianos, o que não confere a trabalhabilidade necessária para a sua execução. Sendo assim, optou-se por iniciar os ensaios pela determinação da quantidade máxima de fosfogesso a ser acrescentada ao solo, de forma que fosse possível a determinação do limite de plasticidade.

Deste modo, foi possível a execução do ensaio de limite de plasticidade para uma mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso, em massa, sendo esse traço utilizado neste estudo.

2.2.2 Analise Granulométrica

A granulometria foi realizada para o solo e para a mistura conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), que determina os procedimentos para a análise granulométrica conjunta, ou seja, por sedimentação e peneiramento. Para a etapa de sedimentação foi utilizado o defloculante hexametafosfato de sódio.

2.2.3 Massa Específica dos Sólidos

A massa específica dos sólidos foi determinada para o solo e para a mistura, seguindo as recomendações do Manual da Embrapa (EMBRAPA, 2017). Esta metodologia é uma adaptação da norma DNER – ME 093/94, na qual se utiliza Etanol P.A, em substituição a água destilada, sem necessidade de fervura da amostra, tornando o ensaio mais prático e ágil.

2.2.4 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado apenas para a mistura, objeto principal do estudo, de acordo com a NBR 7182 (2016) na Energia do Proctor Normal. O intuito foi determinar os ìndices físicos, umidade ótima e a massa específica seca máxima, que correspondem ao máximo grau de compactação.

Determinados estes índices físicos, uma nova amostra da mistura foi preparada com o teor de umidade ótima e compactada na Energia Normal. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do cilindro e a amostra para o ensaio de adensamento foi confeccionada através de talhamento e cravação de anel metálico indeformável de 2 cm de altura e 8,73 cm de diâmetro.

2.2.5 Ensaio de Adensamento Unidimensional

O ensaio de adensamento foi realizado na amostra da mistura moldada com o anel metálico indeformável e seguindo as recomendações da NBR 16853 (2020). Essa amostra estava compactada no teor de umidade ótima e na Energia Normal do Proctor. O ensaio possibilitou conhecer o comportamento da mistura quando submetida a carregamentos externos e determinar no seu máximo grau de compactação o coeficiente de adensamento vertical (cv), coeficiente de permeabilidade vertical (k), índice de compressão (Cc), índice de recompressão (Cr) e variação do índice de vazios.

O ensaio foi realizado com amostra saturada e inundada e submetida aplicação das cargas (12,5; 25; 100; 200; 400 e 800kPa) por um período mínimo de 24 horas, e em sequência foi realizado o descarregamento.

2.2.6 Análise Química e Físico-química

Amostra de solo e fosfogesso foram encaminhadas para o Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), sendo determinado o pH e a concentração de alguns metais pesados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo sobre a viabilidade do uso de fosfogesso incorporado ao solo da camada de base de aterro sanitário serão apresentados e discutidos a seguir.

3.1 Caracterização Física

Os resultados encontrados na determinação do Limite de Plasticidade (LP), Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Limite de Plasticidade do Solo

Amostra	LP	LL	IP
Solo	33	41	8
Mistura	40	43,5	3,5

Tabela 2. Requisitos mínimos dos limites de consistência para a camada de base de aterros sanitários.

Fonte	LL	IP
Omafra (2003)	$30 \leq LL \leq 60$	$11 \leq IP \leq 30$
EPA (1989)	-	≥ 10
Cetesb (1993)	≥ 30	≥ 15

FONTE: Adaptado Boscov (2012).

De acordo com os valores obtidos, tanto o solo quanto a mistura podem ser considerados como materiais de plasticidade média o que leva acreditar que esses materiais também irão apresentar compressibilidade média.

Em se tratando dos requisitos mínimos desses limites para uso como camada de base, apresentados na Tabela 2, nota-se que o LL, tanto para o solo quanto para a mistura se enquadram no estabelecido. No entanto

o valor de IP foge ao necessário, o que pode dificultar a trabalhabilidade no campo. A incorporação do rejeito reduziu ainda mais o valor de IP, o que indica que mudanças muito rápidas no estado do material podem ocorrer durante a movimentação no campo. Medidas mais criteriosas devem ser empregadas durante a execução dessa camada no campo, para evitar mudanças nas propriedades.

A granulometria é de suma importância na caracterização do solo e essencial para a escolha do material para camada de base em aterro sanitário.

Os resultados da granulometria e da massa específica dos sólidos, encontram-se na Tabela 3.

O solo é composto por argila, silte e areia, sendo a maior concentração de areia.

Tabela 3. Granulometria e massa específica dos sólidos obtidos do Solo e da mistura Solo/Fosfogesso de acordo com ABNT.

Amostra	Argila (%) $\Phi \leq 0{,}002$ mm	Silte (%) $0{,}002\text{mm} \leq \Phi \leq 0{,}06$ mm	Areia (%) $0{,}06\text{ mm} \leq \Phi \leq 2$ mm	Finos (%) $\Phi \leq 0{,}075$ mm	ρ_s (g/cm³)
Solo	22	33	45	70	3,076
Mistura	-	-	29	74	2,283

A análise granulométrica da mistura não foi possível analisar por essa metodologia. Durante o processo de sedimentação, após 4 minutos do início das leituras no densímetro notou-se a completa sedimentação do material. Este fenômeno pode ser observado na Figura 1. Ao analisar as leituras no densímetro, durante o ensaio, inicialmente ocorreu a redução na densidade da solução, o que já era esperado. No entanto, após quinze minutos, a leitura no densímetro voltou a aumentar, indicando aumento da concentração da solução. Sendo assim, acredita-se que ocorreu trocas iônicas entre a solução e a mistura que provocou primeiramente a sedimentação dos sólidos e em sequência a liberação de algum íon aumentando a concentração iônica da solução.

O fosfogesso é subproduto do sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e o hexametafosfato de sódio constitui-se de $(NaPO_3)_6$. Analisando de uma forma genérica, devido à grande concentração de sódio (Na^+) na solução, este pode ter ocupado o lugar do Ca^{2+}, deixando de agir como defloculante, assim as partículas em suspensão ficam sujeitas a floculação e aglomeração, acelerando o processo de sedimentação.

A análise granulométrica do fosfogesso da mesma região, apresentado por Silva (2016), indicou a predominância de silte. Resultados semelhantes foram apresentados também por Oliveira (2005) e Eleutério (2016).

Analisando a granulometria do solo em estudo com a granulometria do fosfogesso apresentado por Silva (2016), espera-se que a mistura apresenta granulometria predominantemente de partículas finas ($\Phi \geq 0{,}075$ mm). Para maiores afirmações são necessárias análise granulométrica do fosfogesso atual e a mudança do agente defloculante, juntamente com a determinação da Argila Dispersa em Água (ADA).

Em se tratando do uso da mistura para revestimento de fundo de aterros sanitários, Boscov (2012) apresenta os requisitos mínimos quanto a granulometria na Tabela 4.



(a) (b)

Figura 1. Ensaio de Sedimentação: (a) Solo (b) mistura Solo/Fosfogesso.

Tabela 4. Requisitos mínimos da granulometria para a camada de base de aterros sanitários.

Fonte	Finos (%)	Argila (%)	Areia (%)

	$\Phi \leq 0{,}075$ mm	$\Phi \leq 0{,}002$ mm	$\leq 0{,}075\ \Phi \leq 4{,}8$ mm
Omafra (2003)	≥ 50	≥ 20	≤ 45
EPA (1989)	≥ 20	-	-
Cetesb (1993)	≥ 30	-	-

Fonte: Adaptado Boscov (2012).

Analisando a granulometria em relação à fração de areia, tanto a mistura quanto o solo, atenderam os requisitos mínimos de Omafra (2003) *apoud* Boscov (2012). Notando, também, que a mistura diminuiu a concentração de areia o que favorece ainda mais esta exigência. Contudo a porcentagem de fino e argila que o solo apresentou foi de 70% e 22%, respectivamente, se enquadrando também nos requisitos. No entanto, nenhuma afirmação pode ser feita em relação as porcentagens de finos e argila para a mistura, visto que, o ensaio de sedimentação apresentou comportamento fora do padrão.

A massa específica dos sólidos permitiu verificar o efeito do fosfogesso no comportamento do solo quanto a quantidade de partícula, em massa, por volume. Notou uma redução na densidade superior a 25%, como consta na Tabela 3. Devido a coloração do solo ser avermelhada, é considerável a presença de óxido ou hidróxido de Ferro na composição. Sendo assim a presença desse mineral faz com que a massa seca desse solo seja maior, para o mesmo volume, em comparação a mistura que tem apenas 50% do solo.

O solo apresentou valor de massa específica dos sólidos comumente encontrada na literatura para solos com presença do óxido hidróxido de Ferro.

3.2 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica contou com a realização dos ensaios de Compactação e Adensamento Unidimensional.

O resultado do ensaio de compactação para a mistura foi plotado em gráfico de teor de umidade (%) versus massa específica seca (g/cm³) para obtenção das curvas de compactação de acordo com a Energia Normal. O valor obtido para a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) foi de 1,298 g/cm³ e teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 37,9 %, como apresentado na Tabela 5.

Observa-se que a o teor de umidade ótimo está abaixo do valor do limite de plasticidade, o que pode favorecer a trabalhabilidade no campo para esse material, já que o índice de plasticidade foi bem estreito. Assim, mudanças repentinas e preocupantes, no comportamento da mistura, podem ser evitadas, tais como, mudança do estado plástico para líquido.

Tabela 5. Teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima.

COMPACTAÇÃO		
$W_{ót}$	37,9	%
$\rho_{dmáx}$	1.298	g/cm³

Esses dados foram essenciais para a moldagem de corpo de prova do ensaio de adensamento.

Durante a execução do ensaio de compactação, percebeu-se que a mistura em seu estado solto apresentava grande volume, porém, quando submetido a compactação era bruscamente reduzida, mostrando grande capacidade de compressão, consequentemente, redução do índice de vazios.

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado na mistura para avaliar a capacidade de compressibilidade quando sujeito a cargas externas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros determinados através do ensaio de adensamento para a mistura solo/fosfogesso

Parâmetro	Valor
Índice de vazios inicial - ei	0,76
Índice de vazios final - ef	0,46
Índice de compressão - cc	0,144

Índice de recompressão - cr	0,027
Coeficiente de compressibilidade - av (kPa^{-1})	$4,5 \times 10^{-4}$
Coeficiente de adensamento - cv (m^2/s)	$3,9 \times 10^{-6}$
Coeficiente de permeabilidade vertical - k (m/s)	$9,98 \times 10^{-9}$

O coeficiente de adensamento (cv), para cada etapa de carregamento, foi semelhante, com valor médio de $3,9 \times 10^{-6}$ m^2/s. Este resultado foi diferente do obtido por Silva (2016) para uma mistura compactada de 80% solo e 20% fosfogesso, que foi de $4,88 \times 10^{-8}$ m^2/s. Esse aumento no cv pode ser pelo uso de um solo com porcentagem de areia de 45%, valor maior que o usado por Silva (2016), que foi de 15%.

O valor do coeficiente de compressibilidade (av) foi de $4,5 \times 10^{-4}$ kPa^{-1} na mesma ordem de grandeza apresentado por Silva (2016). Analisando os resultados, percebe-se que o comportamento da mistura se assemelha a de solos muito compressíveis, o que pode ser um problema, devido a solicitações e recalques diferenciais, podendo criar fissuras e caminhos preferenciais para o percolado.

Esse comportamento compressível foi verificado, já que com a inserção das cargas o relógio comparador apresentava variação constante durante toda as 24 horas do carregamento. O que pode ter favorecido esse desempenho, e o fato da mistura ter sido saturada e inundada durante todo o ensaio. É de conhecimento que o comportamento da mistura se altera com pequena variação do teor de umidade (IP = 3,5). Sendo assim, recomenda-se a realização do ensaio sem saturação e inundação da amostra.

Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível determinar a permeabilidade do solo, para cada etapa. O valor médio obtido para o coeficiente de permeabilidade foi de $9,98 \times 10^{-9}$m/s. Valor este adequado segundo Boscov (2012) que cita que a permeabilidade recomendada para solos compactados de camada de base de aterros sanitários deve ser igual ou menor a 10^{-9} m/s.

3.3 Caracterização Química e Físico-Quimica

Os resultados da análise química do fosfogesso e do solo encontram-se na Tabela 8.

Sendo ambos materiais com pH ácido, acredita-se que o pH se manterá ácido para a mistura, o que não favorece os processos de retardamento de elementos tóxicos pelos vazios do solo. No entanto é necessário conhecer o Ponto de Carga Zero (PCZ) da mistura, para saber exatamente se as cargas disponibilizadas para troca são negativas ou positivas.

Tabela 8. Resultados análise química do solo e fosfogesso separadamente.

	pH	Teor P / %	Teor Ca / %	Teor S / %	Teor Zn / %	Teor Cd / %	Teor Cr / %	Teor Ni / %	Teor Pb / %	Teor Al / %
Amostra F	2,62	0,3818	20,8859	11,9441	0,0234	nd	nd	nd	0,0009	0,0273
Amostra S	5,87	0,0000	0,0281	0,0104	0,0006	nd	nd	nd	0,0001	0,4862

De acordo com Mesquita (2007), até 50% de fosfogesso misturado ao solo, tem-se a constância do pH em torno do pH do solo. Apenas para maiores teores de fosfogesso, observa-se redução no valor do pH.

Não foram encontradas concentrações significativas de metais em nenhuma das amostras. O que favorece o uso da mistura como revestimento de fundo, por não haver possibilidade de contaminação do subsolo e lençol freático, atentando aos padrões da Resolução COPAM 08/2022.

Já a presença do cálcio, junto com outras bases trocáveis, favorece troca catiônica com metais pesados que possam estar presentes no lixiviado, gerado na área do aterro sanitário, e se por alguma falha no sistema de drenagem, estes migrarem para a camada de base, retendo-os.

Em geral, as reações químicas causam um retardamento no transporte de contaminantes em solos (COELHO et al., 2003).

4 CONCLUSÕES

Conclui-se, através dos ensaios realizados e comparações com outros trabalhos, que a mistura solo-fosfogesso se enquadrou a alguns requisitos mínimos, com ressalvas a alguns quesitos como IP, a troca iônica incidida no ensaio de sedimentação, e a compressibilidade alta, parâmetros estes descritos por Boscov (2012), importantes requisitos para garantir um projeto de alta qualidade de construção.

Tido como parâmetro mais importante, o coeficiente de permeabilidade da mistura não se enquadrou aos requisitos de padrões nacionais e internacionais, porém já chegou muito próximo ao exigido, podendo ser estudado um aditivo junto à mistura, favorecendo a melhora do parâmetro. O coeficiente de permeabilidade vertical na grandeza menor ou igual a 10^{-9} garante uma percolação sob gradiente hidráulico unitário mínimo, onde esse percolado com o passar dos anos perderia sua capacidade poluente ao meio.

Este estudo conclui então de forma negativa a utilização do traço escolhido para camadas de base de aterros sanitários, porém não excluí a possibilidade, uma vez que não foi possível a análise de alguns parâmetros, devido ao fenômeno ocorrido na sedimentação, e a possível incorporação de aditivos a mistura para a melhora do coeficiente de permeabilidade vertical, IP e compressibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021). Panorama 2021. 1 ed. p. 22.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16.853. Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. Solo — Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9604. Abertura de peço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro.

Boscov, M. E. G. (2012) Geotecnia Ambiental, 1ª reimpressão, São Paulo, Oficina de Textos.

Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (2022). Deliberação Normativa n° 8. Minas Gerais.

Coelho, H. M. G.; Simões, G. F.; Lange, L. C. & Ferreira, C. F. A. (2003). Estudo preliminar da contaminação por metais pesados na área do *aterro* de *disposição* de *resíduos sólidos urbanos* do *Município* de *Cata Altas – MG*. In: *V Congresso Brasileiro* de *Geotecnia Ambiental - REGEO'2003. Porto Alegre, RS*

Departamento Nacional De Estradas E Rodagem (1994). DNER-ME 093: Solos - Determinação da densidade real. Brasília.

Eleutério et al (2016). Adição de Cal ao Fosfogesso e Análise do Comportamento Mecânico em Função do Tempo de Cura e Energias de Compactação para Utilização na Pavimentação. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Manual de métodos de análise de solo. Brasília.

Jesus, S.C; Andrade, L.C.R; Nascente, R; Eleutério, G.R (2016). Adição de cal ao fosfogesso e análise do comportamento mecânico em função do tempo de cura e energias de compactação para utilização na

pavimentação. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- COBRAMSEG, 2016 -19-22 Outubro, Belo Horizonte, MG.

Mesquita, G. M. (2007). Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Goiânia.

Oliveira, S. M. F (2005). Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária. Universidade de São Paulo, São Carlos.

Silva, J. E (2016). Estudo da viabilidade mecânica da aplicação do fosfogesso em camada de base de aterro sanitário. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.

Sistema Nacional de Informações Sobre Resíduos Sólidos (2019). Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 5 ago. 2022.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/62

Análise Mecânica e Química dos Efeitos da Aplicação de RPC e Cal Para Melhoramento de Solos da Formação Guabirotuba

Amanda Dalla Rosa Johann
Professora Adjunta, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, amandajohann@utfpr.edu.br

Ana Letícia Araszewski Gomes da Silva Bonnevialle
Graduanda do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, anaaraszewski@gmail.com

Thais Souza Costa
Engenheira Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, thais.s.c@hotmail.com

Lariessa Ferreira Lima
Engenheira Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, lariessafl@hotmail.com

RESUMO: Resíduos de polimento cerâmico (RPC), gerados no processo de polimento de peças, representam um desafio ambiental significativo para a indústria. Uma alternativa promissora é sua incorporação à cal, visando melhorar a estabilidade e as propriedades geotécnicas dos solos da Formação Guabirotuba. O seguinte estudo dá continuidade aos trabalhos de Costa (2024) e Lima (2024), que estabeleceram parâmetros mecânicos das misturas de RPC e cal. Quando usado isoladamente, o RPC não contribui para a resistência, mas sua combinação com cal em proporções mais elevadas mostrou ganhos de até 50% em compressão simples e superiores a 100% em compressão diametral. Visando uma melhor compreensão do comportamento mecânico já observado, este estudo tem como objetivo analisar o pH das misturas Solo-RPC-Cal, com o intuito de avaliar de que forma a alcalinidade interfere no desempenho estrutural do material. Com a realização dos ensaios, verificou-se que a mistura Solo-RPC-Cal com melhor desempenho mecânico apresentou pH de 12,7, enquanto as demais combinações com bom resultado mantiveram valores médios próximos de 12,4. Esses resultados confirmam que a alcalinidade elevada é importante, mas pode ser limitada como parâmetro isolado, já que misturas com pH alto e excesso de RPC em relação à cal não apresentaram um bom desempenho estrutural. Com base nos resultados, a inserção de baixos teores de RPC se mostra uma alternativa viável na estabilização de solos da formação Guabirotuba. O uso do resíduo de polimento cerâmico na indústria da construção civil mostra-se vantajoso sob uma perspectiva técnica e sustentável, ao reduzir impactos ambientais e viabilizar simultaneamente uma economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de polimento cerâmico, Estabilização de Solos, Alcalinidade.

ABSTRACT: Ceramic polishing waste (or in Portuguese - resíduos de polimento cerâmico, simply referred to as RPC), generated during the polishing process of ceramic pieces, represents a significant environmental challenge for the industry. A promising alternative is their incorporation into lime, aiming to improve soil stability and geotechnical properties in the Guabirotuba Formation. This study continues the work of Costa (2024) and Lima (2024), who established mechanical parameters of RPC-lime mixtures. When used alone, RPC does not contribute to strength improvement; however, its combination with lime in higher proportions proved to be efficient, with strength gains of up to 50% in unconfined compression and over 100% in diametral compression. To better understand the mechanical behavior previously identified, this study analyzes the pH of RPC-Lime mixtures to assess how alkalinity affects the material's structural performance. The best-performing mixture reached a pH of 12.7, while other successful combinations averaged around 12.4. These results confirm that high alkalinity is important, but it can be limited as an isolated parameter, since mixtures with high pH and excess RPC relative to lime did not show good structural performance. Based on the results, the inclusion of low RPC contents appears to be a viable alternative in the stabilization of soils from the Guabirotuba formation. The use of ceramic polishing waste in the construction industry

proves to be advantageous from a technical and sustainable perspective, reducing environmental impacts and simultaneously enabling a circular economy.

KEYWORDS: Ceramic polishing waste, Soil Stabilization, Alkalinity.

1 INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica brasileira é um setor de grande relevância econômica, sendo responsável por cerca de 1,0% do produto interno bruto nacional (Killer e Rotta, 2019). Apesar de sua contribuição expressiva para a economia do país, tal ramo produtivo gera diversos problemas ambientais, dentre eles a criação de resíduos de polimento cerâmico (RPC) e seu subsequente descarte impróprio em aterros. O RPC é originado do processo de polimento de revestimentos, cuja destinação incorreta ocasiona em diversos problemas, entre os quais se destacam o comprometimento dos recursos naturais não renováveis, a contaminação do solo e de corpos hídricos, e a poluição do ar por partículas finas (Zanelli et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se necessário buscar alternativas sustentáveis que mitiguem os efeitos negativos associados ao descarte inadequado proveniente da indústria cerâmica. Uma possível abordagem consiste no emprego de RPC agregado a cal hidratada, visando à estabilização de solos. A incorporação de resíduos cerâmicos como material de caráter pozolânico integra um dos preceitos da economia circular, pois além de impossibilitar a destinação incorreta, sua utilização como insumo alternativo favorece a preservação ambiental ao reduzir a extração de recursos naturais não renováveis (Jain et al., 2022; Wietschel et al., 2023). Por sua vez, a cal hidratada é utilizada como um agente estabilizante no solo, desencadeando ações químicas que impulsionam a alcalinidade do meio e promovem a formação de compostos cimentícios que aumentam a resistência e rigidez do material (Almuaythir et al., 2025).

Conforme descrito por Huang *et al*. (2021), a estabilização de solos é um procedimento amplamente empregado na engenharia civil, utilizado para alterar as propriedades do meio, com a finalidade de aprimorar seu desempenho geotécnico, aumentando a sua resistência, durabilidade e estabilidade dimensional. Essa técnica pode ser realizada por processos de natureza mecânica, como a compactação, ou por métodos químicos, mediante a incorporação de aditivos tradicionais, polímeros sintéticos ou geopolímeros, os quais promovem uma maior coesão entre as partículas do substrato.

Costa (2024) e Lima (2024) demonstraram em seus estudos que a interação RPC-cal apresenta vantagens na estabilização de um solo da formação Guabirotuba, conferindo maior resistência. Apesar dos avanços já observados, a relação entre o pH das misturas e seu desempenho mecânico resultante é um tema que requer estudos adicionais no campo da engenharia geotécnica. A alcalinidade de uma mistura RPC-cal está diretamente relacionada com a ativação das reações pozolânicas, sendo um fator determinante para a evolução das propriedades físico-mecânicas do solo estabilizado. Logo, a compreensão desse aspecto permite utilizar o pH como um parâmetro preditivo e de dosagem para garantir maior qualidade, durabilidade e desempenho mecânico das misturas aplicadas em campo.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência do pH em misturas de Solo-RPC-cal, a fim de validar seu uso como um indicador confiável para a previsão da eficiência da estabilização de solos da Formação Guabirotuba.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adota uma metodologia mesclada, incorporando a análise química (pela determinação do Potencial Hidrogeniônico) e a avaliação do desempenho mecânico de misturas destinadas ao aprimoramento geotécnico. As composições avaliadas incluem solo vermelho da formação Guabirotuba, resíduo de polimento cerâmico (RPC), cal hidratada e água destilada. Os resultados mecânicos foram previamente conduzidos e detalhados por Costa (2024) e Lima (2024).

2.1 Materiais

Para a realização dos ensaios químicos e de desempenho mecânico, foram utilizados os seguintes materiais:

2.1.1 Solo

O solo utilizado é oriundo da formação Guabirotuba, comumente encontrado no município de Curitiba, Paraná. As amostras foram coletadas a uma profundidade de aproximadamente 2 metros e então preparadas (secas, desagregadas e peneiradas na peneira nº 4) de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2024). A caracterização prévia do solo realizada por Costa (2024) e Lima (2024) indica uma granulometria de 29% de argila, 26% de silte, 44% de areia e 1% de pedregulho, classificando-o como argila siltosa ou silte argiloso perante o sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). A partir da carta de plasticidade de Casagrande, o material é considerado um silte de alta compressibilidade. Foram também determinados os valores de massa específica real dos grãos de 2,737 g/cm³, índice de plasticidade de 11%, peso específico aparente seco máximo de 14,70 kN/m³ e umidade ótima de 27,8%. O pH encontrado foi de 5.

2.1.2 Resíduo de Polimento Cerâmico (RPC)

O RPC é um subproduto originado do refinamento de placas na indústria cerâmica, etapa fundamental do acabamento que tem como objetivo proporcionar brilho e corrigir imperfeições superficiais dos materiais. Constituído essencialmente pela massa cerâmica base e pelo abrasivo utilizado no polimento, a composição química do RPC é majoritariamente de sílica (65,78%) e alumínio (18,93%), sendo o percentual residual de cerca de 4,18% composto por elementos como ferro, cálcio, magnésio e sais solúveis (Costa et al., 2020).

O RPC pode ser encontrado *in natura* ou moído. A forma *in natura* refere-se ao estado bruto do resíduo, sem qualquer tratamento prévio de moagem. Quando moído, é amplamente utilizado em aplicações de estabilização química de solos e em matrizes cimentícias, uma vez que seu potencial pozolânico se torna mais eficaz quando o material é reduzido a partículas finas. Para atender a esse requisito, o RPC seco é submetido à moagem em moinho cerâmico com esferas, seguida de peneiramento em malha de 150 µm (Costa et al., 2020). O resíduo empregado nesse estudo provém de uma fábrica de cerâmica na região metropolitana de Curitiba-PR, cujo pH foi determinado em 9,2.

2.1.3 Cal Hidratada

A cal escolhida para o estudo foi a cal hidratada CH-III, utilizada previamente em outros estudos de estabilização mecânica. De acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), esse material apresenta massa específica de 2,40 g/cm³, e os ensaios laboratoriais indicam um pH correspondente a 12,3.

2.1.4 Água destilada

A água destilada foi utilizada para que não ocorram reações indesejadas entre a mistura RPC-Cal e o meio, decorrentes da ação de impurezas ou sais minerais capazes de modificar as propriedades químicas da cal, comprometendo a estabilidade da mistura (Tang et al., 2023). O pH da água utilizada é de 5,6.

2.1.5 Dosagem dos corpos-de-prova

A dosagem foi definida para testar o efeito combinado do solo, cal e RPC em diferentes proporções. Os teores de RPC de 5, 10 e 15% e de cal de 3, 5, 7 e 9%, foram mantidos nos testes mecânicos e químicos, variando apenas a quantidade de solo. A Tabela 1 mostra a proporção dos materiais nos ensaios mecânicos.

Tabela 1. Dosagem das Misturas Solo-RPC e Solo-RPC-cal.

Dosagem	RPC%	CAL %	Solo (%)
0RPC0C	0%	0%	100%
5RPC0C	5%	0%	95%
10RPC0C	10%	0%	90%
15RPC0C	15%	0%	85%
5RPC3C	5%	3%	92%
5RPC5C	5%	5%	90%
5RPC7C	5%	7%	88%
5RPC9C	5%	9%	86%
10RPC3C	10%	3%	87%
10RPC5C	10%	5%	85%
10RPC7C	10%	7%	83%
10RPC9C	10%	9%	81%
15RPC3C	15%	3%	82%
15RPC5C	15%	5%	80%
15RPC7C	15%	7%	78%
15RPC9C	15%	9%	76%

Fonte: Elaborado a partir de Costa (2024) e Lima (2024)

Para os ensaios químicos, o principal parâmetro analisado foi o potencial hidrogeniônico (pH). Ao todo, 16 misturas foram preparadas utilizando uma massa base constante de 10 g de solo seco. As massas de RPC e cal, calculadas em porcentagem dessa base, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Massa das Misturas Solo-RPC e Solo-RPC-cal.

Mistura	Massa de RPC (g)	Massa de Cal (g)	Massa total (g)
0RPC0C	0,0	0,0	10
5RPC0C	0,5	0,0	10,5
10RPC0C	1,0	0,0	11
15RPC0C	1,5	0,0	11,5
5RPC3C	0,5	0,3	10,8
5RPC5C	0,5	0,53	11,03
5RPC7C	0,5	0,74	11,24
5RPC9C	0,5	0,95	11,45
10RPC3C	1,0	0,33	11,33
10RPC5C	1,0	0,55	11,55
10RPC7C	1,0	0,77	11,77
10RPC9C	1,0	0,99	11,99
15RPC3C	1,5	0,35	11,35
15RPC5C	1,5	0,58	12,08
15RPC7C	1,5	0,8	12,3
15RPC9C	1,5	1	12,5

Fonte: Elaboração própria

2.1.6 Modelagem dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios mecânicos de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Compressão Diametral, foram utilizados 4 corpos de prova por misturas, totalizando 64 unidades. O solo seco foi homogeneizado com RPC e cal, seguido da adição de água destilada. A compactação ocorreu em molde cilíndrico (100 mm de altura × 50 mm de diâmetro, proporção 2:1), conforme a NBR 12770 (ABNT, 2022), com base nos parâmetros médios obtidos com energia de Proctor normal, que apontam peso específico aparente seco máximo de 1,471 g/cm³ e umidade ótima de 28,8% (Lacerda, 2019). Após a verificação das dimensões, os corpos de prova foram envoltos em plástico filme para evitar perda de umidade e carbonatação precoce. Em seguida, as amostras foram mantidas em uma câmara úmida sob condições controladas por 28 dias, tempo destinado ao desenvolvimento das reações pozolânicas.

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaios mecânicos

Foram realizados os ensaios de compressão simples e diametral para avaliar, de forma complementar, a resistência à compressão simples e a resistência à tração das misturas Solo-RPC-Cal.

2.2.1.1 Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples consiste em aplicar carga axial sobre o corpo de prova até a ruptura, sendo a resistência determinada pela relação entre a carga máxima registrada no pico da curva tensão–deformação e a área da seção transversal. Em seu estudo, Costa (2024) rompeu os corpos de prova em uma prensa universal de acordo com os parâmetros da NBR 12770 (ABNT, 2022).

2.2.1.2 Resistência à Compressão Diametral

A fim de realizar o ensaio de resistência à compressão diametral, é empregado uma carga linear ao longo do diâmetro do corpo-de-prova, para assim verificar como a cimentação gerada pela mistura aumenta a coesão interna. Nos ensaios realizados por Lima (2024), foram utilizados cilindros de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, com concentrações variadas de RPC e cal conforme apresentado na Tabela 1. As amostras foram submetidas a 28 dias de cura em câmara úmida para melhor avanço das reações, segundo as normas da NBR 7222 (ABNT, 2011).

2.2.2 Ensaio de potencial hidrogeniônico

Os testes de potencial hidrogeniônico (pH) foram feitos utilizando um pHmetro previamente calibrado, a fim de medir o pH das amostras de solo, RPC, cal e suas respectivas misturas detalhadas na Tabela 2. Todas as amostras foram estabilizadas com água destilada, visando à neutralização de possíveis alterações causadas por sais solúveis. Em seguida, elas foram homogeneizadas e mantidas em repouso até que ocorresse a estabilização química.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaios mecânicos

Conforme constatado por Costa (2024) e Lima (2024), o uso do RPC isolado diminui a resistência do solo, como pode ser observado na Figura 1. Nos ensaios realizados de compressão simples e diametral, a dosagem 15RPC0C resultou em uma perda de aproximadamente 50% do desempenho mecânico original do solo. A adição de cal, por sua vez, neutraliza esse efeito, proporcionando melhor desempenho quando há equilíbrio entre os teores de RPC e cal ou quando a cal se sobressai.

A cal é um excelente ativador químico e agente estabilizador em materiais geotécnicos. Por ser uma fonte rica em cálcio, componente vital para a formação de fases cimentantes estáveis, ela possibilita a geração de estruturas geopoliméricas ao interagir em meio aquoso com materiais que contenham sílica e alumina em sua composição, como o RPC (Huang et al., 2021). Segundo Costa (2024) e Lima (2024), as reações pozolânicas resultantes desse processo são vitais para a estabilização eficaz de solos.

Em ambos os casos, o cenário que demonstrou melhor desempenho mecânico foi a mistura 10RPC9C. Nessa dosagem, o ensaio de compressão simples indicou resistência de 949,3 kPa, representando um aumento de 50% em relação ao solo natural; já no ensaio de compressão diametral, foi registrada uma resistência de 171,5 kPa, o que representa um ganho de 100%.

O solo natural apresentou resistências médias de 633,3 kPa à compressão simples e 83,25 kPa à tração. Em comparação, Lacerda (2019), ao estudar o mesmo solo e tempo de cura desta pesquisa, porém apenas com a adição de cal, obteve o valor de 704,73 para a resistência à compressão simples na mistura de 5% de cal. Comparando esse resultado com a mistura 5RPC5C deste estudo (859,80 kPa), constata-se que a inclusão do RPC faz uma diferença significativa no desempenho do material, promovendo um aumento de 22,01% na resistência à compressão simples quando há equilíbrio entre o RPC e cal, o que comprova a eficiência da sua atividade pozolânica.

3.2 Ensaios químicos

Os ensaios químicos foram realizados com o intuito de monitorar o pH das misturas, já que esse parâmetro permite antecipar a reatividade e solubilidade da sílica e da alumina presentes no RPC e no solo. Essa análise é fundamental, pois a concentração de álcalis no sistema determina o grau de agressividade química necessário para promover a dissolução das partículas sólidas, possibilitando a conversão de precursores estáveis em espécies reativas que participam da formação da matriz final (Huang et al., 2021).

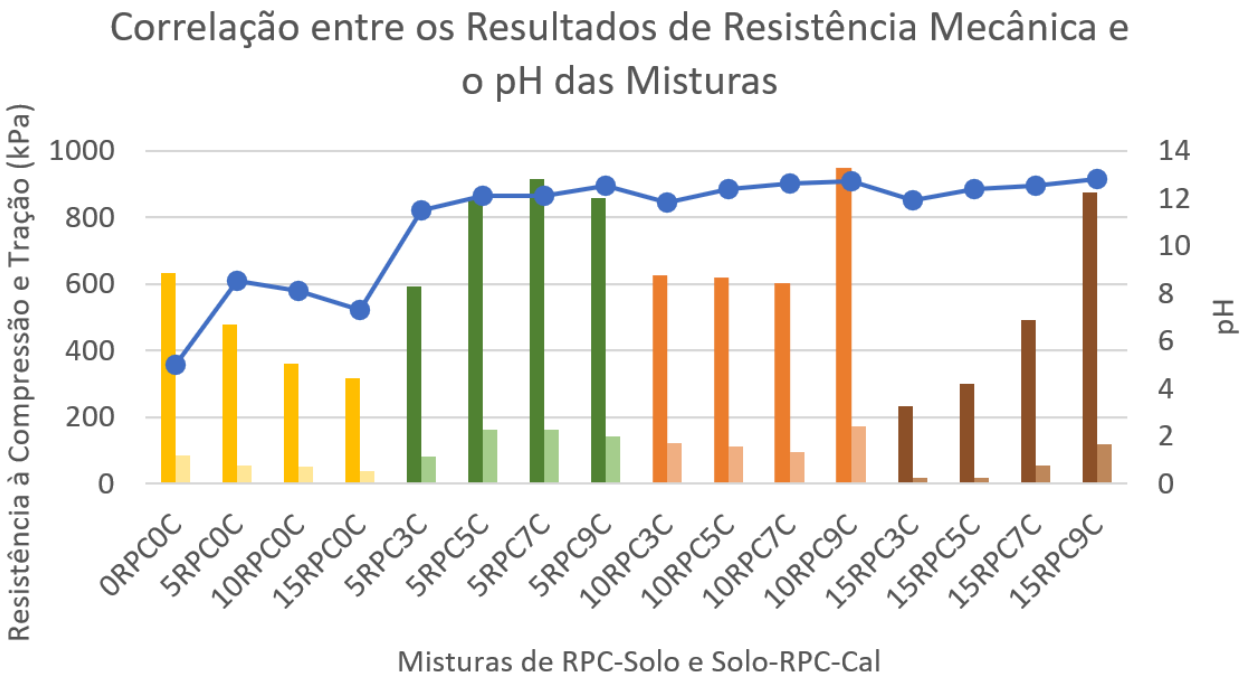
A formação geopolimérica ocorre, portanto, a partir da ruptura das ligações de silício e alumínio, gerando espécies reativas responsáveis pela criação de novas estruturas químicas. Nesse contexto, um pH em torno de 10 é considerado adequado para iniciar a dissolução da sílica e da alumina dos precursores (Huang et al., 2021); contudo, a liberação efetiva desses componentes presentes na matriz de argila e em solos finos ocorre apenas em pH 12,4 (Regasa et al., 2023). Além disso, atingir um pH de 12,4 é considerado suficiente para sustentar as reações pozolânicas de longo prazo, permitindo que o cálcio reaja com a sílica e a alumina liberadas, promovendo o desenvolvimento de novos produtos cimentícios (Eades e Grim, 1966).

A mistura 10RPC9C, que possui o melhor desempenho mecânico, apresentou pH de 12,7, valor que indica equilíbrio entre ativação química e estabilidade da matriz. Essa elevação acima do índice teórico de 12,4 pode ser interpretada como uma margem de segurança necessária para garantir a saturação completa do sistema, permitindo que o ambiente permaneça alcalino o suficiente para compensar possíveis alterações químicas causadas pela acidificação do meio, resultante do contato com sais e ferro do RPC. Já o composto 15RPC9C, embora tenha registrado o maior pH (12,8), não manteve a mesma consistência estrutural, evidenciando que o teor elevado de resíduo fino compromete sua estrutura.

Misturas com proporções equilibradas de cal e resíduo, ou com maior teor de cal (5RPC5C, 5RPC7C e 5RPC9C), apresentaram pH próximo ao valor de referência e comportamento estrutural estável. Em contrapartida, combinações com pH elevado mas com predominância de RPC sobre a cal (10RPC5C, 10RPC7C, 15RPC5C, 15RPC7C) apresentam desempenho mecânico insatisfatório. Além disso, todas as misturas Solo-RPC apresentaram índices de pH significativamente abaixo do valor recomendado de 12,4, o que comprometeu a ativação química e resultou em desempenho estrutural insatisfatório.

A síntese dos resultados mecânicos e químicos encontra-se na Figura 1. Nos ensaios de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Compressão Diametral, os valores apresentados correspondem à média dos quatro corpos de prova de cada mistura, sendo a dispersão dos resultados mecânicos avaliada e considerada na análise e interpretação dos dados.

Figura 1. Resistência Mecânica e pH das Misturas.



Correlação de resistência mecânica e pH das misturas. O eixo esquerdo indica a resistência (kPa), onde as barras escuras representam a Compressão Simples e as claras apresentam a Compressão Diametral. O eixo direito indica o pH de cada mistura através dos marcadores circulares em azul. Fonte: Elaboração própria.

4 CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

O pH confirmou-se como um modelo preditivo útil para avaliar a eficácia da estabilização de solos da Formação Guabirotuba, porém ineficiente quando analisado isoladamente. Misturas com pH elevado, mas com excesso de RPC em relação à cal, apresentaram comportamento estrutural insatisfatório. Dessa maneira, é possível observar que o desempenho é determinado pelo equilíbrio entre ativação química e a estabilidade da matriz.

Os estudos mostram que o pH do solo diminuiu quando acrescentado o RPC, passando de 8,5 (5% de RPC) para 7,3 (15% de RPC). Esse fenômeno sugere possíveis interações químicas entre o resíduo e o solo, provavelmente associadas à presença de ferro e sais solúveis, cuja concentração aumenta conforme o teor de RPC. Tais componentes podem formar compostos que acidificam o meio, justificando a queda do pH e a perda da estabilidade estrutural em concentrações mais altas. Para melhor entender esse comportamento, é recomendado a realização de ensaios complementares, como a difração de raios X (DRX).

Embora as misturas RPC-Solo e algumas combinações Solo-RPC-Cal não apresentem viabilidade química e mecânica para aplicações estruturais, a inserção de baixos valores de RPC na estabilização de solos mostra-se como uma alternativa viável. Além disso, o RPC também pode ser aproveitado na engenharia civil como material cimentante suplementar (SCM) e como filler físico. Devido às suas propriedades pozolânicas, o RPC apresenta potencial para substituir parcialmente o cimento Portland em teores de 10% a 20%. Além disso, quando empregado como filler físico, promove a formação de matrizes mais densas e estáveis, o que resulta em maior durabilidade dos compósitos (Jain et al., 2022). Essa aplicação contribui para a redução da pegada de carbono da construção civil ao diminuir a demanda por cimento, inserindo o resíduo em um ciclo produtivo mais sustentável, alinhado aos princípios da economia circular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almuaythir, S., Zaini, M. S. I., & Hasan, M. (2025). Shear strength, compressibility, and consolidation behaviour of expansive clay soil stabilized with lime and silica fume. *Scientific Reports, 15*(1), 26185.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). *NBR 12770: Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada* (2ª ed.). Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR* 7222: *Concreto e Argamassa - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica.* Rio de Janeiro.

Costa, E. B. C., Barros, B. P., & Costa, M. R. M. M. (2020). Influência da granulometria e do teor de resíduo de polimento de placas cerâmicas na resistência mecânica de matrizes cimentícias. *Matéria (Rio de Janeiro), 25*(04), e-12867.

Costa, T. S. (2024). Estudo do ensaio de compressão simples na estabilização de solo da formação Guabirotuba com a utilização de resíduo de polimento cerâmico e cal. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway research record*, (139).

Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, 124685.

Jain, P., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2022). A literature review on the effect of using ceramic waste as supplementary cementitious material in cement composites on workability and compressive strength. *Materials Today: Proceedings, 65*, 871-876.

Killer, R. A., & Rotta, I. S. (2019). A evolução e as estratégias do setor cerâmico no contexto brasileiro. Centro Universitário Hermínio Ometto.

Lacerda, L. A. (2019). Análise do comportamento mecânico de um solo fino tratado com resíduo de polimento cerâmico e cal. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba.

Lima, L. F. (2024). Estudo da resistência à tração por compressão diametral na estabilização de um solo da formação Guabirotuba com a utilização de resíduo de polimento cerâmico e cal. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

Regasa, H., Jothimani, M., & Oyda, Y. (2023). Subgrade soil stabilization using the Quicklime: a case study from Modjo-Hawassa highway, Central Ethiopia. *International Journal of Geo-Engineering, 14*(1), 17.

Tang, K., Zeng, F., Shi, L., Zhu, L., Chen, Z., & Zhang, F. (2023). Mechanical behavior of hydrated-lime–liquid-stabilizer-treated granular lateritic soils. *Sustainability, 15*(6), 5601.

Wietschel, L., Halter, F., Thorenz, A., Schüppel, D., & Koch, D. (2023). Literature review on the state of the art of the circular economy of Ceramic Matrix Composites. *Open Ceramics, 14,* 100357.

Zanelli, C., Conte, S., Molinari, C., Soldati, R., & Dondi, M. (2021). Waste recycling in ceramic tiles: a technological outlook. *Resources, Conservation and Recycling, 168*, 105289.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/63

Aplicação de biocarvões de açaí e de madeira para melhoramento de características geotécnicas de camadas de cobertura de aterros sanitários

Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida1
Docente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil, alice.almeida@ufma.br

Antônio Italcy de Oliveira Júnior
Engenheiro Geotécnico, Quanta Consultoria, Fortaleza, Brasil, antonioitalcy@hotmail.com

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Docente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil, priscilaluz@ufma.br

Maurício Alves da Motta Sobrinho
Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mauricio.motta@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá
Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

RESUMO: Um problema crescente em aterros sanitários em que não há um eficiente sistema de captação e drenagem é a emissão descontrolada de gases provenientes do processo de biodegradação da matéria orgânica. Estes gases na atmosfera são um dos principais fatores que contribuem para o desequilíbrio do efeito estufa. Como forma de diminuir o impacto e a emissão de gases fugitivas é necessário que as camadas de cobertura dos aterros sanitários funcionem como uma barreira protetora capazes de reter a saída destes gases. Avaliando também sobre o aproveitamento de resíduos e promoção da economia circular, o presente trabalho realizou a produção de biocarvões provenientes de biomassa de resíduos de açaí e de madeira para aplicação em solos de camadas de cobertura de aterros sanitários. Os biocarvões foram produzidos com o uso de um gaseificador e posteriormente foi realizado a mistura desses biocarvões (relação 3% em massa/massa) com solo natural (classificado como areia silto-argilosa). A aplicação dos diferentes biocarvões no solo promoveram alterações na curva granulométrica das amostras, aumentando a parcela de finos, favorecendo assim a permeabilidade das camadas de cobertura e retenção de gases. O estudo revelou que a aplicação dos biocarvões também favoreceram outras características do solo, como os índices de consistência (aumento nos limites de liquidez e de plasticidade). Ainda foi constatado a diminuição na massa específica real dos grãos das amostras com os diferentes biocarvões. Conclui-se que a aplicação dos diferentes biocarvões colaboraram para que houvesse melhoramento das características geotécnicas do solo em questão o que corrobora a sua aplicação em camadas de cobertura de aterro sanitários, garantindo assim melhoria geotécnica da camada bem como incremento da capacidade de retenção de gases assegurada pelas propriedades de adsorção dos biocarvões.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários urbanos, Emissões de biogás, Camadas de cobertura finais, Biocarvão.

ABSTRACT: Uncontrolled gas emissions from sanitary landfills lacking efficient gas collection systems represent a significant environmental challenge, contributing to greenhouse gas accumulation and climate imbalance. Landfill cover layers play a crucial role as protective barriers to mitigate fugitive gas emissions. In line with waste valorization strategies and circular economy principles, this study investigates the application of biochars produced from açaí residue biomass and wood biomass as soil amendments for landfill cover layers. Biochars were produced using a gasification process and incorporated into a natural soil classified as silty-clayey sand at a proportion of 3% (mass/mass). The effects of biochar addition on the geotechnical properties of the soil were evaluated. Results indicated modifications in the grain size distribution, with an increase in the fine fraction, enhancing permeability and gas retention potential. Improvements in soil

consistency were also observed, with increased liquid and plastic limits. Furthermore, a reduction in the real specific gravity of soil grains was identified in biochar-amended samples. The findings demonstrate that the incorporation of biochars improves the geotechnical behavior of landfill cover soils while enhancing gas retention capacity through adsorption mechanisms. Therefore, the use of biochars derived from residual biomass presents a sustainable and effective alternative for improving landfill cover systems.

KEYWORDS: Urban sanitary landfills; Biogas emissions; Final cover layers; Biochar.

1 INTRODUÇÃO

Os produtos florestais não madeireiros desempenham papel fundamental na subsistência de milhões de famílias na região amazônica brasileira, constituindo uma importante fonte de renda e desenvolvimento socioeconômico local. Estima-se que aproximadamente 6 milhões de famílias dependam diretamente da extração, do consumo e da comercialização desses produtos, dentre os quais se destacam a borracha natural, a castanha-do-Brasil e o açaí. Este último tem apresentado expressivo crescimento de produção e consumo, representando cerca de 17% da renda familiar amazônica em 2018, além de alcançar crescente popularidade e diversificação de aplicações no Brasil e no mercado internacional (Lopes et al., 2019).

O avanço da cadeia produtiva do açaí resulta, entretanto, na geração expressiva de resíduos sólidos, especialmente os caroços, cujo descarte inadequado pode ocasionar impactos ambientais e riscos à saúde pública. Para além dessa problemática, observa-se também a elevada geração de resíduos provenientes de atividades de manutenção urbana, como as podas de árvores, que produzem grandes volumes de material lignocelulósico e demandam tratamento e destinação ambientalmente adequados (Grohmann; Prosperi; Menconi, 2020). Tradicionalmente, parte desses resíduos é encaminhada para aterros sanitários, onde o tratamento busca a mitigação de danos ambientais e sanitários (Costa et al., 2018). No entanto, a tendência global tem sido a redução da disposição final, priorizando estratégias de reuso, reciclagem e valorização química, térmica ou energética, em consonância com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.

No contexto brasileiro, embora os aterros sanitários ainda representem o principal destino dos resíduos sólidos urbanos, conforme estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010), essa alternativa apresenta limitações, como a redução da vida útil das estruturas e a necessidade de soluções tecnicamente eficientes para o controle ambiental. Dentre os principais desafios associados aos aterros sanitários, destacam-se a geração e a emissão de gases oriundos da biodegradação da matéria orgânica, o que reforça a importância do adequado desempenho das camadas de cobertura final, responsáveis tanto pela estabilidade geotécnica quanto pela mitigação da migração de gases para a atmosfera.

Nesse cenário, a valorização de resíduos por meio da produção de biocarvão surge como uma alternativa inovadora e ambientalmente sustentável, promovendo a ressignificação do conceito de rejeito e sua inserção em novas cadeias produtivas (Matrapazi; Zabaniotou, 2020). Os biocarvões obtidos a partir de resíduos de açaí e de madeira provenientes de podas apresentam propriedades físico-químicas relevantes, como elevada porosidade e capacidade de adsorção, tornando-se materiais promissores para aplicações ambientais. A incorporação desses materiais em solos utilizados em camadas de cobertura de aterros sanitários destaca-se como uma solução que alia o aproveitamento de resíduos ao melhoramento das características geotécnicas, contribuindo para o controle de emissões gasosas e para o desempenho estrutural das camadas de cobertura.

Dessa forma, o presente estudo avalia a aplicação de biocarvões produzidos a partir de resíduos de açaí e de madeira de poda no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos empregados em camadas de cobertura de aterros sanitários, fortalecendo estratégias de sustentabilidade, economia circular e inovação tecnológica no âmbito da engenharia geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos de açaí utilizados nesta pesquisa foram coletados na feira Bandeira Branca, no município de Belém (PA). Após a coleta, os caroços de açaí passaram por secagem natural ao sol por quatro dias. Em seguida, o material foi transportado para a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde foi posteriormente carbonizado no Laboratório de Carvão Ativado da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), utilizando um gaseificador de leito fixo, com capacidade térmica de 8 kWh e fluxo de ar descendente. Para a produção do biocarvão de madeira foi utilizado resíduos de poda provenientes da Universidade Federal da Paraíba, local onde foi produzido os biocarvões. O processo de produção do biocarvão de resíduos de madeira também foi feito com o uso de um gaseificador, entretanto o equipamento utilizado é de maior dimensão e capacidade térmica de 32kWh. O solo utilizado na pesquisa foi coletado em uma jazida localizada na Central de Tratamento de Resíduos de Pernambuco (CTR-PE), no município de Igarassu-PE, integrante da Região Metropolitana do Recife (Latitude: 07°43'14,61" S; Longitude: 34°56'34,52" W). Para a definição da proporção de biocarvão para a quantidade de solo, foram avaliados trabalhos presentes na literatura, tendo sido utilizada como base a pesquisa de Huang et al. (2019), que também fez uso de biocarvão em camadas de cobertura de aterros sanitários, tendo como melhor resultado na remoção de CH_4 a proporção de 15% em volume, que representou uma proporção em massa de 2,49-2,78% de biocarvão. Como forma de padronizar as misturas e facilitar a sua implantação, nesta pesquisa foi utilizada uma proporção de 17,5% em volume, o que correspondeu a 3% de biocarvão em massa de solo para todos os ensaios realizados. Após a separação dos materiais foram realizadas a mistura e homogeneização do solo com os respectivos biocarvões a uma proporção de 1:0,03 de solo e biocarvão, tanto para o de açaí como para os resíduos de madeira. As amostras foram divididas em 3 tipos:

- Solo Natural
- Mistura SBA: Solo + biocarvão de açaí
- Mistura SBM: Solo + biocarvão de resíduos de madeira

Em seguida, foram realizados ensaios conforme normas técnicas nacionais e internacionais, visando à caracterização física e à determinação das propriedades geotécnicas do solo natural e das misturas. Para a classificação dos materiais segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), bem como para a avaliação das demais propriedades geotécnicas, foram executados os seguintes ensaios, conforme as normas da ABNT: NBR 6457:2024 – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade; NBR 7181:2025 – Análise granulométrica; NBR 6459:2025 – Determinação do limite de liquidez; NBR 7180:2025 – Determinação do limite de plasticidade; e NBR 6508 – Determinação da massa específica dos grãos do solo (ABNT, 2024; 2025).

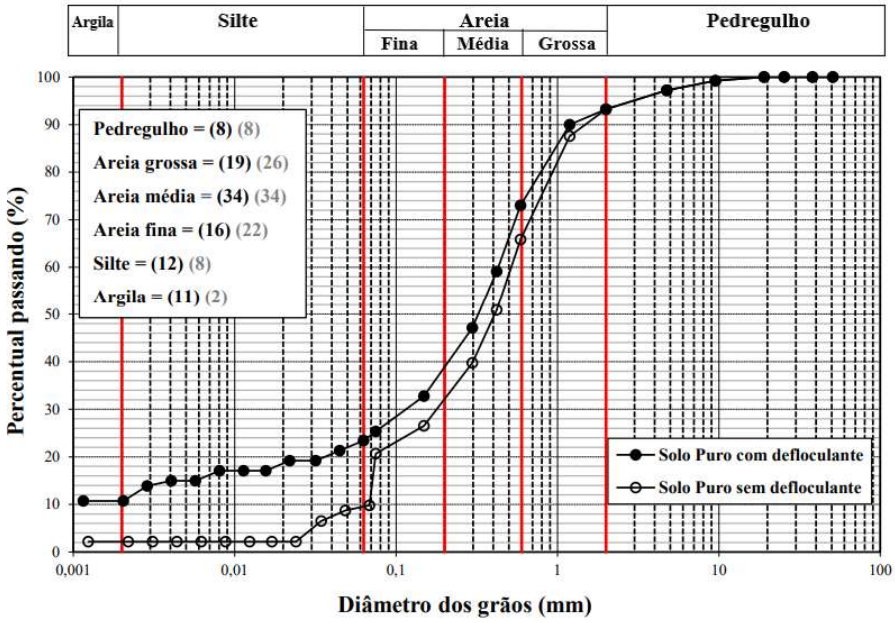
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1Análise Granulométrica

Os resultados obtidos para os ensaios de granulometria estão apresentados a seguir para as amostras de Solo natural, Mistura SBA e Mistura SBM. Para todas as amostras os ensaios foram realizados com defloculante e com dispersor (com a finalidade de verificar a dispersividade das amostras ensaiadas) e sem defloculante e sem dispersor.

• Solo Natural

A Figura 1 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica do solo natural.



Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 1. Curva granulométrica do Solo Natural – com e sem defloculante

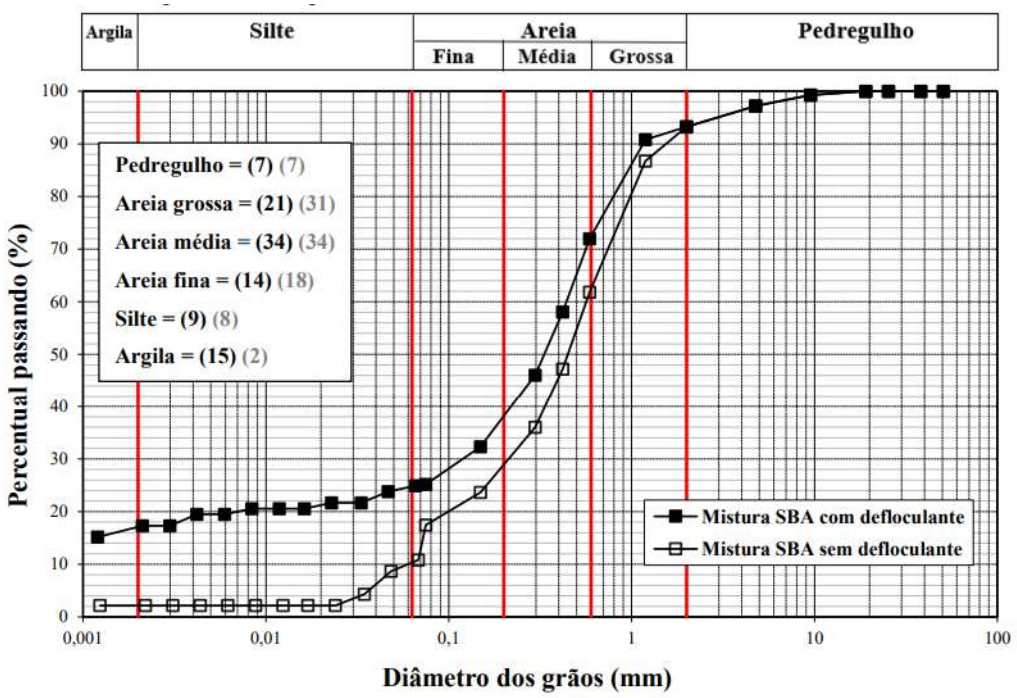
A análise da curva granulométrica com uso de defloculante resultou em valores de D30 iguais a 0,115 mm e D60 iguais a 0,30 mm, não sendo possível determinar o D10 devido à presença de partículas argilosas com dimensões inferiores a 0,001 mm, limite mínimo do ensaio de sedimentação. Dessa forma, não foi possível calcular o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC) para essa condição.

Já a curva granulométrica sem defloculante apresentou valores de D10, D30 e D60 iguais a 0,068 mm, 0,15 mm e 0,50 mm, respectivamente, resultando em CNU de 7,35 e CC de 0,66. O valor de CNU indica ampla distribuição dos tamanhos das partículas; entretanto, o valor de CC inferior a 1 evidencia descontinuidade na distribuição granulométrica, não atendendo aos critérios para classificação como areia bem graduada. Segundo a classificação granulométrica adotada pela ABNT, o solo natural é classificado como areia silto-argilosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SM (areia siltosa), de baixa plasticidade**.**

• Mistura SBA

O ensaio de granulometria para a mistura SBA é apresentado na Figura 2, tendo sido também avaliados o comportamento do material com e sem defloculante.

A curva granulométrica obtida com o uso de defloculante apresentou valores de D30 iguais a 0,114 mm e D60 iguais a 0,42 mm, não sendo possível determinar o D10, o que inviabilizou o cálculo dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Na análise sem defloculante, os valores de D10, D30 e D60 foram de 0,06 mm, 0,21 mm e 0,58 mm, respectivamente, resultando em CNU de 9,66 e CC de 1,27. Esses valores indicam ampla distribuição dos tamanhos das partículas e distribuição granulométrica contínua, atendendo aos critérios para uma areia bem graduada. Segundo a terminologia da ABNT, o material é descrito como areia argilo-siltosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SC (areia argilosa), de baixa plasticidade.

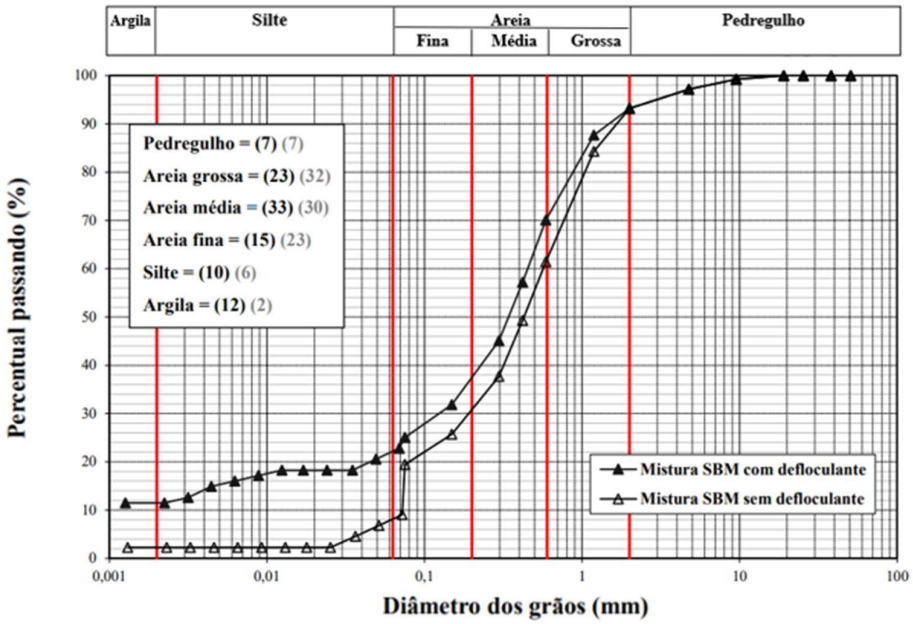


Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 2. Curva granulométrica da Mistura SBA – com e sem defloculante

• Mistura SBM

Para a mistura SBM foram realizados os mesmos procedimentos, seguindo as diretrizes do normativo e na Figura 3 é apresentado o resultado da curva granulométrica com e sem defloculante.



Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 3. Curva granulométrica da Mistura SBM – com e sem defloculante

A curva granulométrica com uso de defloculante apresentou D30 de 0,117 mm e D60 de 0,45 mm, não sendo possível determinar o D10, o que impossibilitou o cálculo dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Na condição sem defloculante, os valores de D10, D30 e D60 foram de 0,07 mm, 0,199 mm e 0,59 mm, resultando em CNU de 8,42 e CC de 0,96. Embora o valor de CNU indique ampla distribuição dos tamanhos das partículas, o valor de CC inferior a 1 evidencia descontinuidade na distribuição granulométrica, não atendendo aos critérios para classificação como areia bem graduada. Segundo a terminologia da ABNT, o material é descrito como areia argilo-siltosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SC (areia argilosa), de baixa plasticidade.

O solo natural apresentou massa específica real dos grãos de 2,652 g/cm³ e índice de plasticidade de 6%, sendo classificado como fracamente plástico. Com a incorporação do biocarvão de açaí (SBA), observou-se redução da massa específica real dos grãos para 2,574 g/cm³ e aumento do índice de plasticidade para 8%, caracterizando um solo medianamente plástico. De forma semelhante, a mistura com biocarvão de resíduos de madeira (SBM) apresentou massa específica real dos grãos de 2,506 g/cm³ e índice de plasticidade de 9%, mantendo a classificação como solo medianamente plástico.

A redução da massa específica real dos grãos nas misturas contendo biocarvão está associada à baixa densidade e à elevada porosidade desse material, que substitui parcialmente a fração mineral do solo. Esse comportamento é comumente relatado na literatura, sendo atribuído à estrutura altamente porosa do biocarvão e à sua menor massa específica em relação às partículas minerais do solo, este comportamento também foi verificado em Reddy et al., (2015), Kumar et al., (2021) e Manahiloh et al., (2025). A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados de caracterização física e geotécnica das amostras analisadas.

Tabela 1. Resumo dos resultados de caracterização de todas as amostras

Material		Solo Natural	Mistura SBA	Mistura SBM
Granulometria (%)	Argila	11	15	12
	Silte	12	9	10
	Areia Fina	16	14	15
	Areia Média	34	34	33
	Areia Grossa	19	21	23
	Pedregulho	8	7	7
Índice de Consistência (%)	LL	22	25	26
	LP	16	17	17
	IP	6	8	9
Massa específica real dos grãos (g/cm³)		2,652	2,574	2,506

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade.

A análise das amostras ensaiadas evidenciou redução da massa específica real dos grãos nas misturas contendo biocarvão, em comparação ao solo natural. A incorporação de biocarvão de açaí resultou em redução de 2,94%, enquanto a adição de biocarvão de resíduos de madeira promoveu uma diminuição de 5,5%. Esse comportamento está associado às propriedades intrínsecas dos biocarvões, especialmente à sua elevada porosidade e menor densidade em relação às partículas minerais do solo. Além disso, observa-se que a mistura SBM apresentou maior redução da massa específica quando comparada à SBA, sugerindo que o biocarvão de resíduos de madeira exerceu maior influência nessa propriedade, possivelmente em razão de diferenças em sua estrutura porosa e composição. Resultados semelhantes foram observados por Van Zwieten et al. (2010) e Sun et al. (2014), que também relataram redução da massa específica dos solos após a incorporação de biocarvão, atribuindo esse comportamento à baixa densidade e à elevada porosidade do material.

Em relação aos índices de consistência, observou-se um discreto aumento do índice de plasticidade após a incorporação dos biocarvões. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada área superficial específica, à estrutura porosa e à maior capacidade de retenção de água do biocarvão, fatores que favorecem maior interação entre as partículas do solo e promovem alterações nos limites de Atterberg (Liu et al., 2021). Tendência semelhante foi observada por Manahiloh et al. (2025), que verificaram aumento dos limites de Atterberg e do índice de plasticidade em solos tratados com biocarvão de madeira. Apesar desse incremento, as misturas permaneceram na faixa de baixa a média plasticidade, indicando que a adição de biocarvão promove alterações moderadas nas propriedades de consistência, sem comprometer as características geotécnicas do material.

Sob a perspectiva da aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, esses resultados são relevantes, pois a redução da massa específica dos grãos pode contribuir para a obtenção de camadas de cobertura mais leves, minimizando problemas relacionados à retração, à formação de fissuras e às variações volumétricas decorrentes dos ciclos de umedecimento e secagem. Dessa forma, os resultados corroboram o potencial do uso de biocarvão como material de melhoria para solos empregados em camadas de cobertura de aterros sanitários, promovendo alterações físicas favoráveis sem comprometer as características geotécnicas necessárias ao desempenho dessas estruturas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a produção de biocarvão a partir de biomassas residuais, que seriam originalmente descartadas, constitui uma alternativa eficiente e sustentável para o aproveitamento de resíduos de açaí e de madeira provenientes de podas, contribuindo diretamente para a promoção da economia circular. A valorização desses materiais e sua inserção em cadeias produtivas ampliam o potencial de aplicação do biocarvão, destacando-se seu elevado desempenho como material adsorvente, inclusive para uso em camadas de cobertura de aterros sanitários voltadas à retenção de gases.

Do ponto de vista físico e geotécnico, para as condições analisadas, a incorporação de biocarvão, tanto de açaí quanto de resíduos de madeira, promoveu aumento da fração de finos e redução da massa específica real dos grãos em relação ao solo natural. Em relação aos limites de consistência, observou-se elevação dos limites de liquidez e de plasticidade, indicando que solos tratados com biocarvão demandam maior teor de umidade para atingir os estados plástico e líquido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br. Acesso em: 09 jan. 2026.

Costa, M. D.; Mariano, M. O. H.; Araujo, L. B.; Jucá, J. F. T. (2018). Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23 (1), p. 77–90.

Grohmann, D.; Prosperi, F.; Menconi, M. E. (2020). Tilia sp.'s pruning residues wood panels for thermal insulation. In: *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. Elsevier, p. 129–148.

Huang, D; Yang, L; Ko, J. H; Xu, Q. *Comparison of the methane-oxidizing capacity of landfill cover soil amended with biochar produced using different pyrolysis temperatures*. Science of The Total Environment, [S. l.], v. 693, p. 133594, 2019.

Hussain, R.; Ghosh, K. K.; Ravi, K. Impact of biochar produced from hardwood of mesquite on the hydraulic and physical properties of compacted soils for potential application in engineered structures. *Geoderma*, v. 385, p. 114836, 2021.

Liu, Z.; Chen, X.; Jing, Y.; Li, Q.; Zhang, J.; Huang, Q.; Cai, Z. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, v. 205, p. 104798, 2021.

Lopes, E.; Soares-Filho, B.; Souza, F.; Rajão, R.; Merry, F.; Carvalho Ribeiro, S. (2019). Mapping the socio-ecology of Non Timber Forest Products (NTFP) extraction in the Brazilian Amazon: The case of açaí (*Euterpe precatoria* Mart) in Acre. *Landscape and Urban Planning*, 188, p. 110–117.

Manahiloh, K. N.; Fetene, S. M.; Detwiler, E. *Effect of Wood-Based Biochar on the Engineering Properties of Medium Plasticity Clay*. Geosciences, v. 15, n. 11, 430, 2025.

Matrapazi, V. K.; Zabaniotou, A. (2020). Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. *Science of the Total Environment*, 718, 137316.

Reddy, K. R.; Yaghoubi, P.; Yukselen-Aksoy, Y. *Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil*. Waste Management, v. 40, p. 96–108, 2015.

Sun, S.-N.; Cao, X.-F.; Li, H.-Y.; Xu, F.; Sun, R.-C. (2014). Structural characterization of residual hemicelluloses from hydrothermal pretreated Eucalyptus fiber. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, p. 158–164.

Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327 (1–2), p. 235–246.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/64

Aplicações da Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA) na Engenharia Geotécnica: Revisão Sistemática

Vitor Braga de Azevedo
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Auanny Alícia Alves da Silva
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, auannyaliciasilva@gmail.com

Thiago Lucena Dias
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, thiago.lucena.dias@gmail.com

Alisson do Nascimento Lima
Professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Cuiabá, Brasil, alisson.lima@ufmt.br

Carina Silvani
Doutora professora do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, Brasil, carinasilvani@gmail.com

RESUMO: A produção de aglomerantes como cal e cimento é caracterizada pelo consumo energético intensivo, devido às altas temperaturas de queima e a geração de elevada pegada de carbono. Portanto, a busca por materiais alternativos com substituição parcial ou total dos aglomerantes se consolida como uma forma estratégica para garantir a sustentabilidade e a eficiência econômica no setor da construção. Atualmente, o descarte da cinza residual da queima do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) representa um ônus significativo para a indústria sucroalcooleira, dada a sua produção global em larga escala de até 1,9 bilhão de toneladas. Diante desse contexto, esse estudo tem como objetivo mapear o potencial de aplicação da CBCA, com ênfase em aplicações geotécnicas e estabilização de solos, por meio de uma revisão sistemática da literatura. A pesquisa foi conduzida com base no método *Systematic Search Flow*, utilizando o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES como base de dados do período de 2016 a 2023. A busca inicial resultou em 76 trabalhos, dos quais 59 foram selecionados após aplicação de critérios de inclusão e exclusão. Os estudos foram analisados quanto às informações bibliométricas, métodos de beneficiamento da cinza, características microestruturais e áreas de aplicação. Os resultados indicam que 95% dos estudos reportaram efeitos positivos associados ao uso de CBCA, com incremento em propriedades mecânicas ou físicas. Observou-se presença de sílica amorfa em cerca de 50% dos trabalhos, o que é um fator determinante para a atividade pozolânica da cinza e justifica a predominância de aplicações em materiais cimentícios. Também foi verificado que a maior concentração de pesquisas sobre CBCA se concentram em instituições públicas das regiões Nordeste, Sul e Sudeste. Portanto, conclui-se que a CBCA possui elevado potencial para a valorização na construção civil, contribuindo para a redução do consumo de insumos não renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos agroindustriais, Materiais cimentícios suplementares, Atividade pozolânica, Sustentabilidade.

ABSTRACT: The production of binders such as lime and cement is characterized by intensive energy consumption due to high calcination temperatures, as well as a high carbon footprint. Therefore, the search for alternative materials that enable the partial or total replacement of binders has become a strategic approach to ensure sustainability and economic efficiency in the construction sector. Currently, the disposal of residual ash from the combustion of sugarcane bagasse (SCBA) represents a significant burden for the sugar-energy industry, given its large-scale global production of up to 1.9 billion tons. In this context, this study aims to map the potential applications of SCBA, with an emphasis on geotechnical uses and soil stabilization, through a

systematic literature review. The research was conducted based on the Systematic Search Flow method, using the CAPES Theses and Dissertations Catalog as the database, covering the period from 2016 to 2023. The initial search yielded 76 studies, of which 59 were selected after applying inclusion and exclusion criteria. The selected studies were analyzed in terms of their bibliometric information, ash processing methods, microstructural characteristics, and application areas. The results indicate that 95% of the studies reported positive effects associated with the use of SCBA, including improvements in mechanical or physical properties. The presence of amorphous silica was observed in approximately 50% of the studies, which is a determining factor for the pozzolanic activity of the ash and justifies the predominance of applications in cementitious materials. It was also found that most research on SCBA is concentrated in public institutions located in the Northeast, South, and Southeast regions. Therefore, it is concluded that SCBA has significant potential for valorization in the construction industry, contributing to the reduction of non-renewable resource consumption.

KEYWORDS: Agro-industrial waste, Supplementary cementitious materials, Pozzolanic activity, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

É fato que a construção civil é impulsionada principalmente pela alta demanda por cimento Portland, sendo este o segundo material mais consumido no planeta depois da água (Abdalla *et al*., 2024). A produção deste aglomerante é caracterizada pelo alto consumo energético, exigindo cerca de 110 kWh por tonelada, e é responsável por aproximadamente 7% a 9% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), conforme Ullah et al. (2025). Desse modo, a busca por materiais cimentícios suplementares (MCSs) ou alternativos, como subprodutos industriais e resíduos agrícolas, consolidou-se como uma solução estratégica a fim de mitigar a pegada de carbono e proporcionar práticas mais sustentáveis (De Sande *et al*., 2021; Li *et al*., 2022; Memon *et al*., 2022; Sobuz *et al*., 2024).

Diante desse cenário, a cana-de-açúcar destaca-se como um recurso renovável gerado em larga escala, com uma produção global que atingiu cerca de 1,9 bilhão de toneladas em 2018, liderada por países como o Brasil e Índia (De Sande *et al*., 2021; Khatri; Pandit, 2022). O resíduo fibroso gerado na extração do caldo de cana, chamado de "bagaço", é frequentemente queimado em caldeiras para produção de eletricidade e vapor, gerando assim a Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar (CBCA), representando entre 0,62% e 3,00% da massa original (Thomas *et al*., 2021; Li *et al*., 2022). Atualmente, a disposição inadequada desse subproduto em aterros sanitários representa um grande desafio ambiental, podendo causar poluição do ar e contaminação de águas subterrâneas por partículas finas (Ullah *et al*., 2025).

Apesar de ser tratada muitas vezes como resíduo, a CBCA possui um alto potencial de valorização na indústria devido a sua composição rica em sílica (SiO_2), geralmente apresentando teores acima de 60% a 70% (Thomas *et al*., 2021). Quando submetida aos devidos tratamentos, como moagem e queima controlada em temperaturas entre 600°C e 800°C, a cinza exibe atividade pozolânica, reagindo com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para formar gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Abdalla *et al*., 2022; Ullah *et al*., 2025). No âmbito da engenharia geotécnica, a incorporação da CBCA pode resultar na redução da plasticidade, no aumento da resistência à compressão não confinada e na melhoria da durabilidade de camadas de pavimentos e estruturas de fundação superficial. Além disso, a utilização desse resíduo contribui para o controle de deformações volumétricas, aspecto crítico em solos expansivos. Entretanto, a variabilidade na composição química e mineralógica da cinza, fortemente influenciada pelas condições de queima, ainda representa um desafio para sua aplicação padronizada em obras geotécnicas.

Este trabalho propõe o mapeamento do estado da arte brasileiro, por meio de uma revisão sistemática fundamentada no método *Systematic Search Flow* e na análise de produções científicas recentes (2016-2023) do banco da CAPES. A partir dessa análise, se buscou mapear o potencial de valorização da CBCA, consolidando o emprego desse resíduo agroindustrial para o fomento de soluções sustentáveis nas práticas de construção.

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática da literatura foi conduzida segundo o método *Systematic Search Flow*, proposto por Ferenhof e Fernandes (2016). A adoção dessa metodologia justifica-se por sua capacidade de estruturar e

sistematizar as buscas nas bases de dados científicas, garantindo, assim, a reprodutibilidade metodológica do estudo e mitigando potenciais vieses por parte do pesquisador. Sua aplicação foi realizada em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 1.

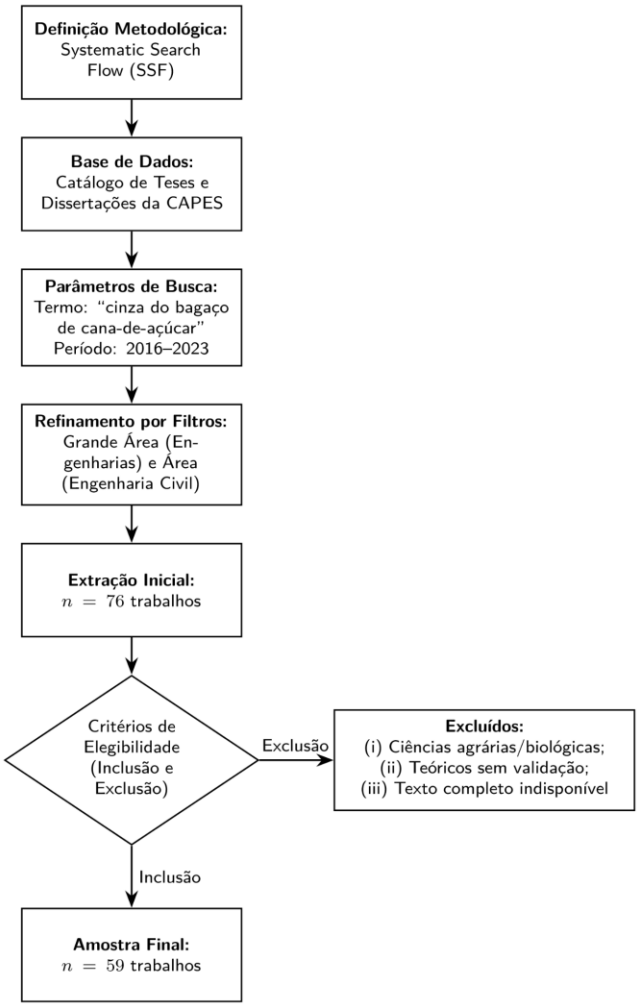


Figura 1. Fluxograma de análise pelo *Systematic Search Flow*.

A busca bibliográfica foi conduzida no "Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES", plataforma oficial que centraliza o acervo de pesquisas de pós-graduação *stricto sensu* no Brasil, dada a relevância do país como um dos maiores produtores. O recorte temporal estabelecido abrangeu publicações entre os anos de 2016 e 2023. Essa delimitação justifica-se por representar o período de oito anos mais recente com dados totalmente consolidados e disponibilizados pelo repositório no momento da condução deste estudo.

Para a estruturação da linha de busca, adotou-se como busca principal o termo "cinza do bagaço de cana-de-açúcar". A fim de refinar a extração dos trabalhos e direcionar os resultados exclusivamente às aplicações da engenharia civil, a pesquisa foi parametrizada com os filtros de Grande Área de Conhecimento ("Engenharias") e Área de Conhecimento ("Engenharia Civil") disponibilizados pela plataforma.

Após a extração inicial (76 trabalhos), os documentos passaram por filtros de elegibilidade. O critério de inclusão englobou: trabalhos com foco empírico na aplicação da CBCA como material de construção ou na estabilização de matrizes de solo. Em contrapartida, os critérios de exclusão englobam: (i) estudos cujo emprego da cinza fosse exclusivamente voltado às ciências agrárias ou biológicas; (ii) pesquisas de caráter puramente teórico, sem validação experimental; e (iii) documentos cujos textos completos não se encontravam disponíveis na plataforma ou depósito do programa de pós-graduação. Com a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, o conjunto inicial de 76 publicações foi submetido à triagem, sendo reduzido para 59 trabalhos válidos. Esse montante constitui a amostra final analisada nesta revisão.

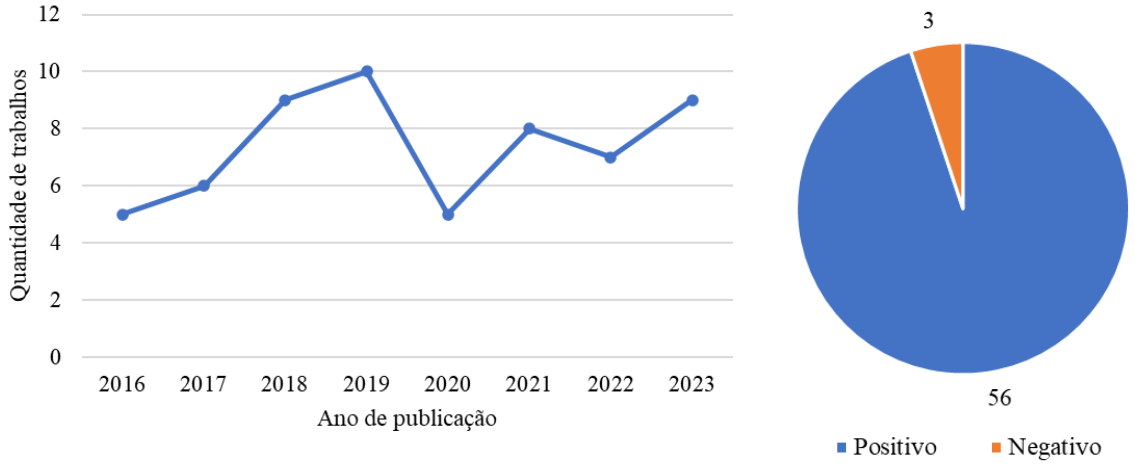
Na fase subsequente de extração e síntese, os dados dos trabalhos selecionados foram tabulados para permitir uma análise comparativa. Registraram-se o ano de publicação, a natureza institucional e a respectiva

localização geográfica de origem do estudo. No escopo tecnológico, tabularam-se a procedência agroindustrial do resíduo, os métodos de beneficiamento aplicados e a caracterização microestrutural da cinza. Por fim, mapeou-se o nicho específico de aplicação dentro da engenharia civil, classificando o impacto decorrente da adição do resíduo sob a ótica de um efeito final positivo ou negativo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução das publicações entre 2016 e 2023 indica uma tendência de crescimento contínuo até 2019, seguida por um declínio abrupto em 2020, possivelmente associada às restrições impostas pela pandemia de COVID-19. A partir de 2021, observa-se retomada gradual das pesquisas, embora sem alcançar o patamar pré-pandêmico de aproximadamente 10 trabalhos anuais. O comportamento sugere que a redução observada não está relacionada à saturação do tema, mas à limitação temporária de atividades experimentais. A Figura 2a apresenta a evolução quantitativa das publicações ao longo do recorte temporal estabelecido (2016–2023).

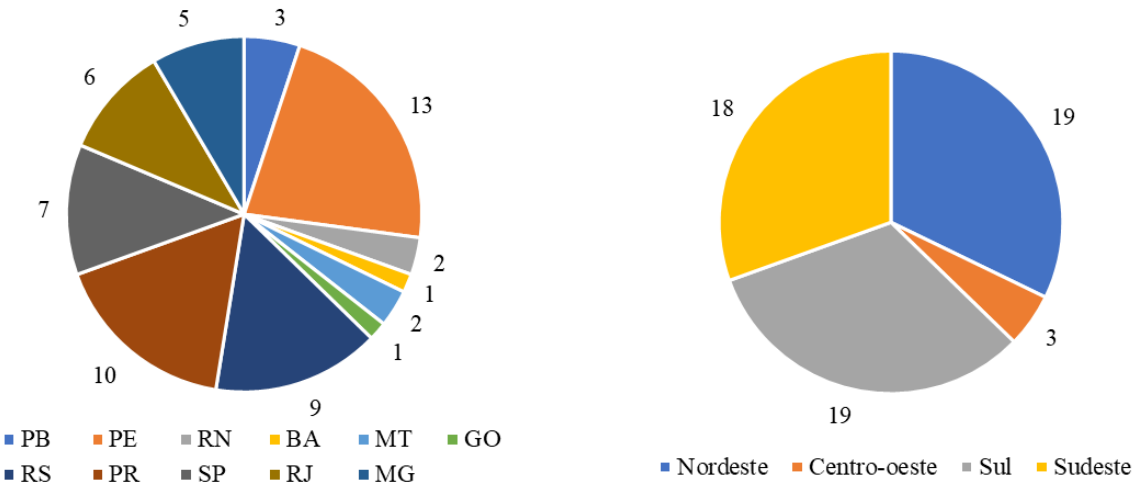
Quanto à eficácia da aplicação da CBCA (Figura 2b), 56 estudos (95% da amostra) reportaram efeitos positivos, evidenciando melhorias em parâmetros físicos e mecânicos (tais como resistência, durabilidade e consistência) nas diversas áreas da engenharia civil. Em contrapartida, 3 estudos (5%) reportaram efeitos negativos que associam o declínio das propriedades à aplicação da CBCA na geopolimerização. De modo geral, Li *et al*., (2022) e Thomas *et al*. (2021) evidenciaram que a incorporação da cinza interfere negativamente na reação, comprometendo a resistência mecânica do geopolímero.



(a) (b)

Figura 2. (a) Evolução da quantidade de publicações ao longo dos anos e (b) avaliação final qualitativa do efeito da adição da CBCA.

A distribuição geográfica dos estudos, presente na Figura 3a, evidencia concentração em estados como Pernambuco (22%), Paraná (17%) e Rio Grande do Sul (15%). Em nível regional (Figura 3b), Nordeste e Sul lideram com 32% cada, seguidos do Sudeste (30%), indicando uma distribuição relativamente equilibrada da produção científica no país. Vale ressaltar que não foram encontrados trabalhos referentes à região Norte.

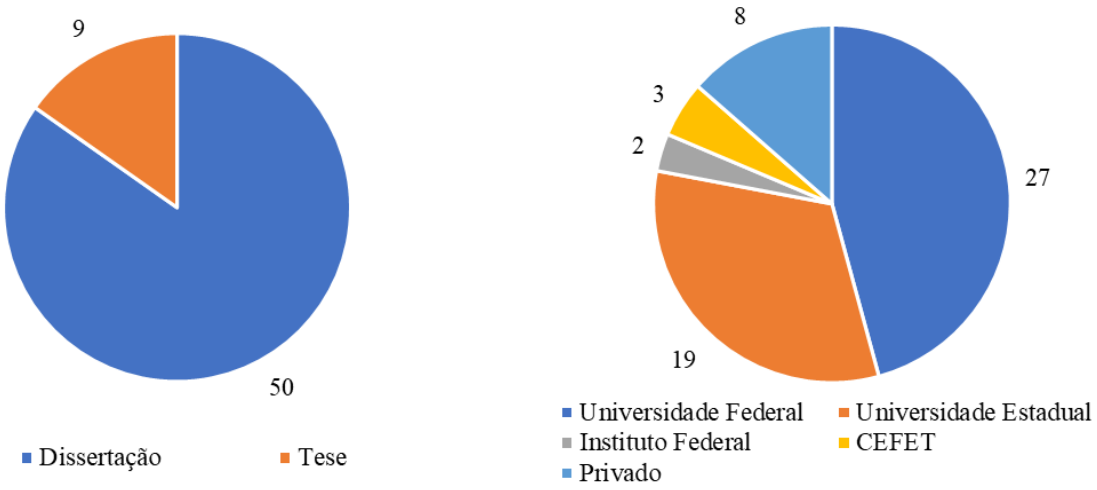


(a) (b)

Figura 3. Distribuição geográfica dos trabalhos (a) por estado e (b) por região.

É notável que ocorre a predominância de dissertações de mestrado, totalizando 50 trabalhos, em relação às teses de doutorado, que somam apenas 9 publicações, o que sugere maior volume de investigações exploratórias iniciais, ilustrado na Figura 4a. Esse resultado sugere a predominância de estudos exploratórios, indicando a necessidade de maior aprofundamento em nível de doutorado, o que poderia gerar um volume mais equilibrado de teses no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES.

Quanto à natureza institucional (Figura 4b), as universidades federais destacam-se com 27 trabalhos publicados (46%), seguidas pelas universidades estaduais, responsáveis por 19 publicações (32%). Apenas 8 estudos (14%) foram desenvolvidos em instituições da rede privada de ensino. Esse panorama evidencia o papel protagonista e a importância fundamental das instituições públicas no avanço do conhecimento científico voltado à aplicação da CBCA na construção civil.

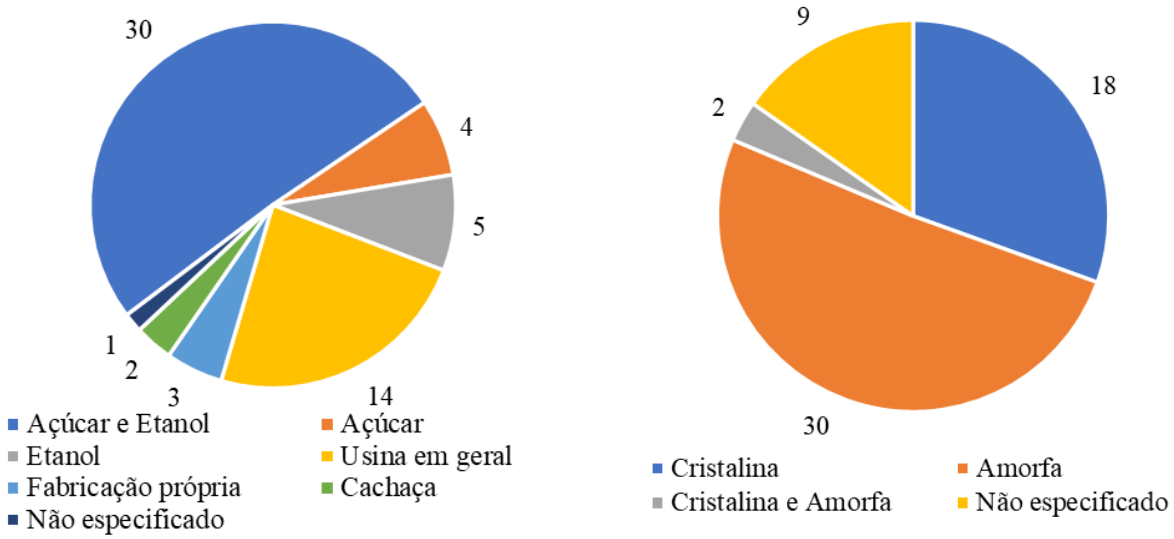


(a) (b)

Figura 4. Distribuição para (a) tipo de trabalho e (b) natureza da instituição.

Conforme a Figura 5a, o setor sucroalcooleiro representa a principal origem da CBCA, presente em 39 trabalhos, evidenciando a demanda dessa indústria por alternativas sustentáveis para a destinação final desta cinza. Na sequência, observou-se a utilização de cinzas provenientes de usinas em geral (14 trabalhos), cujas plantas industriais empregam a queima do bagaço predominantemente como biomassa para a geração de energia.

Em relação à microestrutura (Figura 5b), nos trabalhos de Ferreira (2023) e Cruz (2021), foram analisadas múltiplas amostras, nas quais se constatou a coexistência de fases amorfas e cristalinas na mesma coleta de uma mesma usina. A presença de sílica amorfa mostra-se determinante para aplicações cimentantes e de estabilização de solos, especialmente quando associada a ativadores alcalinos. De modo geral, a maioria (32 estudos) relatou que a CBCA apresenta estrutura com algum carácter amorfo, indicando disponibilidade para reações químicas (atividade pozolânica) com os argilominerais do solo ou com agentes cimentantes. Por outro lado, 20 trabalhos identificaram uma matriz estritamente cristalina, condição na qual a cinza atua de forma inerte no compósito, exercendo primordialmente um efeito de preenchimento de vazios. Por fim, cabe ressaltar que 9 dos estudos analisados omitiram essa etapa de caracterização, não especificando de forma clara a natureza microestrutural (amorfa ou cristalina) da CBCA empregada em suas respectivas aplicações.



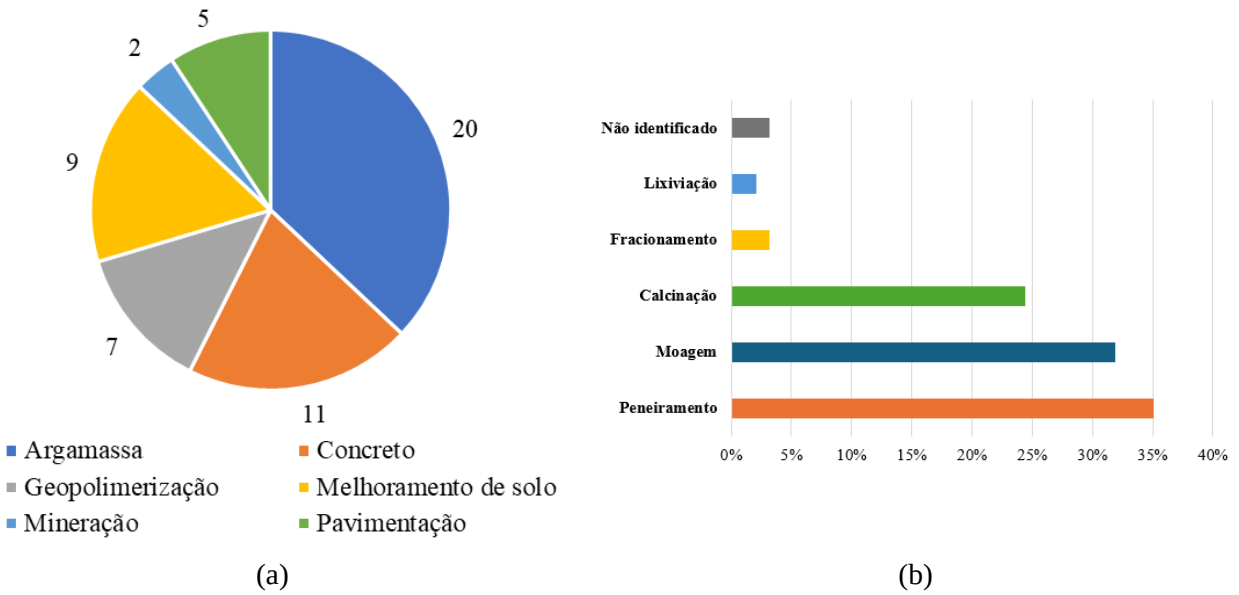
(a) (b)

Figura 5. Distribuição para (a) origem da CBCA e (b) cristalinidade da microestrutura.

Como discutido anteriormente, a disponibilidade de sílica amorfa é um ponto-chave para aplicações da CBCA, especialmente em processos de cimentação, seja em concretos e argamassas ou na estabilização de solos. Neste último, geralmente busca-se a ativação da cinza com o uso da cal ou outros ativadores alcalinos. Ainda assim, para CBCA com fração cristalina dominante são reportadas aplicações como fíler em misturas asfálticas, promovendo melhorias expressivas no respectivo desempenho mecânico dessas misturas. Hipólito e Ildefonso (2024) observaram aumentos de aproximadamente 40% na estabilidade Marshall, 26% na resistência à tração indireta e 17% no módulo de resiliência, além de reduções de 28% e 11% na deformação permanente em ensaios de creep dinâmico e Hamburg Wheel Tracking Test (HWTD), respectivamente, evidenciando ganhos tanto em laboratório quanto em campo.

A Figura 6a categoriza as pesquisas selecionadas quanto aos diferentes nichos de aplicação da CBCA na engenharia civil, cujo emprego majoritário foi observado quanto à produção de argamassas (20 estudos) e concretos (11 pesquisas), seguido da utilização em processos de melhoramento de solos (9 aplicações). Esse quantitativo reduzido evidencia que, embora a CBCA apresente potencial técnico para uso geotécnico, sua aplicação nesse contexto ainda é incipiente quando comparada às aplicações em materiais cimentícios. Todavia, houve poucos relatos envolvendo a utilização desse resíduo em atividades relativas aos setores de pavimentação (5 casos), bem como de mineração (apenas 2 estudos).

Depreende-se, ainda, a partir da Figura 6b que o peneiramento, a moagem, bem como a calcinação correspondem a cerca de 35%, 32% e 24,5% dos métodos de beneficiamento adotados nas pesquisas envolvendo CBCA, respectivamente, denotando a predominância de processos físicos ou termo-físicos que visam a adequação do material com fins de utilização direta como insumo, em detrimento de etapas de natureza físico-química, menos reversíveis.



(a) (b)

Figura 6. Distribuição para (a) nicho específico de aplicação e (b) métodos de beneficiamento.

4 CONCLUSÕES

A análise das produções científicas recentes (2016–2023) disponíveis no banco de teses e dissertações da CAPES evidenciou que o uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na engenharia civil apresenta tendência de crescimento, apesar da redução pontual observada no período associado à pandemia de COVID-19. No contexto geotécnico, os resultados indicam que a CBCA possui potencial relevante como material estabilizante de solos dadas às aplicações reportadas em diferentes tipos de matrizes, incluindo solos de baixa capacidade de suporte e materiais expansivos. Logo, o cenário apresentado evidencia não uma limitação do material, mas uma lacuna de investigação, indicando a necessidade de ampliação de estudos experimentais voltados à estabilização de solos com CBCA.

Os estudos analisados demonstram que a incorporação da CBCA pode promover melhorias significativas em propriedades geotécnicas, como aumento da resistência mecânica, redução da plasticidade e controle de deformações volumétricas. Tais efeitos estão diretamente associados à presença de sílica amorfa e à possibilidade de ocorrência de reações pozolânicas, especialmente quando a cinza é utilizada em conjunto com agentes ativadores, como a cal.

Apesar dos avanços observados, a variabilidade na composição química e mineralógica da CBCA ainda representa um desafio para sua aplicação em larga escala, reforçando a necessidade de padronização dos processos de beneficiamento e caracterização do material. Dessa forma, conclui-se que a CBCA apresenta elevado potencial de aplicabilidade e, para além da alternativa sustentável, representa uma oportunidade de avanço no campo da engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdalla, T. A., Hussein, A. A. E., & Ahmed, Y. H. (2024). Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. *Results in Engineering*, 21, 101764–101764. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101764.

Abdalla, T. A., Koteng, D. O., Shitote, S. M., & Matallah, M. (2022). Mechanical Properties of Eco-friendly Concrete Made with Sugarcane Bagasse Ash. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1227–1239. https://doi.org/10.28991/cej-2022-08-06-010.

Cruz, M. A. (2021) *Caracterização da Cinza do Bagaço de Cana-De-Açúcar Calcinado Sob Diferentes Temperaturas para Aplicação em Geopolímeros.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade Atitus Educação Passo Fundo, 88 p.

De Sande, V. T., Sadique, M., Pineda, P., Bras, A., Atherton, W., & Riley, M. (2021). Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. *Journal of Building Engineering*, 39, 102277. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102277.

Ferreira, W. P. (2023) *Cimento Ecológico: Substituição De Cinzas De Bagaço De Cana-De-Açúcar Derivado Da Indústria Sucroalcooleira.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia Goiano / IFGO, 53 p.

Hipólito, V. M., & Ildefonso, J. S. (2024). Functional and structural assessment of an experimental section gap graded modified with sugarcane bagasse ash. *Scientific Reports*, *14*(1), Article 18436. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67900-2.

Khatri, P., & Pandit, A. B. (2022). Systematic review of life cycle assessments applied to sugarcane bagasse utilization alternatives. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106365. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106365.

Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhang, X., & Si, Z. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 56, 104774. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104774.

Memon, S. A., Javed, U., Shah, M. I., & Hanif, A. (2022). Use of Processed Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Partial Replacement of Cement: Mechanical and Durability Properties. *Buildings*, 12(10), 1769. https://doi.org/10.3390/buildings12101769.

Sobuz, M. H. R., Al-Imran, Datta, S. D., Jabin, J. A., Aditto, F. S., Hasan, N. M. S., & Zaman, A. A. U. (2024). Assessing the Influence of Sugarcane Bagasse Ash for the Production of Eco-friendly Concrete: Experimental and Machine Learning Approaches. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02839–e02839. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02839.

Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., Nazar, S., Jittin, V., & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086.

Ullah, M. F., Tang, H., Ullah, A., Toth, Z., Ahmad, M., & Abdullah Alzlfawi. (2025). Mechanical and environmental performance of sugarcane Bagasse Ash from Khyber Pakhtunkhwa in sustainable concrete. *Scientific Reports*, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-10383-6.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/65

Aproveitamento de resíduos de madeira como estabilizantes em solo: análise mecânica e microestrutural

Isabela Isis Lima dos Santos,
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, isabellail@ufmg.br

Diogo Reis Sanna Passos
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, diogosanna@gmail.com

Sofia Araújo Lima Bessa
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, sofiabessa@ufmg.br

Fernando Couto Rosa
Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, fernando@demc.ufmg.br

Giovanna Monique Alelvan
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

RESUMO: A estabilidade, a durabilidade e o desempenho estrutural das obras de engenharia civil dependem diretamente das propriedades geotécnicas dos solos. Quando o solo natural não apresenta resistência, deformabilidade ou compacidade adequada para suportar as cargas atuantes, torna-se necessária a aplicação de técnicas de estabilização. Nesse contexto, a estabilização de solos é amplamente empregada para melhorar os parâmetros geotécnicos e viabilizar o uso de materiais originalmente inadequados. Entre as soluções consolidadas, destaca-se o uso de fibras vegetais, como sisal, coco, juta e bambu, que contribuem para o aumento da resistência mecânica, redistribuição de tensões e maior tenacidade do material. Entretanto, observa-se lacuna na literatura quanto à utilização de serragem, resíduo do processamento mecânico da madeira, composto por partículas finas, grossas e aparas, como agente estabilizante. Abundante e de baixo custo, esse material apresenta potencial para aplicações geotécnicas, especialmente sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular. Este estudo investigou a incorporação de serragens finas, grossas e aparas, nos teores de, 5% e 10%. Foram realizadas análises de caracterização física, incluindo granulometria, limites de Atterberg e análise microestrutural. Além disso, com o objetivo de analisar a interface solo–serragem e as alterações na estrutura dos poros, foram conduzidos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e ensaios de compressão simples. Os resultados indicaram uma tendência favorável ao aumento da resistência mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: estabilização de solos; serragem; resíduos de madeira; resistência à compressão simples; sustentabilidade.

ABSTRACT: The stability, durability, and structural performance of civil engineering works depend directly on the geotechnical properties of the soils. When natural soil does not present adequate resistance, deformability, or compactness to support the acting loads, the application of stabilization techniques becomes necessary. In this context, soil stabilization is widely used to improve geotechnical parameters and enable the use of materials that were originally inadequate. Among the consolidated solutions, the use of vegetable fibers, such as sisal, coconut, jute, and bamboo, stands out, contributing to increased mechanical resistance, stress redistribution, and greater material toughness. However, there is a gap in the literature regarding the use of sawdust, a residue from the mechanical processing of wood, composed of fine particles, coarse particles, and

shavings, as a stabilizing agent. Abundant and low-cost, this material has potential for geotechnical applications, particularly in terms of sustainability and the circular economy. This study investigated the incorporation of fine sawdust, coarse sawdust, and shavings at 5% and 10% levels. Physical characterization (particle size distribution, Atterberg limits, and microstructural analysis) was performed. Furthermore, to analyze the soil-sawdust interface and changes in pore structure, Scanning Electron Microscopy (SEM) tests were conducted on all samples, as well as simple compression tests. The results indicated favorable results for the gain of mechanical strength in the mixtures, highlighting the technical potential of the residue as a sustainable stabilization alternative.

KEYWORDS: soil stabilization; sawdust; wood waste; unconfined compression; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade e o desempenho estrutural de obras geotécnicas estão diretamente associados às propriedades físicas e mecânicas dos solos de fundação ou de suporte. Em diversas situações, os solos naturais não atendem aos requisitos mínimos de resistência, deformabilidade e durabilidade, o que exige intervenções técnicas para a adequação do material. Neste sentido, a estabilização de solos apresenta-se como solução consolidada, podendo envolver aditivos químicos, ligantes cimentícios ou reforços fibrosos. Nos últimos anos, observa-se um crescente interesse pelo uso de materiais naturais e de resíduos industriais, em consonância com diretrizes de sustentabilidade e de redução de impactos ambientais. Nesse contexto, o uso de aditivos representa uma abordagem promissora para suprir a carência de materiais convencionais e melhorar o desempenho geotécnico de solos naturais (Anburuvel, 2024). Medina-Martinez et al. (2023), em revisão bibliográfica sobre o uso de resíduos de madeira em aplicações geotécnicas, classificam esses subprodutos em três categorias principais: aparas de serragem, pó de serragem e cinzas de serragem. Os autores apontam que a incorporação desses materiais em solos pode produzir diferentes efeitos, dependendo do tipo de solo e da forma de utilização do resíduo. Entre os resultados reportados na literatura, destacam-se o aumento da resistência em solos finos quando da incorporação do pó de serragem ou de aparas de serragem. Entretanto, os autores destacam que ainda são escassos os estudos que investigam o comportamento de misturas solo–serragem utilizando aparas de madeira.

Johansson (2016) destaca que fibras vegetais como sisal, coco e juta têm demonstrado resultados promissores na melhoria da resistência e ductilidade dos solos. Entretanto, a utilização de serragem, subproduto do processamento mecânico da madeira, ainda é pouco explorada na literatura técnica, sobretudo quanto à influência da granulometria e morfologia das partículas no comportamento mecânico do compósito solo–resíduo.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da incorporação de diferentes e tamanhos de serragem na estabilização de solo, analisando seu impacto nas propriedades físicas e na resistência à compressão simples.

2 MATERIAIS

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em área localizada no município de Santo Antônio do Rio Abaixo - MG, sendo posteriormente preparado e caracterizado em laboratório conforme procedimentos normativos vigentes. A classificação do material foi realizada com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), visando a adequada identificação de seu comportamento geotécnico. O resíduo de madeira empregado foi obtido em marcenarias locais, garantindo representatividade de um material comumente descartado. Após a coleta, o material foi seco em estufa e submetido à separação granulométrica, sendo classificado em três categorias: serragem fina (Tipo A), serragem grossa (Tipo B) e aparas de madeira (Tipo C). As propriedades físicas dos materiais foram determinadas por meio de ensaios laboratoriais, incluindo massa específica dos sólidos, análise granulométrica e limites de Atterberg, conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

2.2.1 Caracterização Granulométrica.

Foi utilizado um solo coletado pela própria equipe de pesquisa, posteriormente classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), com o objetivo de caracterizar seu comportamento geotécnico e enquadramento quanto à granulometria e aos índices de plasticidade. A coleta foi realizada de modo a garantir representatividade do material natural empregado nos ensaios.

O resíduo de madeira utilizado na pesquisa foi obtido em marcenaria local, assegurando a representatividade de um material comumente descartado em atividades de beneficiamento da madeira. Após a coleta, o resíduo foi separado em três categorias distintas, conforme suas características granulométricas e morfológicas: serragem fina, serragem grossa e aparas de madeira. Essa subdivisão permitiu avaliar a influência do tamanho e da forma das partículas no desempenho mecânico das misturas solo–resíduo.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Serragens utilizadas nos estudos: amostra TIPO A, amostra TIPO B, amostra TIPO C



Figura 2: Solo utilizado nos estudos - Areia Siltosa

Na Tabela 1 apresenta-se os valores de massa específica das partículas para as amostras de serragem e solo seguindo procedimento da NBR 17212 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024).

Tabela 1: Análise do material utilizado - Massa específica dos grãos

Amostra	Massa Específica dos Sólidos – ρs (g/cm³)
TIPO A (Pó de MDF)	1,15
TIPO B (Aparas de Serragem)	1,45
TIPO C (Pó de MDF + Espécies)	1,33
Solo Areno-Siltoso	2,52

Para avaliar a viabilidade geotécnica da mistura solo-resíduo, foram analisadas as características físicas das amostras. As curvas granulométricas obtidas evidenciam a distribuição de tamanhos das partículas tanto do solo quanto dos resíduos incorporados (Figuras 3, 4 e 5).

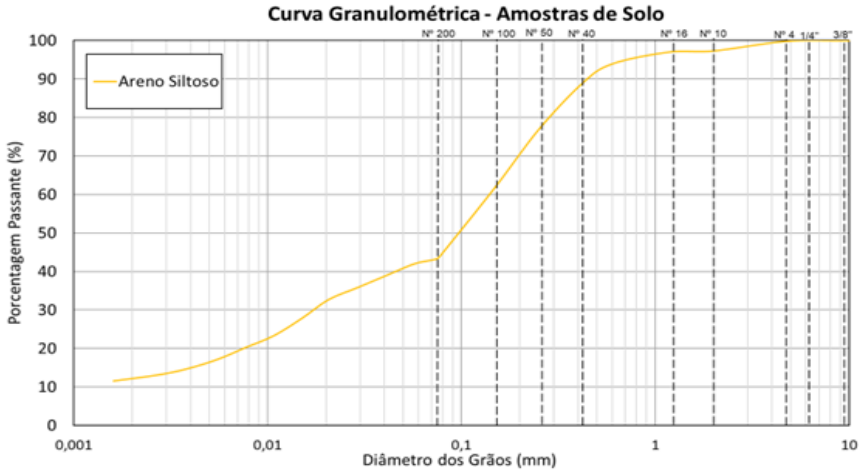


Figura 3. Análise Granulométrica - Granulometria do solo por Peneiramento e Sedimentação.

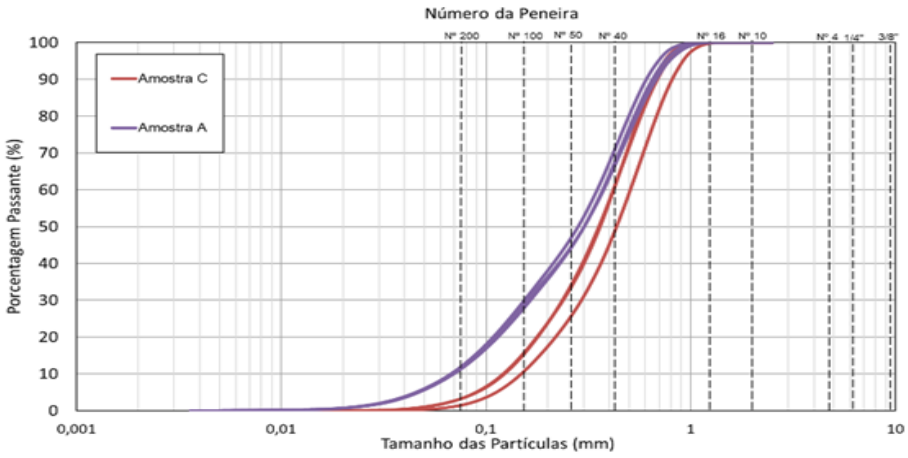


Figura 4. Análise Granulométrica – Granulometria à laser das Serragens.

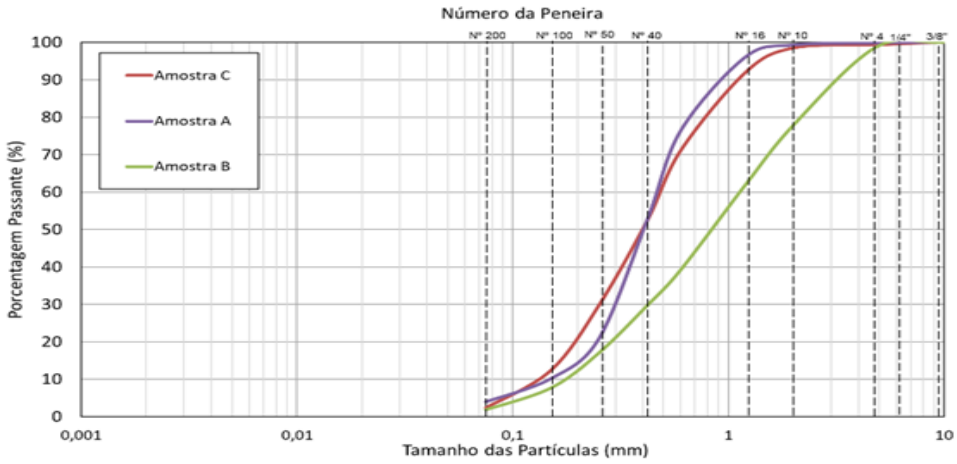


Figura 5. Análise Granulométrica – Granulometria por Peneiramento das Serragens.

Observa-se que o solo apresenta comportamento predominantemente arenoso, com variações na fração fina que influenciam sua classificação como areno-siltoso.

2.2.2 Ensaio de Plasticidade

A seguir, na Figura 6, apresenta-se a Carta de Plasticidade de Casagrande, na qual está plotado o ponto correspondente aos resultados obtidos nos ensaios de Limites de Atterberg para a amostra areia siltosa.

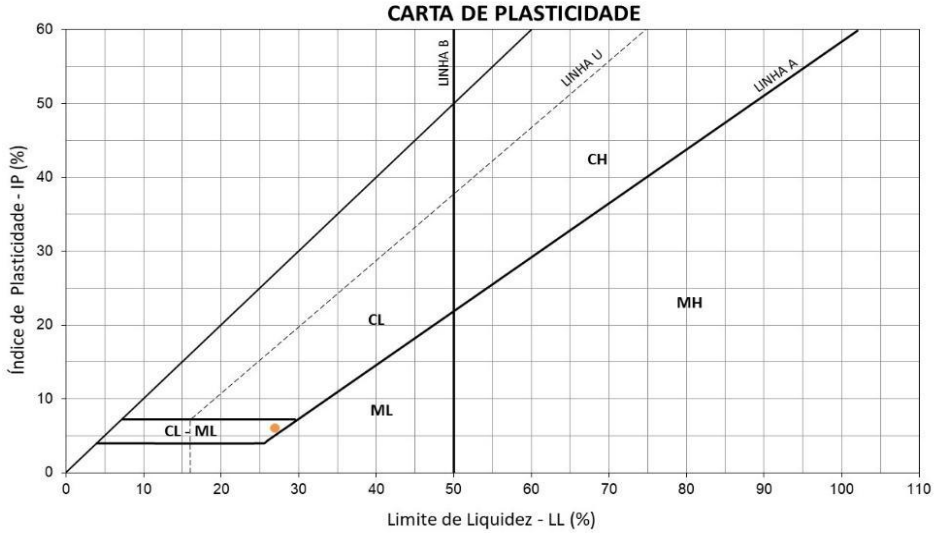
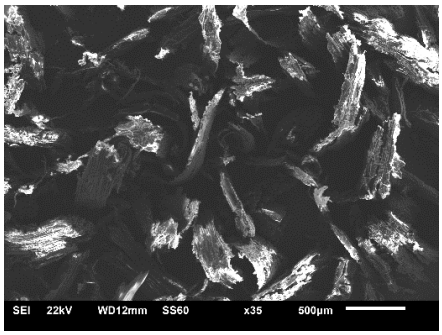


Figura 6: Areia Siltosa – Carta de Plasticidade de Casagrande.

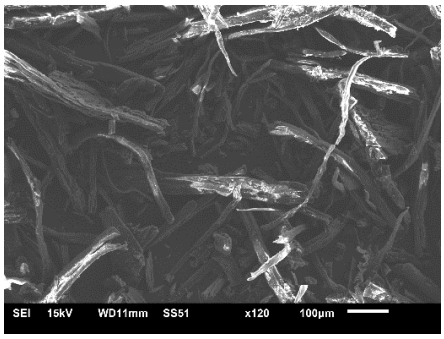
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Microscópia Eletrônica de Varredura - MEV

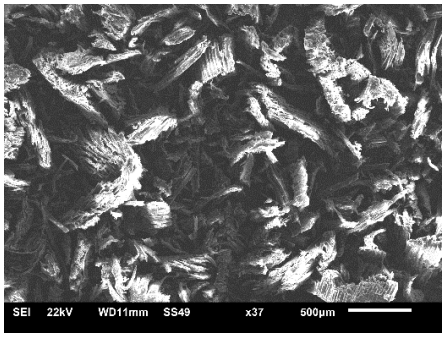
A análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu observar a morfologia e a superfície das partículas de serragem em diferentes ampliações. As imagens, que podem ser observadas nas Figuras 7a, 7b e 7c, de origem das amostras do Tipo A, B e C respectivamente, evidenciam partículas com geometria predominantemente alongada e irregular, apresentando superfícies rugosas e estrutura fibrosa característica de materiais lignocelulósicos. Na ampliação de menor aumento, observa-se a disposição heterogênea das partículas, com formatos lamelares e fragmentados. Já na imagem com maior ampliação, torna-se mais evidente a presença de fibras alongadas, bordas irregulares e elevada porosidade superficial. Essas características indicam potencial para interação mecânica com a matriz do solo, favorecendo mecanismos de ancoragem física e aumento da resistência ao cisalhamento. A morfologia irregular e a textura rugosa das partículas contribuem para maior atrito interno e melhor redistribuição de tensões na mistura solo–serragem, o que pode explicar os ganhos observados nos ensaios de compressão simples. Assim, a análise por MEV complementa os resultados granulométricos, permitindo compreender de forma mais detalhada a influência da serragem na estrutura interna do material composto.



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Análise Microestrutural das Serragens.

3.1 Ensaio de Compressão Simples

As amostras para os ensaios de resistência foram moldadas nas condições de umidade ótima e densidade seca máxima obtidas nos ensaios de compactação, garantindo padronização no processo de preparação. Após moldagem, os corpos de prova foram submetidos à aplicação de carga axial monotônica, sem confinamento lateral, até a ruptura. A seguir é possível verificar os resultados das curvas na Figura 8 e Figura 9, bem como os resultados de cálculo, apresentados na Tabela 2 e Tabela 3.

Amostra		Solo Areno Siltoso	Solo + A	Solo +B	Solo + C
Tensão de Pico (kPa)		261,3	88,43	113,4	232,8
Módulo Inicial (Ei)	E50	72,79	17,87	15,57	44.94
	E	94,17	15,87	11,54	31,3
Taxa Pós Pico (kPa)		-65,01	-9,1	-14,02	-43,1

Tabela 2: Resultados do ensaio de Compressão Simples em kPa com mistura de 5% de aditivo

Amostra		Solo Puro	Solo + A	Solo +B	Solo + C
Tensão de Pico (kPa)		261,3	116,9	88,43	251,3
Módulo Inicial (Ei)	E50	92,17	14,52	17,10	24.78
	E	94,17	12,73	15,51	16,52
Taxa Pós Pico (kPa)		-65,01	-30,24	-8,96	-25,9

Tabela 3: Resultado da Compressão Simples com em kPa mistura de 10% de aditivo

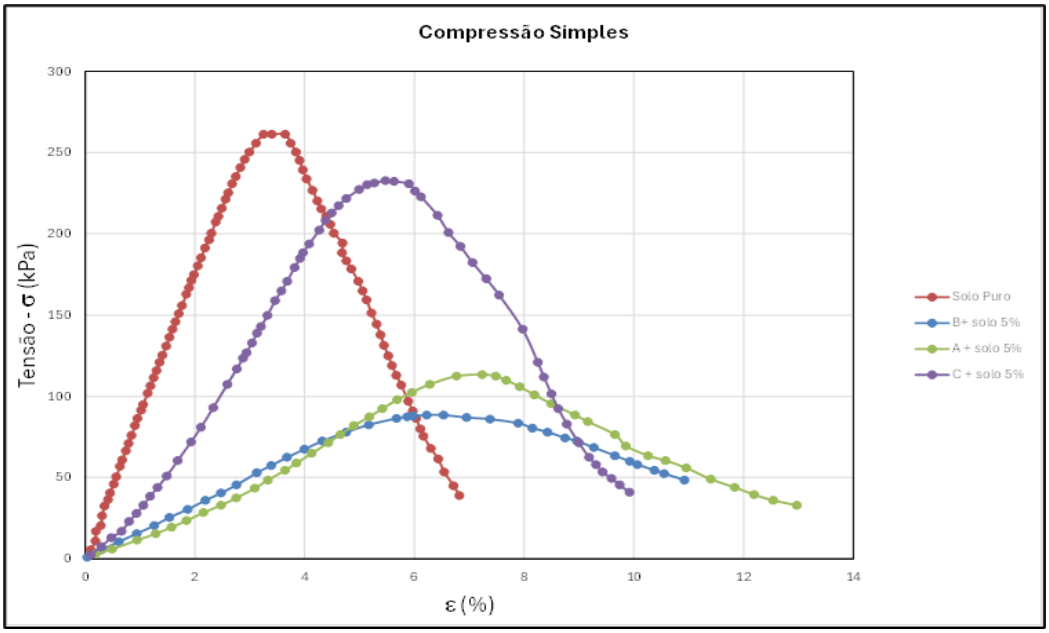


Figura 8: Ensaio de Compressão Simples com solo arenoso siltoso + 5% de aditivo.

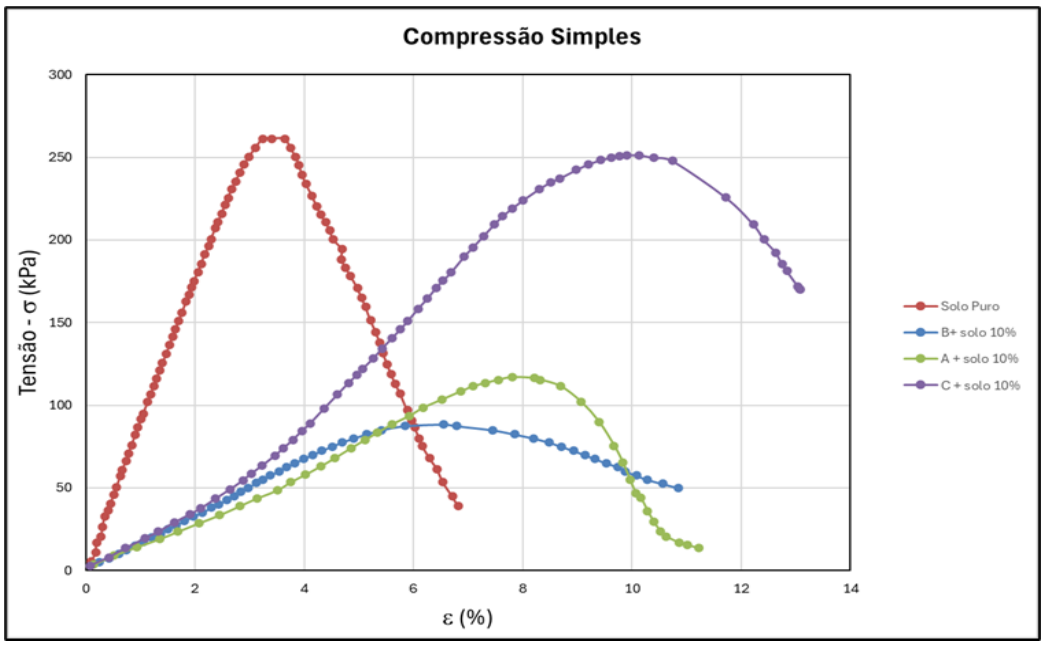


Figura 9: Ensaio de Compressão Simples: Solo areno siltoso + 10% de aditivo

Observa-se que a incorporação do resíduo do tipo C apresentou comportamento distinto das demais misturas, apresentando valores de resistência próximos aos do solo natural, o que pode estar associado à granulometria intermediária e à melhor interação entre as partículas do solo e do resíduo.

4 RESULTADOS

A partir das análises granulométricas, microestruturais e dos ensaios de compactação, verificou-se que a incorporação de serragem altera de maneira significativa o comportamento geotécnico do solo estudado. As curvas granulométricas evidenciaram que a variação no tamanho das partículas do resíduo influencia diretamente o empacotamento e a distribuição interna dos vazios nas misturas.
As imagens de MEV demonstraram que as partículas apresentam morfologia alongada, superfície rugosa e estrutura fibrosa, características que favorecem a interação mecânica com a matriz do solo, contribuindo para mecanismos de reforço físico e redistribuição de tensões.
Nos ensaios de compactação Proctor Normal, observou-se redução da densidade seca máxima e aumento da umidade ótima com o incremento do teor de serragem, comportamento mais acentuado no teor de 10% quando comparado ao de 5%. Tal resultado está associado à baixa massa específica e à elevada capacidade de absorção hídrica do resíduo. O teor de 5% apresentou alterações mais moderadas, indicando melhor equilíbrio entre compacidade e incorporação sustentável.
Sob a perspectiva de aplicação em subleitos de pavimentos, os resultados indicam que teores moderados de serragem podem ser tecnicamente viáveis, desde que adequadamente controlados, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos e redução de impacto ambiental. Assim, a serragem demonstra potencial como alternativa complementar em processos de estabilização sustentável, especialmente em obras de baixo a médio carregamento.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nas análises granulométricas, microestruturais e nos ensaios de resistência mecânica, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A análise microestrutural por MEV evidenciou partículas de serragem com morfologia irregular e estrutura fibrosa, características que favorecem a interação mecânica com a matriz do solo.
- Os ensaios de compressão simples indicaram que a influência da serragem sobre a resistência do material depende diretamente do tipo de resíduo e do teor de incorporação.
- Entre as misturas analisadas, solo mais amostra do tipo C, apresentaram desempenho mecânico próximo ao do solo natural, indicando potencial técnico para aplicação em camadas de subleito de pavimentos de baixo a médio carregamento.
- A utilização de serragem como material estabilizante apresenta ainda benefícios ambientais relevantes, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos da indústria madeireira e para a promoção de práticas construtivas mais sustentáveis.
- Apesar dos resultados promissores**,** destaca-se a necessidade de continuidade das pesquisas, especialmente com a ampliação da campanha experimental, avaliação de diferentes tipos de solos, variação de teores de incorporação e análises de durabilidade a longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à UFMG pelo apoio institucional. Agradecimento ao corpo técnico e pesquisadores do LabGEO, do Laboratório de Água na Mineração e do LMEV (Instituto de Geociências), cuja infraestrutura foi fundamental para a execução dos ensaios e análises deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17212: Solos: Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459: Solos: Determinação do limite de liquidez. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180: Solo: Determinação do limite de plasticidade. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Solos: Ensaio de compactação. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13292: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14545: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6502: Solos e rochas: Terminologia. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ANBURUVEL,Arulanantham.The engineering behind soil stabilization with additives: a state-of-the-art review.Geotechnical and Geological Engineering, v. 42, n. 1, p. 1–42, 2024.

CORRÊA, Glaucinei Rodrigues. Desenvolvimento, produção e caracterização de compósitos de madeira-plásticos para aplicação na indústria moveleira. [S.l.: S.n.].

CORRÊA, Glaucinei Rodrigues; POLICARPO, Alessandro de Oliveira. Ligno: material compósito com resíduo de madeira. 2019.

JOHANSSON, Fernando. Alternativas de destinação de resíduos de MDF. bachelorThesis—[S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 8 nov. 2016.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/66

Avaliação da estabilização de argila montmorilonítica por adição de lodo de ETA

Henrique Araujo Moura Brito [1]
Graduando em Engenharia Civil, IFTO, Palmas-TO, Brasil, henrique.brito@estudante.ifto.edu.br

Hugo Lopes Pereira [2]
PEBTT, IFTO, Palmas-TO, Brasil, hugo.pereira1@ifto.edu.br

Flávio da Silva Ornelas [3]
PEBTT, IFTO, Palmas-TO, Brasil, flavioornelas@ifto.edu.br

José Ademilson dos Santos Junior [4]
TAE, IFTO, Palmas-TO, Brasil, jose.santos@ifto.edu.br

RESUMO: Argilas expansivas, principalmente aquelas com predominância de montmorilonita, apresentam elevada sensibilidade à variação do teor de umidade, resultando em perda de resistência e instabilidade geotécnica. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a eficiência da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na estabilização de uma argila com potencial montmorilonítico, empregando uma metodologia experimental simples e de baixo custo. A caracterização indireta da atividade da fração argilosa foi realizada por meio do ensaio de adsorção por azul de metileno, enquanto o comportamento geotécnico da argila natural e das misturas solo-lodo foi avaliado pelo método MCT das pastilhas, considerando teores de lodo de 0%, 5%, 10%, 20% e 30%, com análise da penetração, fraturamento e contração diametral após reidratação. A adição de lodo de ETA promoveu melhoria do comportamento mecânico e da integridade estrutural das pastilhas, sendo que teor de 5% de lodo, apresentou os menores valores de penetração e fraturamento com maior uniformidade entre os corpos de prova. A pesquisa evidenciou o potencial do lodo de ETA como agente estabilizante, demonstrando a aplicabilidade do método como ferramenta de apoio à definição experimental de dosagens ótimas em estudos geotécnicos preliminares.

PALAVRAS-CHAVE: Argilas expansivas, Estabilização química, Lodo de ETA, Método MCT.

ABSTRACT:

Expansive clays, particularly those with a predominance of montmorillonite, are highly sensitive to variations in moisture content, which may result in loss of strength and geotechnical instability. In this context, this study evaluated the efficiency of adding water treatment plant (WTP) sludge to stabilize a clay with montmorillonite potential, using a simple and low-cost experimental methodology. The indirect characterization of the clay fraction activity was carried out using the methylene blue adsorption test, while the geotechnical behavior of the natural clay and soil-sludge mixtures was assessed using the MCT tablet method. Sludge contents of 0%, 5%, 10%, 20%, and 30% were investigated, with analyses of penetration resistance, fracturing, and diametral contraction after rehydration. The results showed that the addition of WTP sludge improved the mechanical behavior and structural integrity of the tablets. The mixture containing 5% sludge exhibited the lowest penetration values and the most uniform behavior among the specimens, indicating the occurrence of an optimal stabilization content for the studied clay. The study highlights the potential of WTP sludge as a stabilizing agent and demonstrates the applicability of the proposed methodology as a practical tool to support the experimental definition of optimal dosages in preliminary geotechnical studies.

KEYWORDS: Expansive clays, Chemical stabilization, Water treatment sludge, MCT method.

1 INTRODUÇÃO

Argilas expansivas representam um dos principais desafios geotécnicos em obras de infraestrutura, em função da variação volumétrica associada às mudanças no teor de umidade, resultando em perda de resistência e instabilidade estrutural. Entre os argilominerais responsáveis por esse comportamento, destaca-se a montmorilonita, pertencente ao grupo das esmectitas, caracterizada por elevada área superficial específica e alta capacidade de troca catiônica, fatores que favorecem a adsorção de água e a expansão volumétrica (JONES; JEFFERSON, 2012; BORGES *et al*., 2023).

A estabilização de solos expansivos pode ser realizada por meio de adições químicas cimentícias, técnicas de estabilização mecânica, ou pelo emprego de estabilizantes não convencionais, como óleos sulfonados, compostos de potássio, compostos de amônio e polímeros, visando à redução da plasticidade, da expansividade e à melhoria das propriedades resistentes do solo (JONES; JEFFERSON, 2012).

Entretanto, os custos elevados associados às técnicas convencionais de estabilização de solos expansivos têm motivado a busca por alternativas mais econômicas. Nesse contexto, tem-se avaliado a utilização de resíduos sólidos como agentes estabilizantes de solos, abordagem que também é impulsionada pela necessidade de adoção de práticas ambientalmente sustentáveis e pela possibilidade de reaproveitamento de materiais anteriormente tratados como passivos ambientais. Essa estratégia está associada às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prioriza a redução, o reuso e a reciclagem de resíduos, bem como às restrições legais ao descarte inadequado desses materiais no meio ambiente (BRASIL, 2010; ACHON; CORDEIRO, 2015).

Lucena *et al*. (2016) e Lucena *et al*. (2017) demonstraram que a utilização de lodo gerado em estações de tratamento de água (ETA) na estabilização química de solos expansivos pode resultar não apenas em benefícios ambientais, mas também na melhoria do comportamento geotécnico dos solos tratados. O lodo de ETA, classificado como resíduo proveniente de serviços públicos de saneamento básico, deve ser gerenciado segundo as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Entretanto, a destinação final desse resíduo é, em geral, associada a elevados custos operacionais, o que reforça a importância de se avaliar sua utilização como material alternativo para a melhoria das propriedades geotécnicas de solos empregados em obras de engenharia. (ACHON; CORDEIRO, 2015).

O lodo gerado em ETA é um resíduo sólido resultante, principalmente, das etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração da água bruta, sendo constituído, em grande parte, por partículas minerais finas e hidróxidos metálicos. Em função dos produtos químicos empregados no tratamento da água, esse material apresenta composição predominante de compostos à base de alumínio e ferro, associados às impurezas removidas durante o processo de clarificação (CUNHA *et al*., 2019).

A hipótese dessa pesquisa baseia-se na premissa de que a presença de cátions multivalentes no lodo gerado em ETAs, como Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+} e Fe^{3+}, pode favorecer mecanismos de estabilização em argilas montmoriloníticas. Esses cátions têm origem, principalmente, nos coagulantes à base de sais de alumínio e ferro empregados nas etapas de coagulação e floculação do tratamento da água, bem como nos constituintes minerais associados ao processo (ACHON; CORDEIRO, 2015; CUNHA *et al*., 2019). A substituição de cátions monovalentes por cátions multivalentes tende a promover a compressão da dupla camada montmorilonítica, reduzindo o espaçamento interlamelar e, consequentemente, a quantidade de água adsorvida entre as lâminas cristalinas (MITCHELL; SOGA, 2005; JONES; JEFFERSON, 2012).

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da adição de lodo de ETA na estabilização de uma argila com potencial montmorilonítico, definido a partir do ensaio de adsorção por azul de metileno como ferramenta de caracterização indireta da atividade da fração argilosa. Para análise das melhorias geotécnicas com a redução da atividade da argila, utilizou-se o método MCT das pastilhas para diferentes percentuais de adição de lodo, com foco na análise da expansividade, da penetração ao longo do tempo e da contração após secagem. Os resultados visam contribuir para o entendimento do potencial do lodo de ETA como agente estabilizante, bem como para a ampliação de alternativas sustentáveis na geotecnia ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O lodo de ETA foi obtido diretamente da unidade operacional, proveniente das etapas de coagulação e decantação. O material foi previamente seco em estufa a 60 °C por 24 h, destorroado manualmente e peneirado na peneira nº 200.

A argila utilizada no estudo tem histórico de comportamento expansivo in loco. Adotou-se o ensaio de adsorção por azul de metileno como método indireto para avaliação da atividade da fração argilosa e inferência sobre a possível predominância de montmorilonita. O método baseia-se na adsorção preferencial do corante catiônico azul de metileno pelas superfícies carregadas negativamente dos argilominerais, sendo particularmente sensível à presença de minerais do grupo das esmectitas.

A solução de azul de metileno (CI 52015, monohidratado, pureza 88%) foi preparada na concentração nominal de 1 g/L, correspondendo a concentração efetiva de 0,88 g/L. A superfície específica (SE) foi estimada pelas expressões clássicas apresentadas por Beaulieu (1979) e Fabbri (1994), com correção da concentração pela pureza do reagente, conforme as Equações 1 e 2.

$$S = \frac{A.N.m}{Mam.1000} \tag{1}$$

Onde:
S = Superfície recoberta por um 1 ml de azul de metileno na concentração utilizada (m^2/ml);
A = Área da face da molécula de azul de metileno na concentração utilizada (130 $Å^2$);
N = Número de Avogadro (6,02 x 10^{23});
M = Massa do azul de metileno seco (g);
Mam = Massa molecular do azul de metileno na forma anidra (319,9 g).

$$SE = \frac{S.V}{M} \tag{2}$$

Onde:
SE = Superfície específica (m^2/g);
V = Volume do azul de metileno consumido (ml)
M = Massa do solo seco (g);

O ensaio foi conduzido segundo o procedimento da mancha em papel filtro, com adição gradual de solução aquosa de azul de metileno à suspensão de solo, até a identificação do ponto de saturação, caracterizado pela formação de um halo azul claro ao redor da gota depositada no papel filtro. Esse procedimento segue as recomendações propostas por Fabbri (1994), amplamente utilizadas em estudos aplicados à classificação MCT.

A avaliação do comportamento geotécnico da argila natural e das misturas solo-lodo foi realizada por meio do método MCT (Miniatura Compactado Tropical), utilizando-se o método expedito das pastilhas, conforme proposto originalmente por Nogami e Villibor (1981, 1994) e posteriormente sistematizado e adaptado por Fortes (1990), Godoy (1997) e D'Ávila, Hax e Freitas (2009). Esse método foi desenvolvido especificamente para a caracterização de solos tropicais, permitindo a avaliação indireta de propriedades relacionadas à expansibilidade, contração, permeabilidade e resistência.

As amostras de solo e de lodo de ETA foram previamente secas em estufa à temperatura de 60 °C por 24 horas. Após a secagem, os materiais foram destorroados manualmente e peneirados na peneira nº 40. As misturas solo-lodo foram preparadas para cinco teores de adição de lodo de ETA: 0%, 5%, 10%, 20% e 30%.

As misturas das frações finas para os diferentes teores de lodo foram umedecidas com água destilada e espatulada sobre placa de vidro até a obtenção de uma pasta homogênea. O ponto de moldagem foi definido com base na consistência ajustada para proporcionar uma penetração de aproximadamente 1 mm, medida com auxílio de um minipenetrômetro (NOGAMI; VILLIBOR, 1994)

As pastilhas foram moldadas em anéis de PVC rígido, com diâmetro interno médio de 21,6 mm e espessura aproximada de 5 mm, previamente lubrificados com vaselina. Para cada teor de lodo foram moldadas cinco pastilhas, totalizando 25 corpos de prova. Após a moldagem, as pastilhas foram submetidas à secagem natural por um período de 7 dias.

Após a secagem, foram realizadas medições da contração diametral (Ct), definida pela diferença entre o diâmetro interno médio do anel e o diâmetro médio da pastilha seca, conforme metodologia clássica do método MCT. A penetração foi avaliada por meio do ensaio de penetração com minipenetrômetro (massa = 10 g; agulha com diâmetro = 1,3 mm) aplicado na região central das pastilhas, em intervalos de 5, 15, 30, 60 e 120 minutos, além da leitura final após 24 horas de reidratação. Foram também registradas e quantificadas o surgimento de trincas após a reidratação (FORTES, 1990; GODOY, 1997).

Os valores de penetração e número de fraturas foram utilizados para análise do comportamento da argila natural e das misturas solo-lodo, com foco na expansibilidade, sensibilidade à água e resistência à penetração, parâmetros diretamente relacionados à classificação MCT e ao desempenho geotécnico de solos tropicais em obras de engenharia (NOGAMI; VILLIBOR, 1981, 1994, 1995; GODOY, 1997).

3 RESULTADOS

O consumo total de azul de metileno de 300 mL na concentração de 1 g/l, resultou no valor de azul para um grama de fração de argila (Va) = 132 x 10^{-3} g/g. A superfície específica foi estimada conforme Fabbri (1994), com correção pela concentração efetiva da solução utilizada, obtendo-se SE ≈ 323 m²/g.

Não foi possível, no âmbito deste trabalho, determinar diretamente o percentual da fração argila com diâmetro inferior a 0,002 mm. Em razão disso, o coeficiente de atividade (CA) não pôde ser calculado de forma direta. Entretanto, a partir do ensaio de lavagem na peneira nº 400, verificou-se que o material apresenta retenção mínima de 16,97%, permitindo estimar um valor mínimo para o coeficiente de atividade, resultando em CA_{min}= 159 g/g%.

A comparação desses resultados com os valores de referência apresentados por Fabbri (1994) (Quadro 1), indica elevada atividade da fração argilosa, compatível com a presença significativa de argilominerais 2:1 expansivos (esmectitas), ainda que potencialmente em mistura.

Quadro 1. Parâmetros de atividade argilosa e adsorção de azul de metileno para diferentes grupos de argilominerais.

Grupos de argilo-minerais	Superfície específica (m²/g)	Coeficiente de atividade (10^{-3}g/g%)	Valores de azul (10^{-3}g/g)	Grau de atividade
Montmorilonitas	860	350	350	Muito Ativo
Vermiculitas	200	82	82	
Ilitas	200	30	30	Ativo
Caulinitas	48	20	20	
Laterizados	27	11	11	Pouco Ativo

Fonte: Fabbri (1994, p. 68).

O consumo elevado de azul de metileno foi interpretado como indicativo de alta atividade da fração argilosa, compatível com solos contendo argilominerais expansivos do grupo das esmectitas, em especial a montmorilonita.

Durante a execução do método MCT das pastilhas, as amostras moldadas com a argila passante na peneira nº 40, após o período de reidratação adotado de 24 h, apresentaram redução da resistência à penetração. As pastilhas também demonstraram fraturamento durante a reidratação, comportamento compatível com solos de elevada atividade coloidal (MITCHELL; SOGA, 2005). Por outro lado, após a adição do lodo de ETA percebeu-se melhoria do comportamento geotécnico da argila estudada, sobretudo no que se refere ao aumento da resistência à penetração e à integridade estrutural das pastilhas, como pode ser observado na Figura 1.

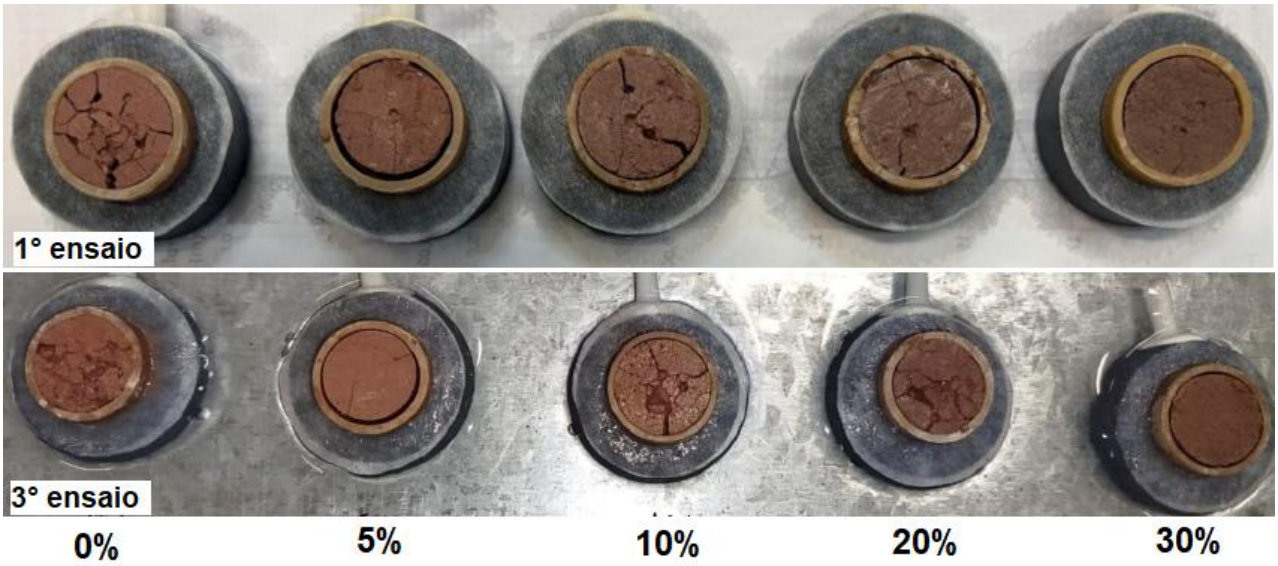


Figura 1. Aspecto das pastilhas do método após reidratação, para diferentes teores de lodo de ETA, referentes aos ensaios um e dois realizados (Fonte: os autores).

Os resultados do ensaio de penetração indicaram que a argila natural apresentou elevada redução de resistência superficial após reidratação, enquanto as misturas contendo lodo de ETA exibiram melhoria do comportamento mecânico. Destaca-se o teor de 5% de lodo, que apresentou os menores valores de penetração e comportamento uniforme entre os corpos de prova, sugerindo a ocorrência de um teor ótimo de estabilização para a referida argila. Para teores superiores, observou-se aumento da variabilidade dos resultados, possivelmente associado a heterogeneidades na mistura ou a efeitos físicos adversos decorrentes do excesso de resíduo.

Nas Tabelas 1 estão presentes os valores de penetração medidos, para os 5 ensaios realizados para os diferentes teores de adição de lodo. A Tabela 2 apresenta valores médios para os 5 ensaios realizados.

Tabela 1. Penetração das pastilhas MCT em função do teor de lodo de ETA.

	Penetração (mm)				
Teor de lodo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
0%	5	5	5	4	1
5%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10%	2	2	4	0,5	0
20%	2	1	3	0	4
30%	1	0,5	0,5	1	0

Tabela 2. Penetração média das pastilhas MCT em função do teor de lodo de ETA.

Teor de lodo	Penetração média (mm)	Desvio padrão	CV (%)
0%	4	1,73	43,3
5%	0,5	0	0
10%	1,7	1,57	92,1
20%	2	1,58	79,1
30%	0.6	0,42	69,7

Os resultados referentes ao número de fraturas observadas após o ensaio de reidratação indicaram elevado fraturamento da argila natural e, em um dos corpos de prova, perda total da integridade estrutural. A incorporação de lodo de ETA promoveu redução significativa do número de fraturas, com destaque para o teor de 5%, que apresentou os menores valores e comportamento uniforme entre as amostras. Para teores

intermediários, observou-se aumento da variabilidade dos resultados, enquanto para o teor de 30% verificou-se novamente melhora da integridade estrutural, ainda que sem superar o desempenho obtido com 5% de lodo.

Esses resultados associam-se aos obtidos por Mazzutti, Klamt e Faro (2023), os autores concluíram que a mistura composta por 70% de solo e 30% de lodo de ETA, definida como a melhor para aplicação em camadas de fundo e cobertura final de aterros sanitários devido a melhorias no coeficiente de permeabilidade e na resistência à compressão simples dentre todas as misturas.

Conforme Almeida *et al*. (2023), resultados distintos quanto ao teor ótimo de lodo têm sido reportados na literatura, variando desde baixos percentuais até valores superiores a 30%, a depender da aplicação e do material estudado, demonstrando que a aplicação geotécnica do lodo de ETA apresenta elevada variabilidade de comportamento.

Na Tabelas 3 estão presentes os números de fraturas medidos, para os 5 ensaios realizados para os diferentes teores de adição de lodo. A Tabela 4 apresenta valores médios para fraturamentos dos 5 ensaios realizados.

Tabela 3. Fraturamento das pastilhas MCT em função do teor de lodo de ETA.

Número de fraturas					
Teor de lodo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
0%	13	16	Desmanchou	5	1
5%	1	2	3	3	1
10%	3	3	11	2	1
20%	5	1	9	0	9
30%	1	0	1	3	0

Tabela 4. Número médio de fraturas das pastilhas MCT em função do teor de lodo de ETA.

Teor de lodo	N° médio de fraturas	Desvio padrão	CV (%)
0%	8,75	6,95	79,4
5%	2	1	50
10%	4	4	100
20%	4.8	4.27	88.9
30%	1	1.22	122.5

Conforme Tabela 5, não houve contração diametral em função do teor de lodo de ETA, mantendo-se em faixas semelhantes para todas as misturas, com valores médios de contração, entre 0,27 mm e 0,31 mm. Desse modo, a adição de lodo nos teores aqui adotados, não exerceu influência sobre a introdução de efeitos adversos associados à retração por secagem.

Tabela 5. Contração das pastilhas MCT em função do teor de lodo de ETA.

Contração diametral (mm)						
Teor de lodo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	média
0%	0,27	0,28	0,3	0,31	0,33	0,30
5%	0,29	0,33	0,31	0,31	0,29	0,31
10%	0,3	0,35	0,25	0,3	0,35	0,31
20%	0,27	0,31	0,29	0,28	0,3	0,29
30%	0,27	0,24	0,3	0,26	0,27	0,27

A metodologia adotada permitiu captar o comportamento geotécnico da argila em função da adição de diferentes teores de lodo de ETA, podendo-se avaliar indiretamente a atividade da fração argilosa e identificar faixas de dosagem associadas à melhoria do desempenho do material, evidenciando o potencial do procedimento como ferramenta de apoio à definição de teores ótimos de estabilização, mesmo diante da elevada variabilidade inerente aos materiais analisados. No entanto, a eficiência da estabilização depende das características do lodo e do solo, e o desempenho não apresenta relação linear com o aumento da dosagem,

reforçando a necessidade de determinação experimental de um teor ótimo específico para cada combinação solo-resíduo (MONTALVAN, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia experimental aplicada permitiu a definição de teores ótimos de lodo de ETA para a estabilização de solos com potencial montmoriloníticos. Nesse sentido, o método apresenta-se como um instrumento prático, de apoio à decisão, especialmente útil em etapas preliminares de projetos de estabilização e de reaproveitamento de resíduos na geotecnia ambiental.

A adição do lodo de ETA promoveu melhoria do comportamento geotécnico da argila estudada, sobretudo no que se refere ao aumento da resistência à penetração e à integridade estrutural das pastilhas, com a diminuição ou ausência de ocorrência de fraturas, indicando aumento da coesão e melhoria do comportamento mecânico do material, o que evidencia o potencial do lodo como agente de estabilização química.

Entre os teores avaliados, a adição de 5% de lodo de ETA apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à penetração, com comportamento altamente uniforme entre os corpos de prova. Recomenda-se que estudos futuros avaliem a aplicação da metodologia proposta em outros tipos de solos e lodos, considerando diferentes origens e composições, a fim de ampliar sua aplicabilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. (2015) Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA – Lei 12.305/2010. In: XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, Poços de Caldas. Anais... ASSEMAE.

ALMEIDA, M. M.; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; TONUS, B. P. de A. (2023) Revisão sobre as aplicações geotécnicas de lodo de estação de tratamento de água no Brasil. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 13, n. 2, p. 47–53. DOI: 10.29327/241867.13.2-4.

BEAULIEU, J. (1979) Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au muyeu du bleu de méthylène. Tese (Doutorado), Université de Paris-Sud, Orsay, 133 p.

BORGES, J. J. da S.; HOLANDA, M. J. de O.; FERREIRA, S. R. de M.; AMORIM, S. F. (2023) Solos expansivos: carta de suscetibilidade de ocorrência no Brasil utilizando Rede Neural Artificial – RNA. Revista de Geografia (Recife), v. 40, n. 3, p. 119–140. DOI: 10.51359/2238-6211.2023.258626.

BRASIL (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília.

CUNHA, G. D.; LIMA, J. S. V.; STACHIW, R.; TRONCO, K. M. Q. (2019) Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. Nature and Conservation, v. 12, n. 2, p. 19-30. DOI: 10.6008/CBPC2318-2881.2019.002.0003.

D'ÁVILA, R. S.; HAX, S.; FREITAS, P. C. (2009). Classificação expedita de materiais para vias não-pavimentadas – 5ª aproximação. In: CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – CONINFRA, 2009, São Paulo. Anais… p. 3–17.

FABBRI, G. T. P. (1994) Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. Tese (Doutorado em Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 176 p.

FORTES, R. M. (1980) Método expedito de identificação MCT de solos tropicais para finalidades rodoviárias, utilizando-se anéis de PVC rígido. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GODOY, H. (1997). Identificação e classificação geotécnica de latossolos do estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo Instituto de Geociências, São Paulo, 144 p.

JONES, D.; JEFFERSON, I. (2012) Expansive soils. In: ICE Manual of Geotechnical Engineering. London: ICE Publishing, v. 1, p. 413–441.

LUCENA, L. C.; JUCA, J. F. T.; SOARES, J. B.; BARROSO, S. H. A.; PORTELA, M. G. (2016) Characterization and evaluation of the potential use of sludge from WTP and STP in paving. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 166–178.

LUCENA, L. C.; SILVA, J. R.; MARINHO FILHO, P. G. T.; PORTELA, M. G. (2017) Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá, v. 10, n. 3, p. 873–890.

MAZZUTI, E.; KLAMT, R.; FARO, V. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. Soils and Rocks, v. 46, n. 1, 2023.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. (2005) Fundamentals of Soil Behavior. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons.

MONTALVAN, E. L. T. (2021) Geotechnical properties of mixtures of water treatment sludge and residual lateritic soils from the State of São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1981) Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. Anais… Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS).

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1994) Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10., Foz do Iguaçu. Anais… ABMS, p. 1293–1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995) Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/67

Avaliação da influência da trituração na determinação de parâmetros geotécnicos de RCC < 4,75 mm em seu estado natural

Johana Marcela Carmona Wilches
Estudante de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, jmc.wilches@unesp.br

Paloma Santos Wolf de Mattos
Estudante de Graduação, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, paloma.wolf@unesp.br

Roger Rodrigues Augusto
Professor Doutor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, roger.rodrigues@unesp.br

Giulliana Mondelli
Professora Doutora, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, g.mondelli@unesp.br

RESUMO:
A cidade de Bauru, no estado de São Paulo, possui um sistema integrado para a gestão de resíduos da construção civil (RCC). Entretanto, foram identificadas 16 áreas que, embora não planejadas para esse fim, foram preenchidas com RCC, evidenciando a ausência de diretrizes consolidadas para o reaproveitamento e a destinação adequada desses materiais. Nesse contexto, torna-se necessário compreender os fluxos operados pela usina de processamento Portal Rays, responsável pelos maiores volumes de recebimento e processamento no município. Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento geotécnico do RCC processado quando constituído exclusivamente por partículas < 4,75 mm, sem adição de solo ou de agente estabilizante. O material foi coletado diretamente na usina, em sua condição original, e posteriormente submetido à trituração até a obtenção da fração desejada. Foi conduzido um programa experimental com ensaios de gravimetria, granulometria, compactação e cisalhamento direto, com o objetivo de avaliar o comportamento físico-mecânico do RCC nessa condição. Os resultados indicam que a compactação é fortemente condicionada pela interação entre composição gravimétrica e granulometria, enquanto os ensaios de cisalhamento direto apontam a necessidade de investigações adicionais, especialmente quanto ao papel da fragmentação e à adequação dos critérios de resistência para os RCC.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de construção e demolição (RCD), Materiais reciclados, Comportamento mecânico, Fragmentação, Sustentabilidade.

ABSTRACT:
The city of Bauru, in the state of São Paulo, has an integrated system for construction and demolition waste (CDW) management. However, 16 areas not originally intended for this purpose have been filled with CDW, indicating the lack of consolidated guidelines for proper reuse and disposal. In this context, understanding the material flows at the Portal Rays processing plant, which handles the largest volumes in the municipality, becomes essential. This study evaluates the geotechnical behavior of processed CDW composed exclusively of particles < 4.75 mm, without soil addition or stabilizing agents. The material was collected directly from the plant in its original condition and then crushed to obtain the required fraction. Gravimetric, particle size distribution, compaction, and direct shear tests were performed to assess the physical and mechanical behavior of the material under this condition. Results show that compaction is strongly controlled by the interaction between gravimetric composition and particle size distribution, while direct shear results indicate the need for further investigation, particularly regarding fragmentation effects and the adequacy of strength criteria for CDW.

KEYWORDS: Construction and demolition waste (CDW), Recycled materials; Mechanical behaviour; Fragmentation; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção civil (RCC) constituem um dos maiores fluxos de resíduos sólidos no mundo. Países como Holanda, Dinamarca e Estônia apresentam taxas de reciclagem consolidadas, variando entre 92% e 98% (Chica-Osorio & Beltrán-Montoya, 2018). No Brasil, a geração de RCC também é significativa: estima-se que em 2024 o país tenha produzido aproximadamente 101 milhões de toneladas (ABREMA, 2025). Esses resíduos são compostos predominantemente por frações minerais, como concreto, argamassa e materiais cerâmicos (Marques Neto & Schalch, 2010). Apesar da existência de diretrizes e instrumentos normativos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), a Resolução CONAMA 307/2002 e a ABNT NBR 15115/2004, a taxa de reciclagem permanece baixa: apenas cerca de 7,2% em massa (15% em volume) é efetivamente reciclado, e muitas usinas operam aquém de sua capacidade instalada (Ferronato et al., 2023).

No município de Bauru, essa limitação também se evidencia. Entre 2012 e 2024, 16 áreas foram preenchidas com RCC sem critérios técnicos ou diretrizes de valorização, conforme registros do Sistema de Controle de Transporte de Resíduos (SEMMA, 2024). Nesse período, estima-se que o município tenha gerado aproximadamente 4 milhões de toneladas de RCC, das quais apenas 17% foram encaminhadas à usina licenciada de reciclagem, enquanto cerca de 60% foram destinadas a aterros municipais. Esses dados mostram que, apesar do arcabouço legal existente, ainda faltam estratégias operacionais capazes de reinserir o RCC reciclado na cadeia produtiva. Neste contexto, este estudo avalia o comportamento geotécnico do RCC processado pela usina Portal Rays após a etapa de separação, considerando o material tal como é produzido, ainda com a presença de impurezas. O material foi posteriormente submetido à trituração para obtenção da fração composta exclusivamente por partículas < 4,75 mm, sem adição de solo ou agentes estabilizantes. Foram realizados ensaios de granulometria, gravimetria, compactação e cisalhamento direto, com o objetivo de analisar o comportamento do RCC nessa condição e avaliar seu desempenho potencial in situ. Os resultados visam subsidiar futuras aplicações geotécnicas do material, contribuindo para sua valorização e para a reinserção do RCC na cadeia produtiva dentro dos princípios da economia circular.

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Amostragem e Preparação

Os RCC foram previamente triados pela usina Portal Viverde Rays, localizada em Bauru (SP, Brasil), para remoção dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Foram selecionadas 4 pilhas geradas em períodos distintos (junho/2023, setembro/2023, fevereiro/2024 e março/2024), denominadas RCC1–RCC4, sendo RCC1–RCC3 britadas com abertura nominal de 25 mm e RCC4 processada com abertura de 38–50 mm. A amostragem seguiu a ASTM D6009-19, ASTM D4687-14 (2022) e ASTM D5956-21, coletando-se dez subamostras no topo, centro e base de cada pilha, posteriormente homogeneizadas e quarteadas até a obtenção de uma amostra composta de aproximadamente 10 kg, conforme recomendado para partículas < 50 mm. As amostras foram submetidas a trituração no Triturador de Entulho TE2 CSM, 3 CV, até a obtenção da fração passante na peneira 4,75 mm. Essa fração triturada foi utilizada para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compactação e cisalhamento direto.

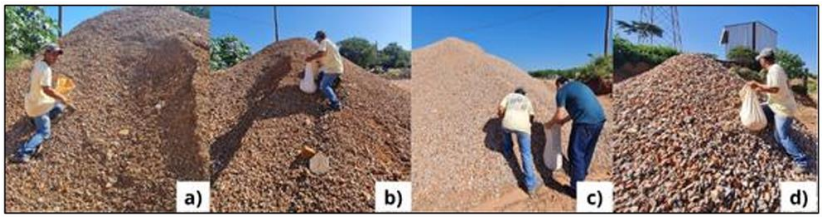


Figura 1. Coleta de amostras no Portal Viverde Rays. (a) RCC 1, (b) RCC 2, (c) RCC 3 e (d) RCC 4. Arquivo pessoal, 08/12/2022.

2.2 Caracterização Granulométrica e Gravimétrica

A granulometria e gravimetria das amostras de RCC foi realizada em duas etapas. Primeiro, a granulometria foi conduzida com o material tal como recebido da usina. O peneiramento a seco seguiu a ABNT NBR 17054, utilizando as peneiras de abertura 25, 19, 12,5, 9,5, 6,3, 4,8, 2,4, 1,2, 0,6, 0,3, 0,15 e 0,075 mm. O material retido foi pesado e utilizado na etapa gravimétrica, conduzida com o RCC em seu estado natural, classificando cada fração de acordo com o tipo de material constituinte. A segunda granulometria foi realizada exclusivamente com a fração passante na peneira de 4,75 mm, obtida após trituração, e as frações inferiores a 2,0 mm de ambas as etapas foram analisadas conforme a ABNT NBR 7181:2016. A massa específica dos sólidos (ρ_s), determinada no material em estado natural, foi de 2,702 g/cm³.

2.3 Compactação dos RCC

O ensaio de Proctor Normal foi realizado nas 4 amostras para determinar a densidade seca máxima (ρd_{max}) e o teor ótimo de umidade (W_{opt}), seguindo a ABNT NBR 7182:2016. O material utilizado foi a fração passante a 4,75 mm. O ensaio foi conduzido exclusivamente com RCC sem adição de solo ou agentes estabilizantes.

2.4 Ensaio de Cisalhamento Direto do RCC

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados nas 4 amostras, de acordo com a ASTM D3080/D3080M-11. As amostras foram ensaiadas em condição parcialmente saturada, ajustadas ao teor ótimo de umidade de compactação (w_{opt}). Foram aplicados esforços normais de 27,6; 55,3; 110,6 e 221,2 kPa, simulando as tensões verticais efetivas *in situ* a profundidades de até ~12 m, considerando peso unitário médio do RCC de 18,4 kN/m³.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Granulométrica e Gravimétrica

A granulometria dos RCC processados na usina Portal Rays apresentou padrões consistentes para as amostras RCC1, RCC2 e RCC3, com aproximadamente 82% do material > 4,75 mm e apenas 1,3–1,7% < 0,075 mm. Em contrapartida, o RCC4 exibiu um perfil significativamente mais graúdo, com cerca de 98% das partículas > 4,75 mm e apenas 0,3% < 0,075 mm. Embora as partículas dessas 3 amostras sejam mais finas em média (D_{10} menor), apresentam maior dispersão relativa de tamanhos, refletida no maior coeficiente de uniformidade (Cu). Embora o RCC4 possua partículas muito maiores (D_{60} alto), apresenta menor dispersão de tamanhos (Cu baixo), ou seja, as partículas são mais homogêneas, predominando o material graúdo, comportamento consistente com o observado durante a etapa de amostragem.

A fase de trituração refinou a granulometria nas 4 amostras (Figura 2, Tabela 1). A fração > 4,75 mm aumentou de ≈18% para ≈55%, enquanto a fração < 0,075 mm passou de ≈1,5% para ≈12%. O D_{10} diminuiu em todas as amostras, promovendo maior homogeneidade, com destaque para o RCC4, que passou de 19,61 mm para 0,04 mm. O coeficiente de uniformidade (Cu) aumentou, especialmente no RCC4, e os coeficientes de curvatura (Cc) diminuíram para todos os RCC, em faixas de 0,4 a 0,75, indicando que a trituração contribuiu para uma distribuição mais uniforme do material. Este processo, no entanto, não produziu uma quantidade de finos superior ao reportado na literatura, quando raramente excede 26,5% mesmo após processamento (Carmona et al., 2025).

A composição gravimétrica foi obtida a partir das frações separadas na granulometria, com cada grupo de material (concreto, cerâmica, argamassa, metais, plásticos, vidro e outros; Figura 3) identificado, separado manualmente e pesado para determinar a proporção relativa de cada componente nas amostras. A caracterização gravimétrica evidenciou uma clara dominância da fração mineral estrutural (concreto, brita, tijolos/blocos, cerâmicos, argamassa e asfalto), com valores entre 94,57% e 98,65% e elevada estabilidade composicional (média = 97,19%; SD = 1,82%; CV = 1,87%), o que confirma a eficácia do pré-processamento realizado no Portal Rays. A fração não mineral permaneceu abaixo de 6% (1,34–5,42%), mas apresentou alta variabilidade (CV = 64,82%), refletindo a ocorrência episódica de materiais leves e não estruturais. Embora minoritária, essa fração residual possui relevância técnica devido ao seu potencial para afetar a qualidade do

material reciclado, o que justifica seu monitoramento contínuo. Os resultados indicam que a usina opera com desempenho robusto, gerando um RCC de alta pureza e adequado para processos de valorização.

Tabela 1. Parâmetros granulométricos (D_{10}, D_{30}, D_{60}, Cu e Cc) dos RCC1, RCC2, RCC3 e –RCC4: material processado na usina Portal Rays e após a fase de trituração.

Gerador de Médio e Grande Porte (Portal Rays)	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
Material processado na usina					
RCC1	0.75	6.79	10.95	14.68	5.65
RCC2	0.53	6.16	10.15	19.31	7.12
RCC3	0.46	7.34	12.41	26.96	9.43
RCC4	19.61	24.26	30.57	1.56	0.98
Fase de trituração em laboratório					
RCC1	0.05	0.24	2.48	48.06	0.45
RCC2	0.07	0.27	2.54	36.39	0.40
RCC3	0.07	0.30	2.48	37.95	0.55
RCC4	0.04	0.23	1.91	50.02	0.75

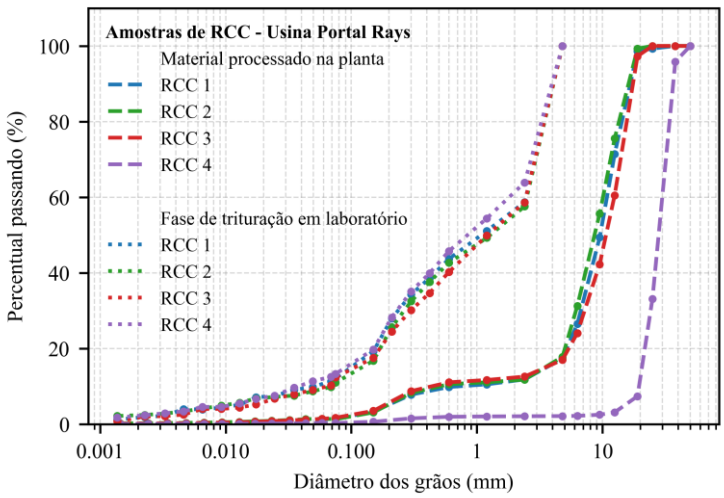


Figura 2. Distribuição granulométrica dos RCC1, RCC2, RCC3 *e* RCC4: estado inicial processado na usina e após fase de trituração em laboratório.

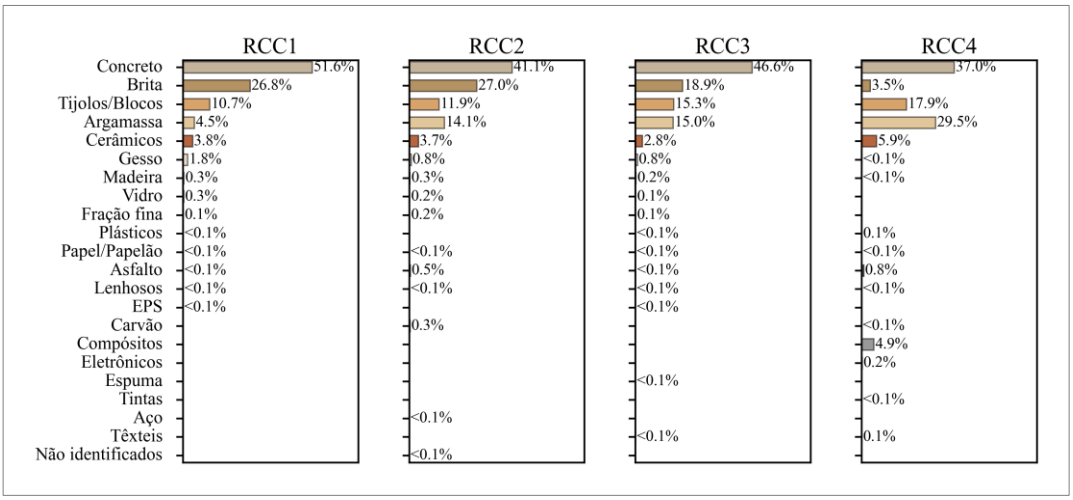


Figura 3. Composição gravimétrica dos RCC provenientes da usina Portal Rays (RCC1 a RCC4).

3.1.1 Comportamento dos RCC sem adição de solo sob energia Proctor Normal

Os resultados de compactação evidenciam comportamentos distintos entre as amostras (Figura 4). As amostras RCC1, RCC2 e RCC3 apresentaram densidades secas máximas (ρ_{dmax}) muito próximas, entre 1,745 e 1,755 g/cm³, associadas a umidades ótimas (W_{opt}) de 14,8% a 15,5%. Essa semelhança indica que a proximidade entre suas composições gravimétricas e distribuições granulométricas resulta em respostas de compactação praticamente equivalentes sob a energia Proctor Normal. Já o RCC4 apresentou ρ_{dmax} significativamente inferior (1,665 g/cm³) e W_{opt} mais elevada (17,4%), refletindo um comportamento mecânico diferenciado, associado justamente a essas variáveis.

A composição gravimétrica do RCC4 explica grande parte desse comportamento singular. Diferentemente das demais amostras, o RCC4 apresenta o menor teor de concreto, material mais denso, rígido e resistente à fragmentação, e proporções substancialmente maiores de bloco cerâmico, cerâmica e argamassa, frações mais porosas e estruturalmente frágeis (Figura 2). Embora inicialmente mais graúdo antes da etapa de trituração, esse conjunto de materiais tornou o RCC4 muito mais propenso à fragmentação, gerando uma quantidade superior de partículas finas. Consequentemente, observou-se uma alteração mais acentuada na sua distribuição granulométrica, e a combinação entre composição gravimétrica e maior geração de finos resultou diretamente no comportamento mecânico observado. O aumento de finos elevou a demanda de água necessária para favorecer o contato e o rearranjo das partículas, refletindo-se em W_{opt} mais alta e ρ_{dmax} mais baixa. Assim, o comportamento do RCC4 é plenamente consistente com sua composição e com o padrão típico de materiais cerâmicos e argamassas submetidos à fragmentação progressiva.

Ao comparar os resultados obtidos com informações disponíveis na literatura, observa-se que as amostras RCC1 e RCC3, mesmo sem adição de solo, apresentaram densidades secas máximas próximas ao limite inferior relatado por Mujtaba et al. (2013) para materiais classificados como areia bem graduada com silte (SW/SM) sob Proctor Normal (ρ_{dmax} entre 1,76 e 1,96 g/cm³), servindo aqui apenas como referência comparativa.

Como exemplo adicional de comparação, os solos naturais avaliados por Mujtaba et al. (2013) apresentaram umidades ótimas relativamente baixas (11,5–12,5%) sob Proctor Normal. No mesmo sentido, os RCC analisados neste estudo exibiram W_{opt} mais elevadas (14,8–17,4%), resultado coerente com suas características microestruturais e mineralógicas. Fragmentos de concreto, argamassa e cerâmica apresentam matrizes minerais porosas e maior angularidade e rugosidade superficial, o que aumenta a absorção de água e, consequentemente, a umidade ótima requerida para atingir a densidade máxima na compactação (Barrios et al., 2021).

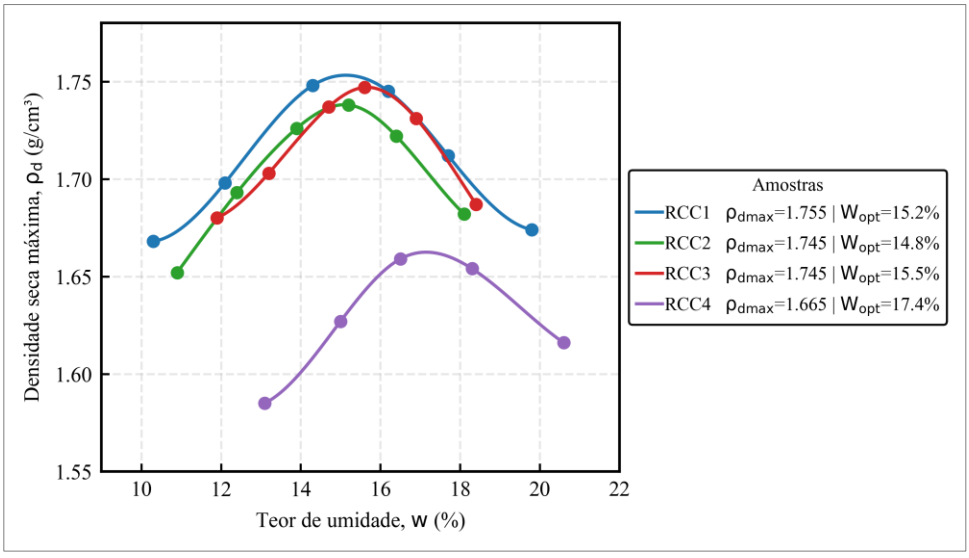


Figura 4. Comportamento das amostras de RCC < 4,75 mm compactadas após a fase de trituração, sem adição de solo, sob energia Proctor Normal.

3.1.2 Cisalhamento direto

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto das 4 amostras de RCC, sem adição de solo e submetidas a tensões normais entre ≈27 kPa e ≈221 kPa, são apresentados na Figura 5. A figura mostra os parâmetros de resistência calculados pelo critério de Mohr–Coulomb, incluindo os valores de c' e φ' obtidos para cada amostra, além de um ajuste não linear baseado em lei de potência, que será discutido subsequentemente.

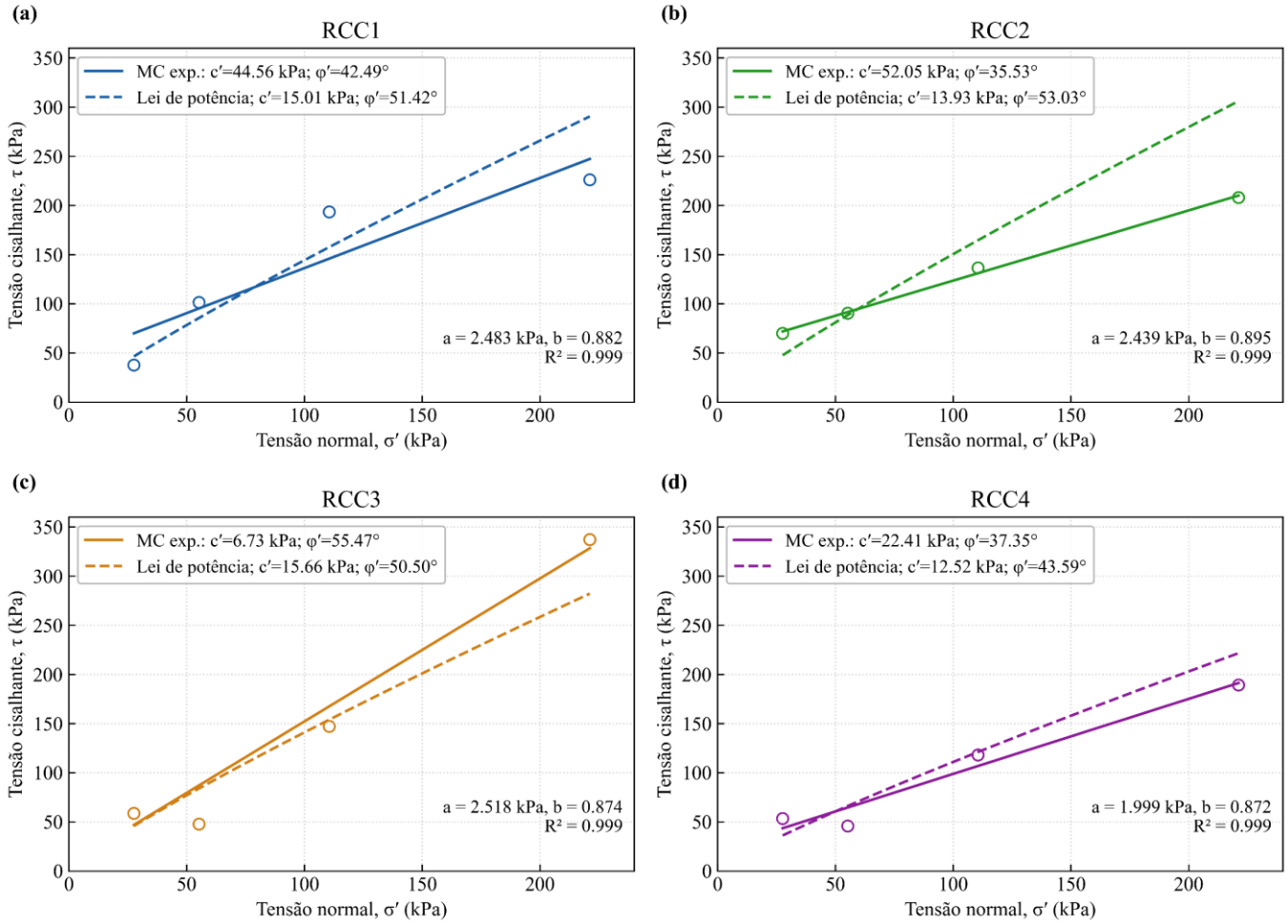


Figura 5. Cisalhamento direto das amostras RCC1 a RCC4 trituradas, submetidas a tensões normais semelhantes, com ajustes pelos critérios de Mohr–Coulomb (MC exp.) e lei de potência.

Os ensaios de cisalhamento direto apresentaram variação expressiva no ângulo de atrito interno, com valores entre 35° e 55°, amplitude compatível com a natureza friccional do RCC. Em contraste, as coesões aparentes (c′) variaram entre 6,8 kPa e 52 kPa, valores considerados elevados para um material predominantemente granular. Faixas semelhantes já foram documentadas por Arulrajah et al. (2013) e Yosri et al. (2024), incluindo registros de coesões muito superiores chegando a 187 kPa sob teores de umidade próximos dos adotados neste estudo. Esse comportamento variável do RCC reforça que múltiplas variáveis já descritas na literatura, tais como, alterações granulométricas decorrentes da trituração, fragmentação progressiva das partículas, rearranjo interno durante o cisalhamento, teor de finos, umidade e grau de compactação que podem modificar significativamente o desempenho do material reciclado, conforme discutido por Xu (2018) e Yosri et al. (2024).

Diante disso, buscou-se avaliar se, mantendo constante o grau de compactação na umidade ótima e aplicando tensões normais semelhantes, a trituração permitiria obter padrões consistentes de resistência entre diferentes lotes. No entanto, os resultados mostraram que o ajuste pelo critério de Mohr–Coulomb não produziu parâmetros adequados para o RCC.

Como alternativa exploratória, avaliou-se um modelo não linear do tipo lei de potência ($\tau = a \cdot \sigma^b$), fundamentado na formulação aplicada in situ por Xu (2019). Nessa abordagem, o parâmetro b indicou a sensibilidade da resistência ao aumento da tensão normal; nos RCC analisados, variou entre 0,872 e 0,895, descrevendo um comportamento, em que o incremento de resistência reduz conforme aumenta σ'. O uso da lei de potência permitiu estimar parâmetros equivalentes de Mohr–Coulomb mais compatíveis com a natureza predominantemente friccional do RCC, resultando em coesões reduzidas ($c' = 12–16$ kPa) e ângulos de atrito razoáveis ($\varphi' = 44–53°$). Esses valores se alinham ao intervalo reportado em ensaios triaxiais drenados (37–53 kPa) conforme indicado por Arulrajah et al. (2013), no entanto, a tendência de obtenção de coesões relativamente altas em RCC deve ser interpretada com cautela, pois esses valores refletem sobretudo um efeito aparente. A presença de argamassa aderida e a angularidade das partículas intensificam o intertravamento, influenciando diretamente o intercepto obtido no ajuste linear de Mohr–Coulomb Conforme (Arulrajah et al., 2013). Assim, parte da coesão estimada não corresponde a um comportamento verdadeiramente coesivo, mas ao modo como a estrutura das partículas recicladas responde ao cisalhamento, motivo pelo qual esses parâmetros devem ser analisados com prudência

Importa destacar que a aplicação da lei de potência possui caráter estritamente exploratório. Os resultados não devem ser interpretados como parâmetros finais, mas como indicações preliminares de que (i) o nível de trituração, (ii) o rearranjo estrutural durante o cisalhamento e (iii) a possível não linearidade da envoltória poderiam exercer influência relevante no comportamento do RCC. Ensaios adicionais são necessários para verificar essas hipóteses sob diferentes condições de umidade, compactação e carregamento.

4 Conclusões

A trituração modificou de forma mensurável a fração fina e o padrão de graduação dos RCC, evidenciando a sensibilidade do material ao processamento mecânico e resultando em incrementos de finos da ordem de até 12%. Os RCC avaliados, mesmo sem adição de solo, apresentaram resposta de compactação compatível com a de materiais granulares, ainda que demandando teores de umidade mais elevados para atingir densidades adequadas. A composição gravimétrica mostrou influência determinante no desempenho mecânico, confirmando que a interação entre granulometria, gravimetria, e grau de compactação controlam o comportamento macroscópico do material. Nos ensaios de cisalhamento direto, observou-se um comportamento essencialmente friccional, com coesão aparente alta. Enquanto o critério linear de Mohr–Coulomb não representou adequadamente os dados, a lei de potência forneceu parâmetros mais coerentes com o comportamento observado. Esses achados, ainda exploratórios, indicam a necessidade de estudos futuros que integrem diferentes níveis de trituração, estados de compactação e trajetórias de tensão, combinados a uma caracterização mineralógica mais abrangente, de modo a aprimorar a compreensão da resistência ao cisalhamento dos RCC sem adição de solo e esclarecer as possíveis variações de parâmetros em um material naturalmente heterogêneo como este.

5 Agradecimentos

Agradecemos ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação da Colômbia (MINCIENCIAS) pelo apoio financeiro, à Universidade Estadual Paulista (Unesp) – Campus de Bauru pelo suporte técnico, e à Portal Rays pela colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências bibliográficas

Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Disfani, M. M.; Bo, M. B. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077–1088. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508. Solo — *Determinação da massa específica de grãos que passam na peneira de 4,8 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 15115. *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil — Execução de camadas de pavimentação — Procedimentos.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo — Análise granulométrica.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 17054. *Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA) (2025). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025 (dados referentes a 2024)*. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2025/12/panorama-2025.pdf Acesso em: 3 mar. 2026.

ASTM International (2011). ASTM D3080/D3080M-11. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*

ASTM International (2011). ASTM D5956-02 (2011). *Standard Guide for Sampling Strategies for Heterogeneous Wastes*. West Conshohocken, PA.

ASTM International (2019). ASTM D6009-19. *Standard Guide for Sampling Waste Piles.* West Conshohocken, PA.

ASTM International (2022). ASTM D4687-12(2022). *Standard Guide for General Planning of Waste Sampling.* West Conshohocken, PA.

Barrios, A. M.; Vega, D. F.; Martínez, P. S.; Atanes-Sánchez, E.; Fernández, C. M. (2021). Study of the properties of lime and cement mortars made from recycled ceramic aggregate and reinforced with fibers. *Journal of Building Engineering*, 35, 102097.

Carmona Wilches, J. M.; Rodrigues, R. A.; Mondelli, G. (2025). Overview of the laboratory tests for geoenvironmental characterisation of construction and demolition waste. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: 10.1007/s11356-025-36351-1.

Chica-Osorio, L. M.; Beltrán-Montoya, J. M. (2018). Demolition and construction waste characterization for potential reuse identification. *Revista DYNA*, 85(206), 338–347.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). Resolução nº 307. Brasília.

Ferronato, N.; Moresco, L.; Guisbert Lizarazu, G. E.; Gorritty Portillo, M. A.; Conti, F.; Torretta, V. (2023). Comparison of environmental impacts related to municipal solid waste and construction and demolition waste management and recycling in a Latin American developing city. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 8548–8562.

Lei nº 12.305 (2010). Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília.

Marques Neto, J. C.; Schalch, V. (2010). Gestão dos resíduos de construção e demolição: estudo da situação no município de São Carlos-SP, Brasil. *Revista Engenharia Civil – Universidade do Minho*, 36, 41–50.

Mujtaba, H.; Farooq, K.; Sivakugan, N.; Das, B. M. (2013). Correlation between gradational parameters and compaction characteristics of sandy soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 7(4), 395–401.

SEMMA – Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Bauru (2024). Relatório de áreas receptoras de resíduos da construção civil. Bauru: SEMMA.

Xu, Y. F. (2018). Shear strength of granular materials based on fractal fragmentation of particles. *Powder Technology*, 333, 1–8.

Xu, Y. F. (2019). In-situ shear strength of compacted demolition waste. *Powder Technology*, 352, 7–15.

Yosri, A.; Azam, A.; Alanazi, F. K.; Alshehri, A. H.; demais autores. (2024). Shear strength and particle breakage of construction and demolition waste as a function of moisture state and compaction level: Insights for sustainable highway engineering. *PLOS ONE*, 19(3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298765

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/68

Avaliação da Permeabilidade de Solos Arenosos em Colunas de Percolação sob Diferentes Gradientes Hidráulicos

Letícia de Oliveira Demarques
Discente de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, demarques.leticia@estudante.ufjf.br

Marina Almeida Souza Nogueres
Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, nogueres.marina@estudante.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

Cátia de Paula Martins
Docente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

RESUMO: O crescimento populacional e a intensificação das atividades industriais e agrícolas têm ampliado os riscos de contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, tornando essencial a compreensão dos mecanismos de transporte de solutos em meios porosos. Nesse contexto, o presente estudo avaliou experimentalmente o comportamento hidráulico de um solo arenoso por meio de ensaios laboratoriais em colunas de percolação, com ênfase na determinação do coeficiente de permeabilidade sob diferentes gradientes hidráulicos e na análise do uso do azul de metileno como traçador. A metodologia incluiu caracterização granulométrica do material, montagem de colunas de percolação em acrílico operando sob regime de carga constante e realização de ensaios utilizando água destilada e solução corante, permitindo a estimativa do coeficiente de permeabilidade e a interpretação dos processos de transporte predominantes. Os resultados indicaram predominância das frações areia média (50,3%) e areia grossa (41,5%), com massa específica aparente de 1,5 g/cm³, compatível com solos pouco a medianamente compactados. Os coeficientes de permeabilidade obtidos variaram entre 0,0133 cm/s e 0,0088 cm/s para água destilada e entre 0,0133 cm/s e 0,0114 cm/s para a solução de azul de metileno, situando-se na faixa típica de areias médias a grossas. A comparação entre os fluidos percolantes mostrou ausência de variações significativas na ordem de grandeza do parâmetro, confirmando a hipótese de predominância do controle estrutural do meio poroso no escoamento. Os resultados demonstram ainda a adequação do azul de metileno como traçador em ensaios de percolação e evidenciam o potencial da metodologia como ferramenta experimental e didática aplicada ao estudo do transporte de solutos em Geotecnia Ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação, Solo arenoso, Permeabilidade, Colunas de percolação, Transporte de contaminantes.

ABSTRACT: Population growth and the intensification of industrial and agricultural activities have increased the risks of soil and surface and groundwater contamination, making it essential to understand the mechanisms of solute transport in porous media. In this context, the present study experimentally evaluated the hydraulic behavior of a sandy soil through laboratory tests in percolation columns, with emphasis on determining the permeability coefficient under different hydraulic gradients and analyzing the use of methylene blue as a tracer. The methodology included granulometric characterization of the material, assembly of acrylic percolation columns operating under constant head conditions, and tests using distilled water and dye solution, allowing the estimation of the permeability coefficient and the interpretation of the predominant transport processes. The results indicated a predominance of medium sand (50.3%) and coarse sand (41.5%) fractions, with an apparent specific gravity of 1.5 g/cm³, consistent with slightly to moderately compacted soils. The permeability coefficients obtained ranged from 0.0133 cm/s to 0.0088 cm/s for distilled water and from 0.0133 cm/s to 0.0114 cm/s for the methylene blue solution, falling within the typical range for medium to coarse sands. The comparison between the percolating fluids showed no significant variations in the order of magnitude of the

parameter, confirming the hypothesis of the predominance of structural control of the porous medium in the flow. The results also demonstrate the suitability of methylene blue as a tracer in percolation tests and highlight the potential of the methodology as an experimental and didactic tool applied to the study of solute transport in Environmental Geotechnics.

KEYWORDS: Contamination, Sandy soil, Permeability, Percolation columns, Transport of contaminants.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional associado à expansão das atividades industriais, agrícolas e urbanas tem intensificado a geração de resíduos e a disposição inadequada de substâncias potencialmente contaminantes no ambiente natural, aumentando a vulnerabilidade dos solos e das águas subterrâneas. Boscov (2008) aponta que as fontes de poluição podem ocorrer de forma direta, por meio da aplicação de fertilizantes, pesticidas e lodos de estações de tratamento de esgoto, ou indireta, como resultado da deposição atmosférica de poluentes oriundos de atividades industriais e da disposição inadequada de resíduos sólidos. Nesse contexto, o solo desempenha papel fundamental na proteção ou na propagação da poluição ambiental, atuando simultaneamente como barreira natural e como meio transmissor de contaminantes, dependendo de suas características físicas, químicas e mineralógicas (Boscov, 2008; Silva et al., 2022; Shackelford, 2014).

Os solos constituem sistemas porosos cuja capacidade de retenção ou transmissão de contaminantes depende diretamente da estrutura do meio poroso, da granulometria, da porosidade e da permeabilidade, além das propriedades físico-químicas dos solutos transportados (Boscov, 2008; Chiossi, 2013). De acordo com Boscov (2008), entre os parâmetros hidráulicos do solo, o coeficiente de permeabilidade (k) exerce papel determinante na velocidade de deslocamento dos fluidos e das substâncias dissolvidas em subsuperfície. Em solos arenosos, caracterizados por elevada condutividade hidráulica e reduzida capacidade de adsorção, a migração de contaminantes tende a ocorrer de forma mais rápida quando comparada a solos mais finos, evidenciando a importância da caracterização hidráulica desses materiais na avaliação da vulnerabilidade ambiental (Mitchell; Soga, 2005; Fetter, 2001).

O transporte de contaminantes em meios porosos ocorre por diferentes mecanismos físicos e químicos, entre os quais se destacam a advecção, a dispersão hidrodinâmica, a difusão molecular e os processos de interação sólido-líquido, como adsorção e troca iônica (Boscov, 2008). Segundo Fetter (2001), em meios granulares, especialmente em solos arenosos com baixa superfície específica, a advecção constitui o principal mecanismo responsável pelo deslocamento de solutos ao longo do perfil do solo. Nessas condições, o escoamento da água em meios saturados pode ser descrito pela Lei de Darcy, segundo a qual a velocidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico aplicado, desde que mantidas condições de regime laminar (Pinto, 2006; Mitchell; Soga, 2005).

Ensaios laboratoriais em colunas de percolação constituem metodologia amplamente utilizada na investigação experimental dos processos de fluxo e transporte em meios porosos, permitindo a simulação controlada de condições hidráulicas e a observação direta do deslocamento de solutos ao longo do perfil do solo (Boscov, 2008). Entre os traçadores empregados nesses estudos, o azul de metileno destaca-se por sua elevada solubilidade em água e facilidade de visualização da frente de percolação, apresentando interação limitada com solos arenosos devido à sua baixa adsorção nesses materiais (Silva et al., 2022). Embora esses ensaios sejam relevantes para a compreensão dos mecanismos de transporte de contaminantes, ainda se observa a necessidade de investigações experimentais que avaliem o comportamento da permeabilidade em solos arenosos sob diferentes gradientes hidráulicos utilizando estruturas laboratoriais acessíveis, capazes de integrar análise hidráulica e observação dos processos advectivos e dispersivos em meio poroso saturado (Mitchell; Soga, 2005; Fetter, 2001; Boscov, 2008).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento da permeabilidade de solo arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos por meio de ensaios em colunas de percolação, utilizando água destilada e solução de azul de metileno como fluido percolante, com vistas à verificação da validade da Lei de Darcy em regime de escoamento saturado e à interpretação dos mecanismos de transporte predominantes. Parte-se da hipótese de que o coeficiente de permeabilidade permanece aproximadamente constante sob diferentes gradientes hidráulicos enquanto o escoamento se mantém laminar. Além disso, o trabalho busca contribuir para a compreensão experimental dos processos de

transporte em meios porosos e para o desenvolvimento de estrutura experimental de baixo custo com potencial aplicação didática no ensino de Geotecnia Ambiental.

2 METODOLOGIA

2.1 Pesquisa Bibliográfica

A etapa inicial do estudo consistiu na realização de pesquisa bibliográfica em livros didáticos, normas técnicas e trabalhos científicos previamente publicados, com o objetivo de fundamentar teoricamente os procedimentos experimentais adotados e orientar a interpretação dos resultados obtidos. Destacam-se como principais referências para a concepção, montagem e utilização das colunas de percolação os trabalhos desenvolvidos por Bernardes (2021) e Bernardes et al. (2022), que serviram como base metodológica para a execução dos ensaios apresentados neste estudo.

2.2 Coluna de Percolação

A coluna de percolação utilizada nos ensaios com água e solução de azul de metileno integra o conjunto experimental desenvolvido nos trabalhos de Bernardes (2021) e Bernardes et al. (2022). O equipamento é constituído por um corpo cilíndrico de acrílico transparente com 20 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, acoplado a uma base e a uma tampa metálicas, além de mangueiras de conexão com o frasco de Mariotte e o recipiente coletor. Na Figura 1 é possível identificar a disposição da coluna e do frasco de Mariotte em prateleiras.

Ressalta-se que esse arranjo permite simular condições de ensaio em permeâmetro de carga constante, possibilitando a análise do comportamento de percolação de fluidos em meio poroso saturado. Embora amplamente empregadas em pesquisas experimentais, colunas de percolação ainda apresentam limitações relacionadas à padronização construtiva e à reprodutibilidade dos resultados.

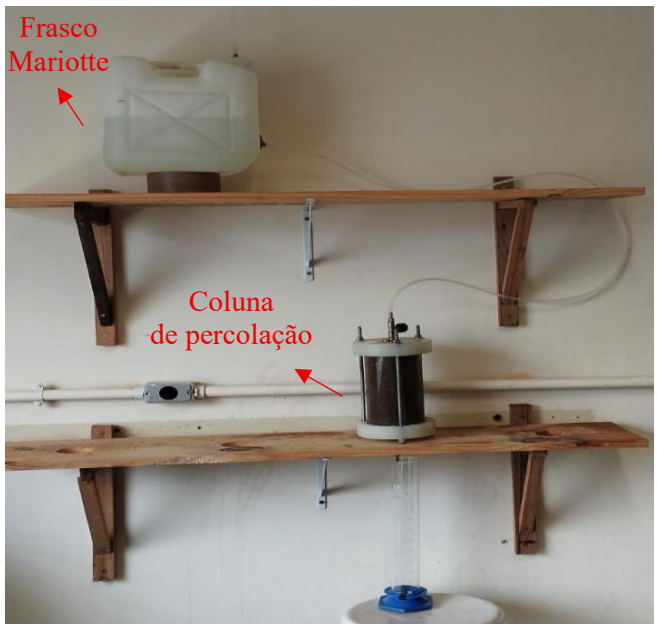


Figura 1. Disposição do frasco de Mariotte e da coluna de percolação utilizada nos testes experimentais
Fonte: Autor, 2026

2.3 Caracterização Física da Areia

A caracterização granulométrica da areia utilizada foi realizada por meio de ensaio de peneiramento conforme a ABNT NBR 7181, utilizando-se uma amostra de 1000 g previamente seca ao ar. Inicialmente, a

amostra foi submetida à peneira com abertura de 2,0 mm visando a separação de partículas com maior dimensão. Em seguida, o material passante foi submetido a um conjunto de peneiras com aberturas padronizadas, organizadas em ordem decrescente, sendo o conjunto submetido à agitação manual.

A massa específica aparente adotada para o preenchimento da coluna foi de 1,5 g/cm³, valor compatível com areias pouco a medianamente compactadas, indicando estrutura granular com índice de vazios relativamente elevado, conforme descrito por Pinto (2006). Essa condição é representativa de solos arenosos com maior potencial de permeabilidade.

2.4 Montagem Experimental da Coluna de Percolação

Inicialmente, foram realizados testes preliminares com as colunas disponíveis, sendo selecionada aquela que apresentou melhor desempenho quanto à estanqueidade e às conexões hidráulicas com o frasco de Mariotte e o recipiente coletor. Após a seleção, a coluna foi higienizada e preparada para montagem do ensaio.

Na sequência, foi inserido papel filtro na base da coluna, recortado conforme o diâmetro interno do tubo acrílico, com a finalidade de melhorar a distribuição do fluxo e evitar a mobilização de partículas. Posteriormente, a coluna foi preenchida manualmente com a areia previamente preparada, totalizando massa de 2,350 kg, para que tivesse a massa específica aparente de 1,5 g/cm². Após o preenchimento completo, foi posicionado novo papel filtro na parte superior do solo arenoso. Por fim, a coluna foi fechada e conectada ao sistema hidráulico para execução dos ensaios.

2.5 Testes

Com o sistema devidamente montado, foram realizados ensaios de percolação com água destilada e solução de azul de metileno, sob dois gradientes hidráulicos distintos. O gradiente hidráulico foi definido pela razão entre a carga hidráulica aplicada e o comprimento da coluna (20 cm). No primeiro ensaio com água, foi aplicado gradiente hidráulico de 2,075, correspondente à altura hidráulica constante de 41,5 cm. No segundo ensaio com água, o gradiente foi elevado para 3,350, correspondente à altura hidráulica de 67 cm.

Na sequência, foram realizados ensaios com solução de azul de metileno na concentração de 100 mg/L, preparada em laboratório com água destilada. O terceiro ensaio foi conduzido com gradiente hidráulico de 2,075 e o quarto com gradiente de 3,350, mantendo-se as mesmas condições experimentais anteriores. Todos os ensaios foram realizados com fluxo descendente e coluna saturada. Em razão do caráter exploratório do estudo, foi realizado apenas um ensaio por condição experimental, o que constitui uma limitação metodológica considerada na análise dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitiram caracterizar fisicamente o meio poroso e a partir dos ensaios em colunas de percolação avaliar o comportamento hidráulico, com ênfase na determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante sob diferentes gradientes hidráulicos. Inicialmente, são apresentados os aspectos relacionados à caracterização do solo, seguidos pelos resultados hidráulicos.

O Gráfico 1 mostra a curva granulométrica obtida para o material utilizada no ensaio de percolação. A análise granulométrica indicou predominância de partículas de areia, com maior ocorrência da fração média (50,3%), seguida pela grossa (41,5%) e fina (8,2%). De acordo com a classificação granulométrica estabelecida pela ABNT NBR, trata-se de um solo predominantemente arenoso.

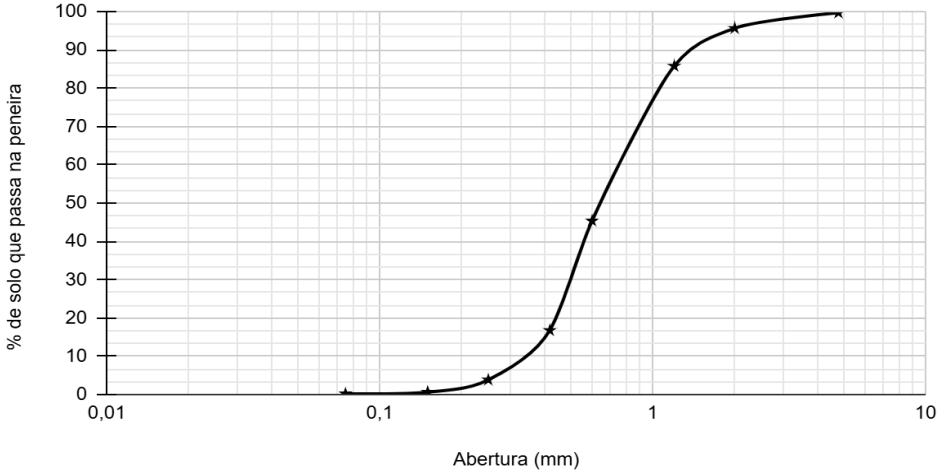


Gráfico 1. Análise Granulométrica.
Fonte: Elaborada pelas autoras.

No que confere ao comportamento do coeficiente de permeabilidade da areia sob diferentes gradientes hidráulicos, sendo os fluidos percolantes a água e a solução de azul de metileno, tem-se os resultados mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de coeficientes de permeabilidade, gradientes hidráulicos e vazão.

Teste	Altura da carga hidráulica constante (h)	Gradiente hidráulico (i)	Permeabilidade ($k_{médio}$)	Vazão (Q)
	(cm)	-	(cm/s)	(cm^3/s)
Água	41,5	2,075	0,0133	2,166
	67	3,350	0,0088	2,333
Azul de metileno	41,5	2,075	0,0133	2,166
	67	3,350	0,0114	3,000

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, os coeficientes de permeabilidade determinados para a areia à percolação de água sob os gradientes hidráulicos de 2,075 e 3,350 foram iguais a 0,0133 cm/s e 0,0088 cm/s, respectivamente. Os resultados obtidos situam-se na faixa típica de areias médias a grossas pouco compactadas (10^{-1} e 10^{-4} cm/s), conforme valores clássicos apresentados pela literatura Geotécnica (Pinto, 2006, Craig, 2007). Além disso, esses resultados confirmam a elevada condutividade hidráulica característica de solos arenosos com baixo teor de finos, apontam que os gradientes hidráulicos adotados não influenciaram na ordem de grandeza do parâmetro obtido, e ainda mostram ser compatíveis com o comportamento esperado para ensaios em permeâmetro de carga constante sob regime de escoamento laminar, onde é válida a aplicação da Lei de Darcy.

É importante destacar que a massa específica aparente adotada para a areia com vistas à realização dos testes experimentais foi de 1,5 g/cm^3. O valor adotado é compatível com valores típicos de areias pouco a medianamente compactadas, indicando estrutura granular com índice de vazios relativamente elevado (Pinto, 2006). Sendo assim, o comportamento relatado é coerente com o coeficiente de permeabilidade determinado experimentalmente, característico de solos arenosos com baixa fração de finos e elevado índice de vazios, resultando numa elevada condutividade hidráulica.

Em relação ao fluido percolante intitulado ‘traçador’, solução de azul de metileno, os coeficientes de permeabilidade determinados sob os gradientes hidráulicos de 2,075 e 3,350 foram iguais a 0,0133 cm/s e 0,0114 cm/s, respectivamente. Observa-se que os valores obtidos mantiveram-se na mesma ordem de grandeza daqueles determinados com o uso de água destilada, indicando que a substituição do fluido percolante não provocou alterações significativas no comportamento hidráulico do solo arenoso estudado. Esse resultado é

compatível com o esperado para solos granulares com baixo teor de finos, nos quais o coeficiente de permeabilidade depende predominantemente da granulometria, da estrutura e do índice de vazios do meio poroso, sendo pouco influenciado por interações físico-químicas entre o fluido e as partículas sólidas (Pinto, 2006; Craig, 2007, Mitchell; Soga, 2005). Além disso, em solos arenosos, caracterizados por baixa superfície específica, a adsorção do azul de metileno tende a ser reduzida, o que limita efeitos de retenção do corante e de colmatação dos poros, favorecendo o predomínio do transporte por advecção (Mitchell; Soga, 2005).

Na Tabela 1 observa-se ainda uma pequena variação entre os coeficientes de permeabilidade determinados com água destilada (0,0088 cm/s) e com a solução de azul de metileno (0,114 cm/s) sob o maior gradiente hidráulico (3,350), o que pode ser atribuída a pequenas variações experimentais decorrentes da heterogeneidade natural do meio granular, bem como as diferenças nas propriedades físico-químicas do fluido percolante, especialmente viscosidade e densidade, que influenciam diretamente a mobilidade do escoamento em meios porosos saturados conforme previsto pela Lei de Darcy (Freeze; Cherry, 1979; Pinto, 2006). Ademais, em ensaios realizados em colunas de percolação laboratoriais, pequenas variações na acomodação das partículas e na eliminação de bolhas de ar aprisionadas na matriz podem influenciar a condutividade hidráulica aparente, sem representar alteração significativa do comportamento do solo em estudado.

Por fim, o aumento do gradiente hidráulico não resultou em alterações significativas na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, indicando que o regime de escoamento permaneceu predominantemente laminar nas condições experimentais analisadas. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam a adequação do azul de metileno como traçador em ensaios laboratoriais de percolação em solos arenosos, permitindo a observação visual dos processos de transporte sem interferir de maneira relevante no comportamento hidráulico do meio poroso, além de reforçar o potencial de aplicação da metodologia experimental como ferramenta didática no ensino de Geotecnia Ambiental.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais são apresentadas tendo em vista o objetivo de avaliar experimentalmente o comportamento da permeabilidade de um solo arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos em ensaios de colunas de percolação com água e azul de metileno, permitindo discutir a validade da Lei de Darcy e a influência do fluido percolante no comportamento hidráulico do meio poroso.

Os ensaios em colunas de percolação permitiram determinar o coeficiente de permeabilidade de um solo predominantemente arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos, apresentando valores compatíveis com aqueles reportados na literatura para areias médias a grossas pouco compactadas. Os resultados obtidos indicaram comportamento hidráulico coerente com a estrutura granular do material e com a predominância do regime de escoamento laminar nas condições experimentais analisadas.

A comparação entre os ensaios realizados com água destilada e com solução de azul de metileno mostrou que a substituição do fluido percolante não resultou em alterações significativas na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, confirmando a hipótese inicialmente estabelecida e evidenciando que o comportamento hidráulico do solo foi controlado principalmente pelas características físicas do meio poroso.

Por fim, os resultados demonstraram a viabilidade do uso do azul de metileno como traçador em ensaios laboratoriais com solos arenosos, sem interferência relevante na condutividade hidráulica do material. Nesse sentido, a metodologia empregada apresenta potencial de aplicação em estudos experimentais de transporte de solutos em meios porosos, além de contribuir como recurso didático no ensino de processos de fluxo em Geotecnia Ambiental

Como continuidade desta investigação experimental, pretende-se realizar ensaios em colunas de percolação com solos contendo diferentes teores de fração fina e distintos índices de compactação, bem como com o uso de outras soluções traçadoras representativas de cenários ambientais reais, como soluções salinas e metais potencialmente tóxicos. Essas abordagens poderão ampliar a compreensão dos mecanismos de transporte de solutos em meios porosos saturados e fortalecer a aplicação das colunas de percolação como ferramenta experimental e didática no contexto da Geotecnia Ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo apoio institucional à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502: *Rochas e solos – Terminologia*. Rio de Janeiro:ABNT, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro:ABNT, 2025.

Bernardes, R. R. (2022) *Montagem e teste laboratorial de coluna para ensaio de transporte de contaminantes em solos*. In: COBRAMSEG, Campinas.

Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos.

Craig, R. F. (2007) *Mecânica dos solos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Chiossi, N. (2013) Geologia de engenharia, 3ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, p. 391–392.

Fetter, C. W. (2001) *Applied hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979) Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005) Fundamentals of soil behavior. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons.

Pinto, C. S. (2006) Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Shackelford, C. D. (2014) The geoenvironmental engineering: principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2014.

Silva, T. F.; Souza, A. C.; Oliveira, M. R.; et al. (2022) *Transporte de contaminantes em solos e implicações ambientais*. Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(2).

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/69

Avaliação da Resistência Mecânica de um Lodo de Estação de Tratamento de Água com Adição de Cinzas da Casca do Café

Fernanda Vescovi Gonçalves
Pós-Doutoranda, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil. vescovi@ita.br

Paulo Scarano Hemsi
Professor Associado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil. paulosh@ita.br

João Claudio Bassan de Moraes
Professor Adjunto, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil. jbmoraes@ita.br

RESUMO: Esse trabalho apresenta resultados de resistência à compressão simples de misturas do resíduo lodo de estação de tratamento de água (LETA) da estação de tratamento do DCTA em São José dos Campos (SP) com cinzas da casca do café (CCC). Mesmo após desaguamento na estação (por exemplo, por meio de bolsas geossintéticas), o LETA apresenta baixo teor de sólidos, consistência muito mole, elevada compressibilidade e baixíssima resistência ao cisalhamento, sendo, assim, um resíduo de difícil aproveitamento geotécnico. As CCC apresentam uma composição com presença majoritária de carbonato de potássio (K_2CO_3), que permite antever a possibilidade da formação de cimentos ativados alcalinamente quando em contato com o LETA, com as CCC desempenhando o papel de fonte alcalina. Nesse trabalho, os ensaios de compressão simples foram complementados com ensaios mineralógicos de Difratometria de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para uma discussão de resultados levando em conta as possíveis alterações químicas verificadas no material. As misturas de LETA contendo 26 % em massa de CCC apresentaram aumentos significativos na resistência à compressão simples e no módulo de rigidez secante (entre 0 e 4 %), quando comparadas com corpos-de-prova do LETA puro, em mesmo teor de umidade e seguindo as mesmas condição de preparo e compactação. Os resultados obtidos indicaram uma melhoria promissora do comportamento mecânico do LETA pela adição das CCC e novas pesquisas encontram-se em desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: Aproveitamento de resíduo, Cimento álcali-ativado, Compressão Não Confinada, Cinzas, Lodo, Reúso.

ABSTRACT: This work presents results of unconfined compressive strength tests on mixtures of water treatment plant sludge (WTS) from the DCTA treatment plant in São José dos Campos (SP) with coffee husk ash (CHA). Even after dewatering at the plant (for example, using geosynthetic bags), WTS has a low solids content, very soft consistency, high compressibility, and very low shear strength, thus being a residue that is difficult to utilize geotechnically. The CHA has a composition with a major presence of potassium carbonate (K_2CO_3), which suggests the possibility of the formation of alkali-activated cements when in contact with WTS, with CHA acting as an alkaline source. In this work, unconfined compression tests were complemented by mineralogical tests using X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM), for a discussion of results taking into account the possible chemical alterations observed in the material. WTS mixtures containing 26% by mass of CHA showed significant increases in unconfined compressive strength and secant modulus of rigidity (between 0 and 4%), when compared to specimens of pure WTS, with the same moisture content and following the same preparation and compaction conditions. The results obtained indicated a promising improvement in the mechanical behavior of WTS by the addition of CHA, and further research is underway.

KEYWORDS: Waste utilization, Alkali-activated cement, Unconfined compression, Ash, Sludge, Reuse.

1 INTRODUÇÃO

O lodo de estação de tratamento de água (LETA) consiste do resíduo formado pela lavagem dos decantadores e filtros nas estações de tratamento de água em ciclo completo. No baixo teor de sólidos, elevado teor de umidade, em que se encontra, mesmo após alguma forma de desaguamento realizado na estação (por exemplo, em bolsas geossintéticas ou por meio de centrifugação), o LETA apresenta uma consistência muito mole, elevada compressibilidade, baixíssima resistência ao cisalhamento e difícil trabalhabilidade como material com potencial para uso geotécnico (Silva e Hemsi, 2018; 2021). Apenas no Estado de São Paulo, são geradas diariamente cerca de 190 t de LETA em base seca, no tratamento de mais de 119 mil litros de água por segundo (SABESP, 2024). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) proíbe a destinação do LETA em corpos hídricos; entretanto, até hoje, a maior parte do lodo é descartada irregularmente dessa forma, e sem prévio tratamento (IBGE, 2017). Desse modo, é importante investigar e determinar opções viáveis para o aproveitamento do LETA, o que se alinha com os pilares da Política Nacional de Resíduos Sólidos, tendo em vista o aproveitamento do resíduo, a prevenção de sua destinação inadequada no meio ambiente, e a economia de recursos naturais na execução de futuras obras de infraestrutura. Nesse sentido, vem sendo vislumbradas as aplicações geotécnicas de utilização do resíduo melhorado para a construção de aterros compactados em obras, e também para constituir camadas de cobertura diária em aterros sanitários. Este trabalho apresenta resultados iniciais de pesquisa que vem sendo realizada para avaliar, em escala laboratorial, o melhoramento do LETA condicionado por meio da mistura com CCC. As cinzas da casca do café (CCC) apresentam em sua composição a presença majoritária de K_2CO_3 (Lima et.al, 2022), o que permite antever a possibilidade da formação de cimentos ativados alcalinamente, com as CCC desempenhando o papel de fonte alcalina, quando em contato com os componentes do LETA. O Brasil é o maior produtor de café do mundo, tendo produzido em 2025 aproximadamente 56,5 milhões de sacas de 60 kg (CONAB, 2025). Estima-se que cerca de 50 % desta massa total produzida corresponda às cascas (IPEA, 2012).

Assim, dada a dificuldade em aproveitar o LETA em grande escala e minimizar o impacto ambiental do seu descarte incorreto, acrescido da possibilidade das CCC atuarem como fonte alcalina, este estudo busca avaliar a resposta ao ensaio de compressão simples do LETA em mistura com as CCC. A utilização de CCC para o melhoramento do LETA é inovadora, havendo trabalhos em que as CCC foram adicionadas a solos argilosos expansivos para o melhoramento de suas propriedades (Munirwan et al., 2022, 2023).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água

As amostras de LETA utilizadas nesse trabalho foram coletadas do decantador da estação de tratamento de água do DCTA, em São José dos Campos (SP), nos meses de setembro e novembro de 2024 e maio de 2025. Para as coletas, a água de lavagem acumulada no decantador foi bombeada para um bolsão geossintético (geotêxtil não tecido), com capacidade de 2500 litros (Figura 1a), no qual foi realizado o desaguamento por peso próprio ao longo de 7 dias. Posteriormente, o LETA foi trazido para o Laboratório de Geotecnia Ambiental do ITA, seco ao ar, e seco em estufa a 100°C por 24 horas (Figura 1b). Em seguida à secagem em estufa, o material foi destorroado em moinho de bolas por 90 minutos, e passado através da peneira nº 200, resultando em um material pulvurulento fino (Figura 1c).



Figura 1. Preparação do LETA: a) bolsa geossintética para desaguamento; b) material após 10 dias em desaguamento (lodo de setembro de 2024); c) material destorroado e homogeneizado.

2.1.2 Cinzas da Casca do Café

As cascas do café tipo arábica (Figura 2a) foram obtidas junto à fazenda Laje, localizada em Três Pontas (MG). A calcinação da casca do café foi realizada em laboratório, seguindo a técnica descrita por Lima et al. (2023) para obtenção de cinzas com elevado teor de K_2O na forma de carbonatos, principalmente K_2CO_3, e também apresentando alto teor de solubilidade. Assim, realizou-se uma primeira queima a 400°C por 1h30min (Figura 2b) e uma segunda queima, esta com maior duração, por 18h a 700°C (Figura 2c). As cinzas da casca do café (CCC) foram resfriadas até temperatura ambiente, homogeneizadas em um moinho vibratório por 5 minutos e armazenadas em pote hermeticamente fechado. Para o melhor desempenho como ativador alcalino, as cinzas produzidas devem apresentar alto teor de K_2O na forma de K_2CO_3, baixo teor de matéria orgânica, e elevados solubilidade e pH em água.

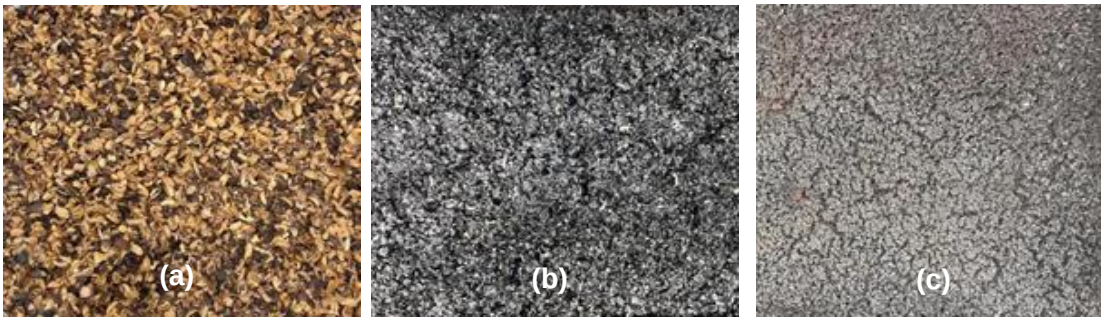


Figura 2. Preparação das CCC: a) cascas de café “in natura”; b) cinzas geradas por queima a 400°C; c) cinzas geradas por queima prolongada a 700°C.

2.2 Métodos Experimentais

2.2.1 Massa Específica dos Grãos e Limites de Atterberg do LETA

Para a amostra de LETA utilizada, foram realizados os ensaios de massa específica dos grãos e dos Limites de Plasticidade (LP) e de Liquidez (LL), conforme as normas ABNT NBR-6508, NBR-7180 e NBR-6459, respectivamente. Ao todo, foram realizados quatro ensaios com picnômetro para a massa específica dos grãos do LETA, e seis ensaios para LL e LP, de cada tipo, com a determinação das médias aritméticas.

Nos ensaios de LL e LP, os ensaios 1 a 3 foram realizados com o material seco em estufa e destorroado conforme descrito no item 2.1.1. Já nos ensaios 4 a 6, utilizou-se reuso do material, trabalhando com LETA reaproveitado dos ensaios anteriores, após nova secagem (estufa a 110°C por 24 horas) e moagem. A determinação dos limites com o LETA reaproveitado visou permitir verificar se haveria alteração nos resultados dos limites de consistência em função da secagem adicional do material.

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado também para as CCC, conforme a NBR-6508, porém em picnômetros utilizando álcool etílico, 95% extra neutro, uma vez que as CCC são parcialmente solúveis em água.

2.2.2 Caracterização Mineralógica

Para caracterização mineralógica, as amostras foram homogeneizadas em acetona e filtradas, com auxílio de uma bomba de vácuo. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa a 60ºC por 24h. Foram realizados os ensaios de Difração de raios X (DRX), Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios X (EDS). O ensaio de DRX foi realizado por meio do Difratômetro Panalytical Empyrean, com intervalo de ângulo de Bragg de 10-70°, radiação CU-Ka, passo de 0,01° e 3 s/passo. Os espectros de FTIR foram obtidos com um Espectrofotômetro no Infravermelho (FTIR) PerkinElmer Frontier, na faixa da 4000-400 cm^{-1} e resolução espectral de 1 cm^{-1}. Os ensaios de MEV/EDS foram realizados com o modelo de microscópio Vega-3 LMU TESCAN com detector Oxford EDS 133 eV, em amostras obtidas após o ensaio por compressão simples. Para o ensaio, as amostras receberam uma camada de parafina nas laterais e no fundo, para evitar fraturas durante o ensaio. O EDS foi realizado em triplicata e os dados apresentados são a média destas análises.

2.2.3 Preparo dos Corpos-de-Prova de LETA e da Mistura LETA-CCC

Utilizando o material LETA puro (L0) e as CCC, foi preparada uma mistura do LETA contendo 26 % (em massa seca) de CCC (L26) a ser testada no laboratório. A massa exata de CCC foi adicionada a uma porção do material LETA seco, de tal modo que o teor de CCC na mistura resultasse igual a 26 %. O teor de umidade gravimétrico da mistura LETA-CCC foi então ajustado a 42 %, mediante a adição de água. A mistura foi homogeneizada manualmente. Esse teor de umidade foi exatamente o mesmo utilizado nos testes do material L0.

Corpos-de-prova foram compactados em moldes de PVC bipartidos de pequenas dimensões, nas dimensões de 3,5 cm de diâmetro por 7,5 cm de altura. A compactação foi feita através de quedas repetidas de um pequeno soquete manual, com altura de queda, número de golpes por camada e número de camadas padronizados, reproduzindo a energia de Proctor Normal. Os corpos-de-prova foram produzidos em quadruplicata para L0 e L26. Cada corpo-de-prova foi deixado descansar por 24 horas dentro do molde de PVC, embalado em plástico filme, em câmara úmida com umidade controlada em 60 %.

2.2.4 Ensaios de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados, nos corpos-de-prova descritos acima, utilizando prensa (Durham Geo) com velocidade de deslocamento entre 0,5 e 1,0 mm/min. Os valores da força axial nos corpos-de-prova foram medidos utilizando célula de carga tipo S (Solotest) com capacidade de 100 kgf com indicador digital, e os deslocamentos verticais impostos foram medidos com relógio comparador digital (Mitutoyo) com curso de até 13 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Massa Específica dos Grãos e Limites de Atterberg do LETA

Os quatro ensaios de determinação da massa específica dos grãos do LETA resultaram nos valores de 2,42, 2,45, 2,40 e 2,44 g/cm^3, com um valor médio de 2,44 g/cm^3. Esse valor é inferior ao de solos em geral, mas se encontra dentro de faixas reportadas na literatura para diferentes LETAs, como 2,05 a 2,94 g/cm^3 (Huat et al., 2009) e 2,40 a 2,61 g/cm^3 (Watanabe et al., 2011). Com relação aos limites de consistência, nas amostras 1 a 3 (apenas uma secagem do LETA) foram obtidos os valores: LL = 62%, 61%,

58% (média = 60 %) e LP = 50%, 44%, 39% (média = 44 %). Já para as amostras 4 a 6 (duas secagens do material), resultaram: LL = 58%, 60%, 58% (média = 59 %) e LP = 48%, 54%, 45% (média = 49 %). Assim, os valores de IP (índice de plasticidade) resultaram, nas médias, 16% e 10%. Os resultados indicam que a secagem adicional não alterou o valor de LL, mas afetou os valores de LP e, portanto, de IP. Diante desses resultados, verifica-se que o LETA testado é constituído por finos de plasticidade moderada (7 < IP < 17), indicando um comportamento siltoso, em contraste com outros lodos, de comportamento argiloso com alta plasticidade, como o LETA de Cubatão (SP) (LL=239%, IP=158%) testado por Montalvan (2016). Para a massa específica dos grãos das CCC, foi obtido o valor médio de 2,55 g/cm^3.

3.2 Parâmetros dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova compactados com os materiais L0 e L26 (em quadruplicata para cada material) apresentaram, imediatamente após a compactação, massas específicas úmidas (em média) de 1,57 g/cm^3 (L0) e 1,65 g/cm^3 (L26). Sendo o teor de umidade gravimétrico de 42%, resultam as massas específicas secas (em média) de 1,11 g/cm^3 (L0) e 1,16 g/cm^3 (L26). Para os corpos-de-prova L0, sendo a massa específica dos grãos 2,44 g/cm^3, resultam os valores médios de índice de vazios e grau de saturação de 1,20 e 85%, respectivamente.

Para os corpos-de-prova do material L26, admite-se, a massa específica dos grãos 2,47 g/cm^3, que resulta da média ponderada entre as massas específicas dos grãos obtidas para o LETA e para as CCC. O índice de vazios e grau de saturação dos corpos-de-prova L26 foram avaliados, portanto, como 1,14 e 91%, respectivamente. Com base nos parâmetros acima, é possível afirmar que a preparação dos corpos-de-prova dos materiais L0 e L26 conduziu a condições semelhantes em termos de índice de vazios de moldagem e grau de saturação. Assim, a comparação das resistências à compressão permitirá avaliar o incremento de resistência devido ao efeito das reações químicas no material L26.

3.3 Caracterização Mineralógica

A Figura 3 mostra os difratogramas obtidos nos ensaios por DRX realizados nas amostras de CCC, L0 (LETA puro) e L26 (mistura LETA-CCC).

O difratograma das CCC revela a presença de carbonato de potássio (K) (PDF cards 01-073-0470 e 01-070-0965), tendo sido também identificados quartzo (SiO_2, PDF 01-649) e fases cristalinas de Fairchildite (C) ($K_2Ca(CO_3)$ (PDF 03-504); um resultado semelhante foi apresentado por Lima et al. (2022).

Já para os materiais L0 e L26, os difratogramas apresentam majoritariamente a presença de fases cristalinas de silicato de alumínio hidratado (A-S) (PDF 01-0527), identificando, também, óxido de silício (PDF 01-082-1395). Observa-se que os picos de difração para o silicato de alumínio hidratado são largos sugerindo um material pouco cristalino. Além disso, os picos característicos da CCC (principalmente K_2CO_3) não são identificados no difratograma S26, sugerindo uma reação rápida entre as espécies alcalinas na CCC e os aluminosilicatos presentes no lodo nas primeiras 24 h de cura, levando a síntese bem sucedida do ligante.

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio FTIR para as CCC, L0 e L26. Para as CCC, nota-se que as bandas principais estão centradas em 1361 cm^{-1} e 1443 cm^{-1} (modo de vibração O-C-O), que podem ser atribuídas aos modos vibracionais dos compostos K_2CO_3. Resultado semelhante foi apresentado por Lima et al. (2023). Observa-se que nas amostras L26, tais bandas desaparecem, sugerindo o consumo total dos precursores de cinzas, para formação de compostos novos e estáveis, corroborando os resultados do DRX. Além disso, bandas em 1404 cm^{-1} e em 1531 cm^{-1} foram identificadas na amostra S26. Picos em 1531 cm^{-1} possivelmente estão relacionados com a formação de fases de carbonatos, como fases pouco cristalinas de carboaluminato de potássio hidratado (Fernandez-Carrasco et al., 2005), resultantes de reação química entre o LETA, rico em alumínio, e os carbonatos fornecidos pela CCC. Um novo pico em 864 cm^{-1}, característico de grupos de carbonatos, foi identificado exclusivamente na amostra S26, reforçando ainda mais o desenvolvimento de novos carbonatos nas misturas LETA-CCC.

O ensaio de MEV/EDS (Figura 5) revela alteração na estrutura do material L26, com diminuição visível dos poros na estrutura. Há maior aglomeração dos grãos tornando o material mais denso e contínuo.

Os resultados do mapa de EDS para L0 apresentam uma relação, em peso molecular, de Al/Si, Fe/Si e K/Si igual a 1,15, 0,47 e 0,02, respectivamente. Para o EDS do L26, a relação Al/Si, Fe/Si e K/Si resulta igual a 1,31, 0,55 e 0,84, respectivamente, indicando reação das CCC com o LETA, alterando o material.

3.4 Ensaios de Compressão Simples

A Figura 6 apresenta as curvas tensão-deformação no ensaio de compressão não-confinada, para os corpos-de-prova dos materiais L0 e L26 (em quadruplicada para cada material).

Os valores de tensão de compressão máxima obtidos para os corpos-de-prova L0 apresentaram média e desvio padrão de 54,9 kPa e 6,1 kPa, respectivamente, para deformação axial, em média, de 8 %. Já para o material L26, a tensão de compressão máxima atingiu, em média, 126,0 kPa, com desvio padrão de 11,1 kPa, para uma deformação axial, em média, também de 8%. Assim, os dados obtidos nos ensaios de compressão simples mostraram que houve um aumento médio de 2,3 vezes na resistência à compressão, por efeito da adição de CCC no LETA, com 24 horas de tempo de descanso, e mantendo-se iguais os teores de umidade gravimétricos e para índices de vazios de moldagem semelhantes.

O módulo de rigidez (tensão/deformação) secante (entre 0% e 4% de deformação axial) dos corpos-de-prova L26 resultou, em média, 4,5 vezes maior que aquele dos ensaios com LETA puro (L0).

Os resultados obtidos, de aumento da resistência e da rigidez do LETA por adição das CCC, revela o melhoramento sofrido pelo material LETA, que reflete as alterações microestruturais observadas, as quais revelaram reação das CCC com o LETA.

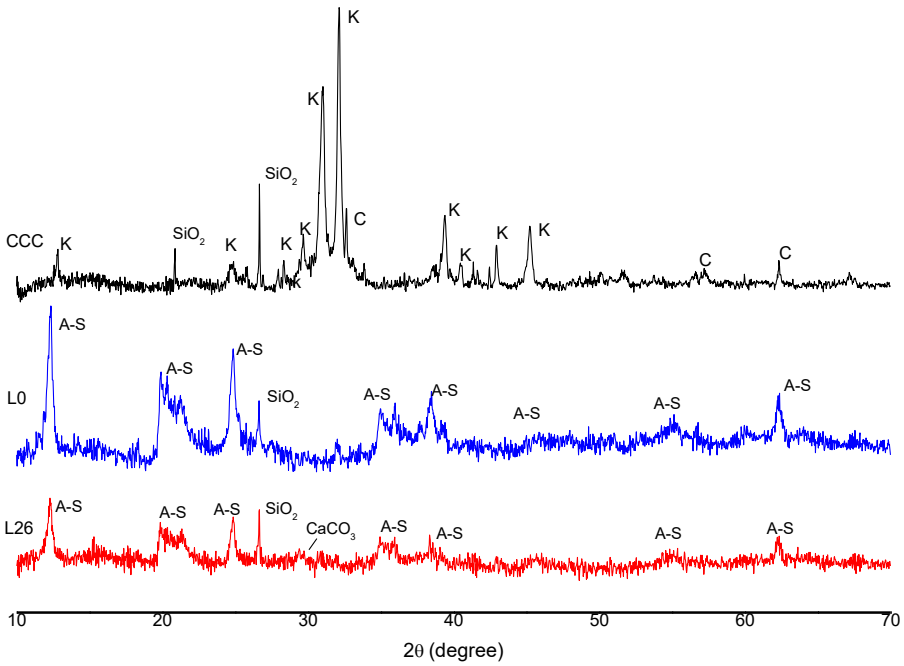


Figura 3. Difratogramas DRX para as amostras de CCC, L0 e L26.

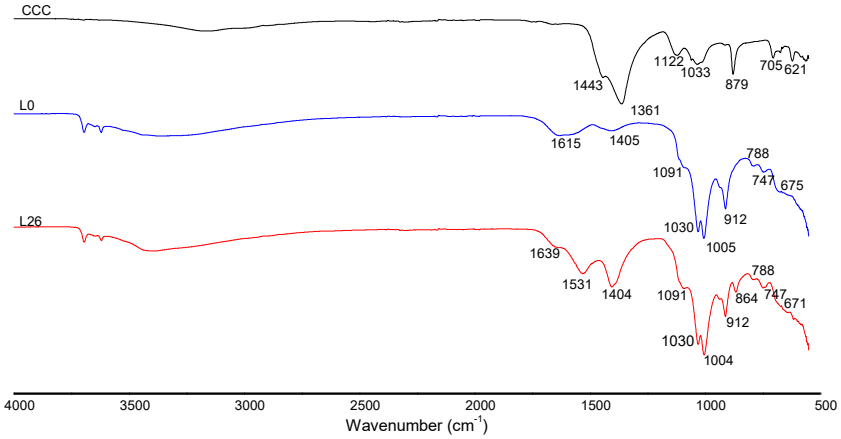


Figura 4. FTIR para as amostras de CCC, L0 e L26.

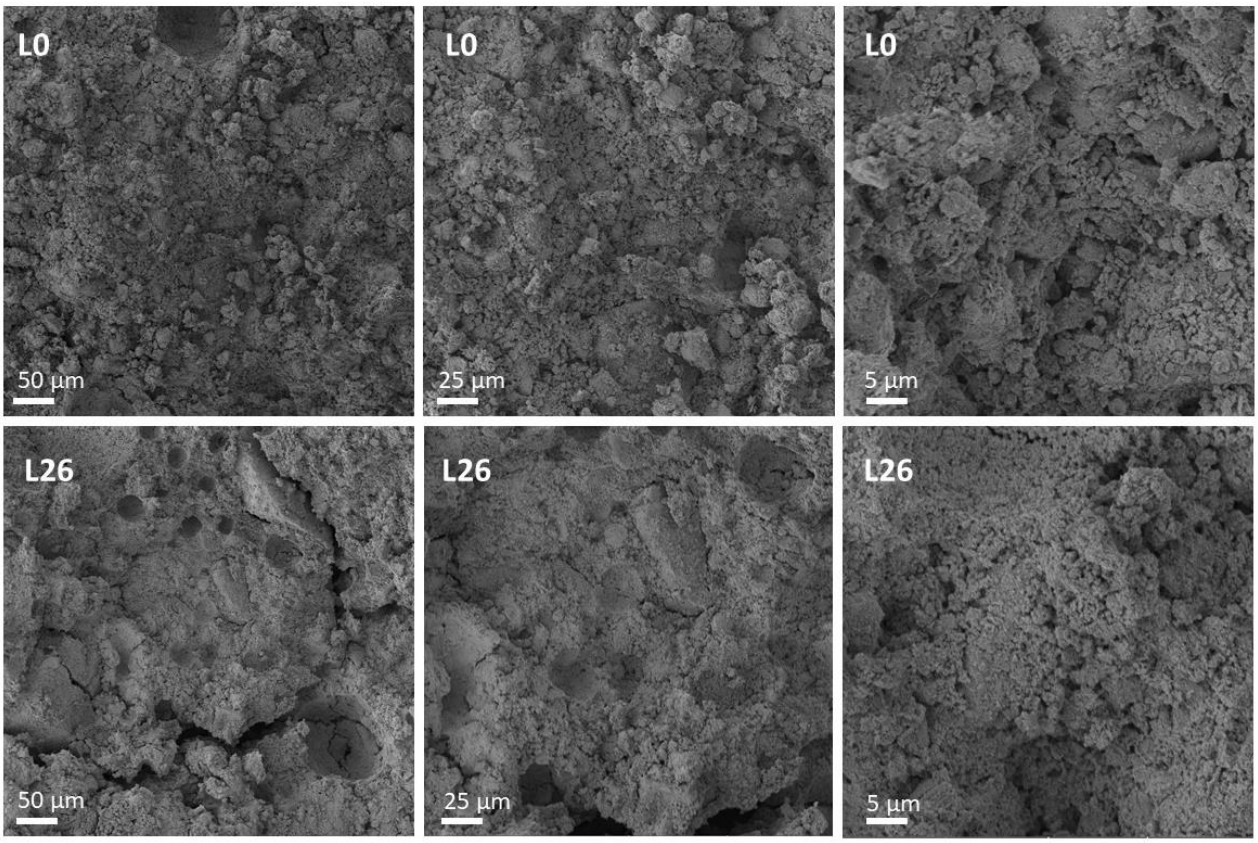


Figura 5. Imagens de MEV para as amostras de L0 e L26.

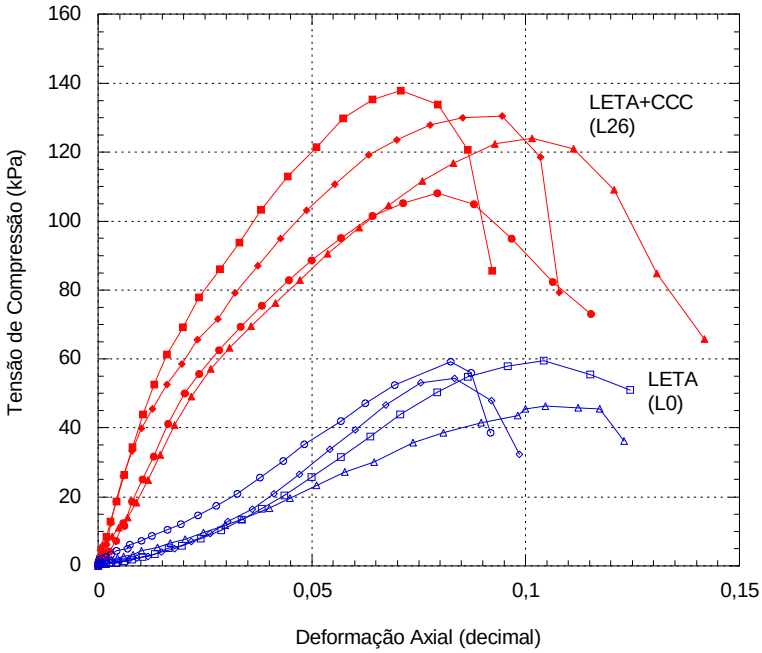


Figura 6. Curvas Tensão de Compressão x Deformação Axial para L0 de L26.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu verificar que os corpos-de-prova da mistura de LETA com 26 % (massa seca) de CCC apresentaram resistência à compressão simples 2,3 vezes superior, e módulo de rigidez secante (entre 0 e 4 %) 4,5 vezes superior aos corpos-de-prova do LETA puro, em mesmo teor de umidade e com índices de vazios de moldagem semelhantes. Assim, o ensaio de compressão simples mostrou a melhoria das características mecânicas do LETA por adição das CCC. Nos ensaios mineralógicos, identificou-se a presença majoritária de silicato de alumínio hidratado para o LETA. Notou-se reação completa das cinzas com o LETA, fases amorfas e formação de carboaluminatos, tornando o material L26 mais denso que o LETA puro. Os resultados obtidos indicaram uma melhoria promissora do comportamento mecânico do LETA pela adição das CCC, o que tem ensejado a realização de novas pesquisas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Laboratórios de Plasmas e Processos e de Materiais e Processos do ITA por permitirem o uso de equipamentos, à ETA do DCTA por permitir a coleta de amostras, ao Eng. Matheus Müller pelo apoio na coleta e desaguamento, e ao técnico de laboratório do ITA Marcos Vinícius de Oliveira Rezende.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm- Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 1984, 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez, Rio de Janeiro, 2020, 6p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade, Rio de Janeiro, 1988, 3p.

BRASIL (2010). Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da União: Brasília.

CONAB (2025). Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, v. 12(4), Brasília, p. 1-59.

Fernández-Carrasco, L., Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Vázquez, T., Rius. J. (2005). Synthesis and crystal structure solution of potassium dawsonite: An intermediate compound in the alkaline hydrolysis of calcium aluminate cements. Cement and Concrete Research, 35(4): 641-646. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.018.

Huat, B., Prasad, A., Assadi, A., Kazemian, S. (2014). Geotechnics of organic soils and peat. CRC Press/Balkema, Londres, RU.

IBGE (2017). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: IBGE.

IPEA (2012) Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor Agrossilvo pastoril e Agroindústrias Associadas. https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/9dcf2c51-8f78-4d61-8f2e-1fb66a89ca28/content

Lima, F.S.; Gomes, T.C.F.; Moraes, J.C.B. (2023). Effect of coffee husk ash as alkaline activator in one-part alkali-activated binder, Construction and Building Materials, 362, 129799.

Lima, F.S.; Gomes, T.C.F.; Moraes, J.C.B. (2022). Novel one-part alkali-activated binder produced with coffee husk ash. Materials Letters, 313, 131733.

Montalvan, E.L.T. (2016). Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Munirwan, R.P., Mohd Taib, A., Taha, M.R., Abd Rahman, N., Munirwansyah, M. (2023). A sustainable solution of coffee husk waste disposal for soil stabilization. In Proceedings of the 9th International Congress on Environmental Geotechnics, 25-28 June, Chania, Grécia.

Munirwan, R. P., Mohd Taib, A., Taha, M. R., Abd Rahman, N., Munirwansyah, M. (2022). Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review. Physics and Chemistry of the Earth, 128 (Setembro). https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103252

SABESP (2024). De onde vem a água que bebemos - Tratamento de água. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/o-que-fazemos/fornecimento-agua/tratamento-agua. Acesso: 16/07/2024.

Silva, A.S., Hemsi, P.S. (2018). Efeito do teor de sólidos na resistência ao cisalhamento de um lodo de ETA visando seu uso em cobertura diária de aterros sanitários. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Brasil.

Silva, A.S., Hemsi, P.S. (2021). Adição de cal a um lodo de ETA visando melhoria da resistência para o uso em cobertura diária de aterros sanitários. 1° Encontro Nacional de Lodo de Estação de Tratamento de Água - LETA 2021, Volume 1.

Watanabe, Y., Komine, H., Yasuhara, K., Murakami, S. (2011). Batch Leaching Test Focusing on Clod Size of Drinking Water Sludge and Applications to Long-term Prediction Using Column Leaching Test. In: Geo-Frontiers Congress, 13-16 de Março, Dallas, Texas, EUA.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/70

Avaliação de Diferentes Melhoramentos no Desenvolvimento de *Zea mays* e nas Propriedades de um Solo Contaminado

Jacqueline Zanin Lima
Professora Doutora, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, jacqueline.zanin.lima@usp.br

Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues
Professora Associada, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, valguima@usp.br

RESUMO: Esta pesquisa avaliou os efeitos da adição de turfa, composto e biocarvão, na remediação de um solo contaminado em laboratório com cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn). O experimento foi conduzido em vasos, utilizando o milho (*Zea mays* L.) como organismo-teste. Os resultados mostraram que o solo natural apresentou pH de 4,8, que diminuiu para 4,2 com a contaminação, mas os tratamentos com composto e biocarvão aumentaram o pH do solo. Quanto ao fracionamento químico, os melhoramentos alteraram a distribuição dos contaminantes entre as diferentes frações da extração sequencial, em comparação com o solo sem tratamento, embora os efeitos tenham variado de acordo com o material aplicado. O Pb apresentou maior associação à fração F2, o Zn se distribuiu predominantemente na fração F3, já o Cd concentrou-se na fração F1, considerada a mais biodisponível. Entre os materiais avaliados, o composto promoveu os maiores comprimentos para raiz e parte aérea do milho. Esses resultados evidenciam que a adição de turfa, composto e biocarvão em solos contaminados pode contribuir para a mitigação dos impactos ambientais e ecológicos. Recomenda-se, entretanto, a realização de estudos adicionais que avaliem os efeitos dos melhoramentos a longo prazo e em ensaios de campo, considerando diferentes tipos de solo e condições edafoclimáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Biocarvão, Composto, Extração sequencial, Metais potencialmente tóxicos, Remediação, Turfa.

ABSTRACT: This study evaluated the effects of adding peat, compost, and biochar on the remediation of a soil artificially contaminated in the laboratory with cadmium (Cd), lead (Pb), and zinc (Zn). The experiment was conducted in pots, using maize (*Zea mays* L.) as the test organism. The results showed that the natural soil had a pH of 4.8, which decreased to 4.2 following contamination, but treatments with compost and biochar increased the soil pH. Regarding chemical fractionation, the amendments altered the distribution of contaminants among the different sequential extraction fractions compared to the untreated soil, although the effects varied depending on the material applied. Pb was primarily associated with fraction F2, Zn was predominantly distributed in fraction F3, while Cd concentrated in fraction F1, considered the most bioavailable. Among the materials evaluated, compost promoted the greatest root and shoot lengths of maize. These results indicate that the addition of peat, compost, and biochar to contaminated soils can contribute to mitigating environmental and ecological impacts. However, further studies are recommended to evaluate the long-term effects of these amendments under field conditions, considering different soil types and edaphoclimatic conditions.

KEYWORDS: Biochar, Compost, Sequential extraction, Potentially toxic metals, Remediation, Peat.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população humana, aliado à intensificação da exploração dos recursos naturais e ao aumento na geração de resíduos, tem contribuído para um cenário de desafios sociais, econômicos e ecológicos. Nesse contexto, as Nações Unidas estabeleceram 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados até 2030 como um "plano para um futuro melhor e mais sustentável para todos". A recuperação da qualidade do solo e da água, incluindo a remediação de áreas contaminadas, é uma prática necessária para o alcance dos ODS.

Os metais potencialmente tóxicos (MPTs) estão entre os contaminantes que representam sérias ameaças à biota e à saúde humana devido à sua não degradabilidade e toxicidade (Kabata-Pendias, 2010). Assim, ao atingirem os seres vivos, podem se bioacumular ou biomagnificar causando efeitos deletérios no metabolismo de diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar. Podem inibir o crescimento dos vegetais, afetar adversamente os microrganismos, além de causar sérios problemas na saúde humana (Alloway, 2012).

Uma vez que esses contaminantes atingem o solo, este componente funciona como uma espécie de dreno e, ao mesmo tempo, de tampão natural, regulando a movimentação destes MPTs para a atmosfera, hidrosfera e biota (Kabata-Pendias, 2010). O comportamento dos metais nos solos é governado por reações competitivas de sorção e dessorção, em interfaces sólido-água dos minerais, matéria orgânica (Alloway, 2012) e microrganismos. O entendimento desses mecanismos de interação é crucial para se controlar e remediar efetivamente uma área contaminada.

Diante disso, diversas tecnologias, como o uso de agentes estabilizantes e sorventes derivados de resíduos orgânicos, oferecem métodos econômicos e ambientalmente amigáveis para reduzir a mobilidade dos MPTs. Contudo, devido à diversidade dos contaminantes e complexidade dos ambientes naturais, é necessário estudar novos materiais que sejam eficientes, ecologicamente corretos e, preferencialmente, de baixo custo. Os sorventes derivados de resíduos orgânicos têm demonstrado ser opções promissoras dentro dos princípios da economia circular, contribuindo para o descarte e o gerenciamento corretos de resíduos sólidos. No entanto, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) tem recebido pouca atenção até o momento.

Nesse contexto, a presente pesquisa foi embasada na possibilidade de utilização de materiais reativos dotados de baixo custo (turfa e composto orgânico) e rápida obtenção (biocarvão) visando minimizar os impactos da contaminação em solos. Assim, foram avaliados os efeitos da adição desses melhoramentos na remediação de um solo contaminado em laboratório com cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn), através de análises de extração sequencial e fitotoxicidade, utilizando o milho (*Zea mays* L.) como organismo-teste.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Solo e melhoramentos

As amostras de solo e turfa foram coletadas em locais não contaminados no município de Registro, Brasil. O composto e o biocarvão foram derivados da FORSU, coletada em restaurantes, incluindo resíduos frescos de cascas de ovos, frutas e vegetais, talos, sementes e caroços. A pilha de compostagem (~250 kg de resíduos triturados) permaneceu ao ar livre por 4 meses, sujeita, portanto, à incidência de radiação solar, vento e precipitação. O biocarvão foi obtido por pirólise (SP Pesquisa e Tecnologia, Brasil), com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} durante os primeiros 30 min e 20°C min^{-1} até a temperatura alvo (500°C). Durante o processo, nitrogênio puro foi introduzido continuamente (1 L min^{-1}) para garantir um ambiente livre de oxigênio. Todas as amostras foram homogeneizadas, peneiradas (2,00 mm) e armazenadas em sacos de polipropileno. As propriedades físicas e químicas dos melhoramentos foram relatadas anteriormente (Lima et al., 2022a, 2022b) e as principais informações estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e química da turfa, composto e biocarvão.

Propriedade	Turfa (T)	Composto (C)	Biocarvão (B)
pH (H_2O)	4,2 ± 0.0	8,6 ± 0,1	10,6 ± 0,0
pH_{PCZ}	4,0 ± 0,0	7,1 ± 0,0	8,1 ± 0,0
Eh (mV)	+ 211,3 ± 2,6	+ 31,4 ± 8,2	- 139,0 ± 7,3
CE (mS cm^{-1})	0,087 ± 0,004	4,253 ± 0,115	13,488 ± 0,227
CTC ($cmol_c$ kg^{-1})	80,0 ± 8,5	92,0 ± 9,9	59,50 ± 0,71
ASE (m^2 g^{-1})	5,68	51,97	42,31
Cd (mg kg^{-1})	< LQ	< LQ	< LQ
Pb (mg kg^{-1})	11,54 ± 0,54	1,93 ± 0,77	1,35 ± 0,20
Zn (mg kg^{-1})	13,83 ± 0,42	134,75 ± 0,97	169,06 ± 8,87

Média ± desvio padrão (n = 3). PCZ: ponto de carga zero. Eh: potencial de oxido-redução. CE: condutividade elétrica. CTC: capacidade de troca catiônica. ASE: área superficial específica. LQ: limite de quantificação (mg kg^{-1}), sendo Cd (0,3), Pb (0,2) e Zn (2,0).

2.2 Experimento em vasos

O experimento em vasos foi conduzido com 100 g de solo contaminado em laboratório simultaneamente com três MPTs: Cd, Pb e Zn (100 mg kg^{-1}) e enriquecido com turfa, composto ou biocarvão em três diferentes taxas de adição (1%, 5% e 10%, m/m). As amostras foram identificadas pela primeira letra do tipo de melhoramento e pela taxa de adição. Por exemplo, "T5%" indica a amostra com 5% de turfa. Dois tratamentos controle foram incluídos: (i) solo não contaminado e não melhorado, identificado como "Solo", e (ii) solo contaminado e não melhorado, identificado como "Solo+M", onde M representa os metais, ou seja, Cd+Pb+Zn. O teor de umidade foi mantido em cerca de 70% da capacidade de campo, com a adição de água Milli-Q. O conteúdo dos vasos foi homogeneizado mensalmente e o ensaio teve duração de 8 meses. As coletas foram realizadas no início, na metade e ao final do experimento, sendo as amostras utilizadas para a determinação do pH, do teor de matéria orgânica e da disponibilidade de contaminantes através da extração sequencial.

2.2.1 Ensaios de pH e matéria orgânica

As medições de pH foram realizadas após uma hora de equilíbrio da mistura sólido/água Milli-Q, na proporção de 1/10 ($M_{sólido}/V_{solução}$), utilizando um pHmetro Digimed (modelo de eletrodo DME-CV1). A matéria orgânica foi determinada utilizando perda por ignição em mufla a 440°C (ABNT NBR 13600, 2022).

2.2.2 Extração sequencial (BCR)

A extração sequencial foi realizada com base na metodologia do *European Community Bureau of Reference* (BCR) (Rauret, 1998; Rauret et al., 1999). Este método é composto pelas seguintes etapas: frações trocáveis e fracamente retidas (F1); ligadas aos óxidos de Fe e Mn (F2); ligadas aos sulfetos e complexadas com a matéria orgânica (F3) e fração residual (F4). A Tabela 2 apresenta as condições experimentais partindo de 1,00 g de matriz sólida.

Tabela 2. Procedimentos de extração sequencial seguindo o método BCR (*Community Bureau of Reference*).

Fração	Extrator	Volume (mL)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Agitação
F1	CH_3COOH (0,11 M)	40	Ambiente	16	120 rpm
F2	NH_2OH (0,1 M), pH = 2,0 (HNO_3)	40	Ambiente	16	120 rpm
F3	H_2O_2 (30%)	10	Ambiente	1	Ocasional
			85 ± 5	1	Ocasional
	H_2O_2 (30%)	10	85 ± 5	1	Ocasional
	$NH_4CH_3CO_2$ (1 M), pH = 2,0 (HNO_3)	50	Ambiente	16	120 rpm
F4	HNO_3:HCl = 2:1 (v:v)	US EPA Método 3050B			

Temperatura ambiente: 23 ± 2°C. As frações incluem F1 (solúvel em ácido), F2 (redutível), F3 (oxidável) e F4 (residual).

2.2.3 Testes de crescimento inicial

O teste de emergência e crescimento inicial ocorreu no último mês do experimento em vasos e foi conduzido de acordo com a ABNT NBR ISO 11269-2:2014, empregando milho (*Zea mays* L.) como planta-teste. Cinco sementes foram plantadas em cada vaso, com tempo de crescimento de 24 dias. Ao final do ensaio, foram contadas as sementes germinadas e os comprimentos da parte aérea e das raízes foram medidos. Sementes com hipocótilos de pelo menos 2 mm foram definidas como sementes germinadas e a porcentagem de germinação (G %) foi calculada pela Equação 1:

$$G\ (\%) = \frac{Número\ total\ de\ sementes\ germinadas}{Número\ total\ de\ sementes\ plantadas}\ x\ 100 \qquad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos melhoramentos no pH e na matéria orgânica do solo

O solo natural apresentava um pH médio de 4,8, que diminuiu para 4,2 com a contaminação. Em relação a adição dos melhoramentos, a turfa praticamente não trouxe alterações no pH, mas o composto e o biocarvão produziram aumentos no pH, sendo maiores em função do aumento da taxa adicionada (Tabela 3). O maior valor de pH foi de 10,0 para o solo contendo 10% de biocarvão, como consequência do elevado pH deste material (10,6; Tabela 1).

Tabela 3. Variação do pH das amostras ao longo do experimento em vasos.

Amostra	Inicial	Intermediário	Final
T1%	4,1 ± 0,0	4,1 ± 0,0	4,3 ± 0,0
C1%	4,4 ± 0,1	4,7 ± 0,0	4,8 ± 0,0
B1%	5,0 ± 0,0	5,4 ± 0,0	5,4 ± 0,1
T5%	4,1 ± 0,0	4,1 ± 0,0	4,3 ± 0,1
C5%	5,7 ± 0,0	6,6 ± 0,0	7,0 ± 0,1
B5%	8,1 ± 0,0	9,1 ± 0,0	9,1 ± 0,0
T10%	3,9 ± 0,0	4,1 ± 0,0	4,2 ± 0,0
C10%	6,0 ± 0,0	7,3 ± 0,0	7,8 ± 0,1
B10%	9,8 ± 0,0	10,0 ± 0,0	10,0 ± 0,0
Solo+M	4,2 ± 0,0	4,2 ± 0,0	4,4 ± 0,1
Solo	4,6 ± 0,0	4,8 ± 0,0	4,8 ± 0,0

M: Cd+Pb+Zn.

Observa-se também que, ao longo do ensaio em vasos, as variações nos valores de pH foram sutis, principalmente comparando os tempos intermediário e final, visto que as amostras tendem a caminhar para uma condição de equilíbrio. As maiores variações foram observadas para o composto, que aumentou em 1,3 e 1,8 unidades para as adições de 5% e 10%, respectivamente. Isso provavelmente se deve à maior degradação do material, uma vez que sua estabilidade é menor em comparação com os outros melhoramentos. Embora a porcentagem de matéria orgânica tenha aumentado com o incremento da taxa de adição nos três melhoramentos, de modo geral, o composto apresentou os maiores valores (Tabela 4).

Tabela 4. Variação da matéria orgânica das amostras ao longo do experimento em vasos.

Amostra	Inicial (g kg^{-1})	Final (g kg^{-1})
T1%	40,93 ± 4,63	39,66 ± 1,56
C1%	45,26 ± 3,51	41,01 ± 0,50
B1%	43,50 ± 1,57	41,24 ± 0,69
T5%	68,57 ± 1,13	56,81 ± 1,25
C5%	101,80 ± 3,08	58,46 ± 3,34
B5%	68,32 ± 2,24	60,91 ± 0,51
T10%	97,00 ± 3,47	81,88 ± 2,13
C10%	160,52 ± 3,25	89,55 ± 2,73
B10%	116,12 ± 3,40	96,53 ± 2,45
Solo	37,51 ± 1,57	36,94 ± 0,48

M: Cd+Pb+Zn.

3.2 Efeito dos melhoramentos na disponibilidade dos metais no solo

A extração sequencial tem sido amplamente aplicada para avaliar a mobilidade dos contaminantes, sendo que as frações F1, F2, F3 e F4 apresentam disponibilidade decrescente nessa ordem. De modo geral, os resultados da extração sequencial revelaram distintas distribuições entre as frações para cada MPT (Fig. 1).

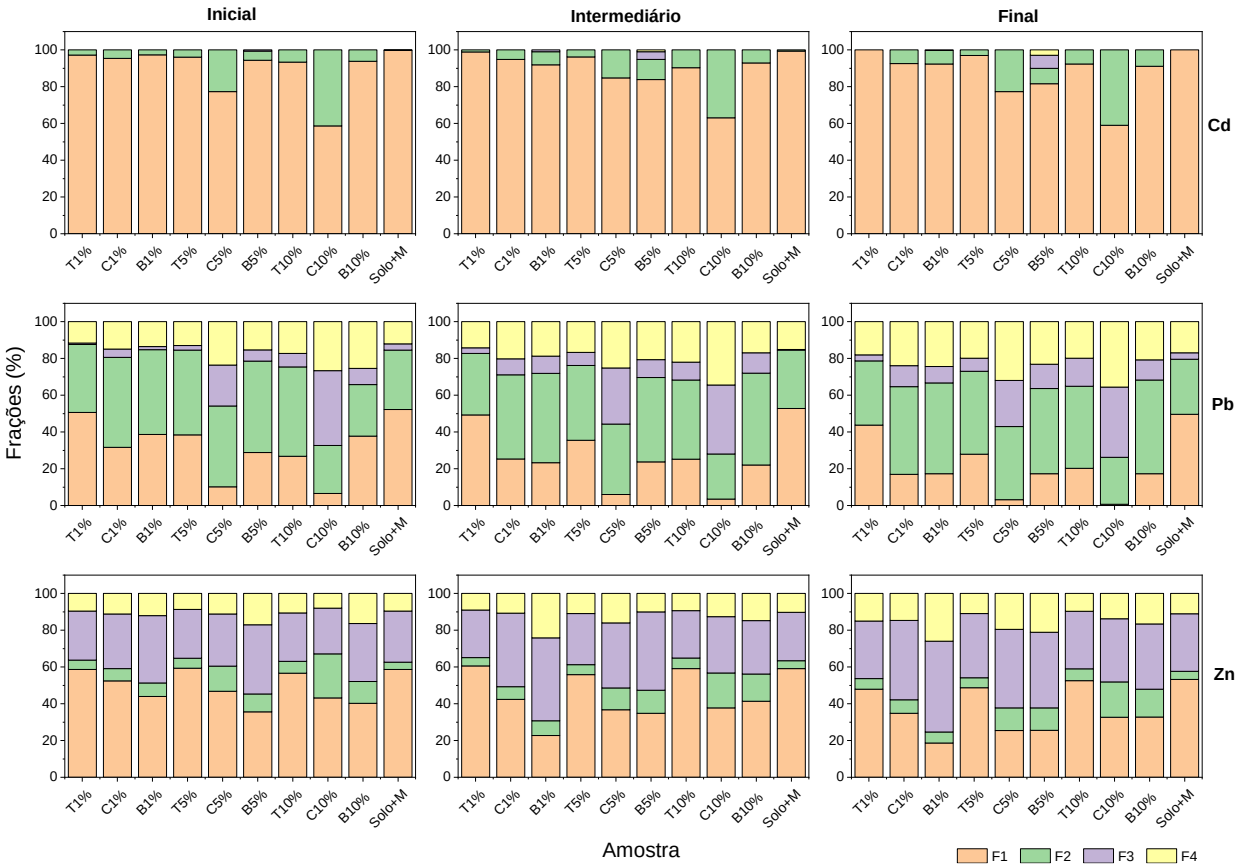


Figura 1. Extração sequencial de Cd, Pb e Zn no solo contaminado tratado com turfa (T), composto (C) e biocarvão (B) e em solo contaminado não tratado ("Solo+M", sendo M: Cd+Pb+Zn), no início, meio e fim do experimento em vasos.

O Cd se mostrou predominantemente associado à fração F1 (mais móvel). No solo sem melhoramento, 99,8% da concentração de Cd estava ligada a essa fração. Embora a adição dos melhoramentos tenha reduzido essa fração, os menores valores observados foram de 77,3% e 59,0% para C5% e C10%, respectivamente. Esse comportamento é particularmente preocupante, uma vez que o Cd é um elemento altamente tóxico mesmo em baixas concentrações, reforçando a necessidade de cautela quanto aos seus potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Em solos não contaminados, as concentrações médias desse elemento variam entre 0,07 e 1,1 mg kg^{-1}, sendo sua migração vertical no perfil do solo mais comum do que a acumulação superficial, especialmente em regiões de clima úmido. Assim, concentrações elevadas no horizonte superficial tendem a indicar contaminação (Kabata-Pendias, 2010). Comparando os diferentes melhoramentos, o composto apresentou os maiores efeitos na redução da disponibilidade de Cd. Observou-se que a fração F1 diminuiu com o aumento da taxa de adição e, em contrapartida, houve aumento da fração F2.

O Pb esteve majoritariamente associado à fração F2 (óxidos de Fe e Mn). As exceções foram a turfa com adição de 1%, que apresentou uma distribuição muito semelhante à do solo não tratado, e o tratamento com composto a 10%, no qual foram observadas porcentagens próximas entre as frações F3 e F4. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da fração F3 estar associada à matéria orgânica. De acordo com Kabata-Pendias (2010), o Pb é um dos MPTs com menor mobilidade no solo, sendo sua dinâmica fortemente influenciada pela formação de complexos estáveis com a matéria orgânica. Nesse sentido, o tratamento C10%, que apresentou o maior teor de matéria orgânica (160,52 g kg^{-1}, Tabela 4), favoreceu a redistribuição do Pb para frações menos móveis. Para fins de comparação, o solo não tratado apresentou 30,0% do Pb associado à fração F2. Além disso, enquanto a fração F1 representou 49,6% no solo não tratado, esse valor foi reduzido para apenas 0,7% no C10%, ao final do experimento.

O Zn esteve associado predominantemente à fração F3, ligada aos sulfetos e à complexação com a matéria orgânica, nas amostras tratadas com composto e biocarvão, enquanto nas amostras com turfa, a fração principal foi a F1. Em condições naturais, o Zn tende a se acumular no horizonte superficial do solo em função

da sua sorção à matéria orgânica (Kabata-Pendias, 2010). Ademais, a soma das frações F3 e F4 representa a proporção do contaminante com menor disponibilidade, e o Zn apresentou, de modo geral, os maiores valores para essa soma quando comparado ao Cd e ao Pb. Nos solos tratados, esses valores variaram de 41,0% (T10%) a 75,4% (B1%), enquanto no solo não tratado corresponderam a 42,3%.

Em situações de contaminação real, múltiplos contaminantes tendem a coexistir, de forma semelhante ao observado no presente estudo. A presença simultânea de diferentes contaminantes catiônicos pode promover a competição por sítios de troca nas superfícies dos melhoramentos, resultando na redução do potencial de retenção desses elementos em sistemas multicontaminados. Estudos anteriores indicam que, de modo geral, a ordem de afinidade desses metais pelos melhoramentos é Pb > Cd ≈ Zn (Lima et al., 2023). De forma semelhante, biocarvões derivados de diferentes matérias-primas, como palha de colza, palha de trigo, palha de *Miscanthus* e madeira, apresentaram a ordem Pb > Cd > Zn (Soria et al., 2020). Ji et al. (2022) também relataram maior capacidade de sorção de Pb em comparação ao Cd, sendo que a competição entre esses dois metais inibiu severamente a sorção de Cd em biocarvões derivados de cogumelo orelha-de-pau. Os resultados de Raimondi (2019), utilizando turfa e composto de torta de filtro da cana-de-açúcar, também evidenciaram maior capacidade de sorção de Pb em relação ao Cd e ao Zn, cujos valores foram semelhantes entre si.

3.3 Efeito dos melhoramentos no crescimento inicial do milho

Todos os melhoramentos favoreceram a germinação das sementes do milho, em comparação ao solo contaminado sem melhoramento e também ao solo não contaminado, com exceção da amostra B10%, que apresentou germinação média de apenas 20% (Fig. 2a). O composto e o biocarvão se destacaram por promover o crescimento das plantas, tanto do sistema radicular quanto da parte aérea, em relação ao solo contaminado ("Solo+M") (Fig. 2b). No caso do composto, as taxas de adição de 5% e 10% contribuíram mais para o crescimento das plantas em comparação à taxa de 1%. Para o biocarvão, embora a taxa de 5% tenha promovido maior crescimento em relação à de 1%, a adição de 10% prejudicou inclusive a germinação das sementes (Fig. 2a).

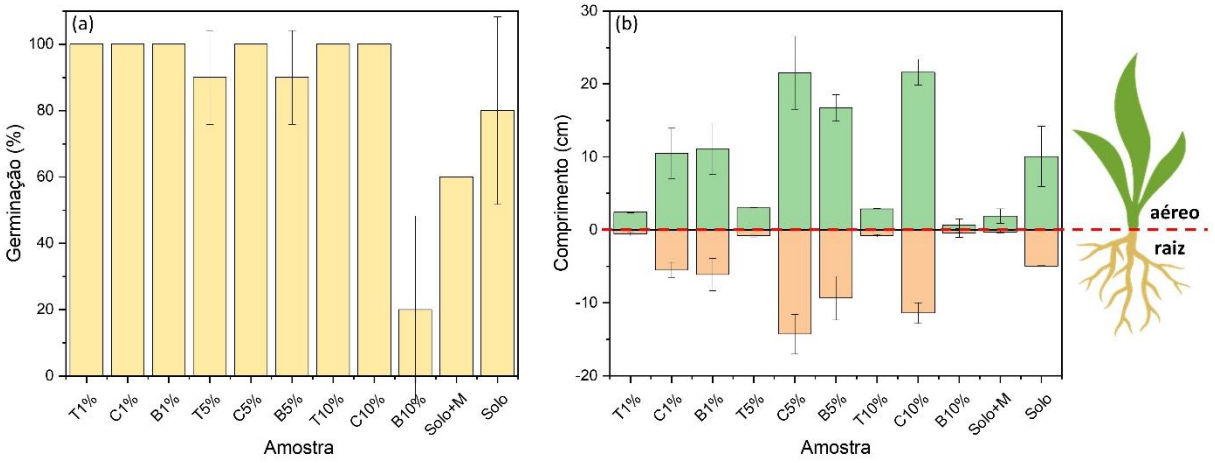


Figura 2. Efeito dos melhoramentos na germinação (a) e no crescimento da parte aérea e raiz do milho (*Z. mays*) (b).

Vale ressaltar que as amostras C5%, B5% e B10% apresentaram crescimento superior ao observado no solo não contaminado, evidenciando que os melhoramentos podem superar as limitações do solo original. De fato, trata-se de um solo ácido (pH 4,8; Tabela 3), com baixo teor de nutrientes e matéria orgânica (37,51 g kg^{-1}; Tabela 4), condições nas quais a incorporação de composto ou biocarvão favorece a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de retenção de água, resultando em maior desenvolvimento da planta.

Estudos anteriores também documentaram a melhoria do crescimento do milho e de outras plantas com a adição de diferentes melhoramentos. Saqib Rashid et al. (2018) relataram que a aplicação de biocarvão e de composto, individualmente ou combinado, a uma taxa de 2%, promoveu aumento do crescimento radicular e da parte aérea do milho cultivado em solo multicontaminado (contendo Pb, Zn, Cr, Cu e Ni), impulsionando significativamente a produção de biomassa. Lima et al. (2023) verificaram que a adição de 1% de BC500 a

solos contaminados com escória de fundição (Cd, Pb, Zn, As, Cu, Cr e Ni) resultou em maior comprimento radicular e da parte aérea no milho. Ren et al. (2020) mostraram que adições crescentes de biocarvão (até 4%) aumentaram a biomassa seca aérea da mostarda (*Brassica juncea*) cultivada em solos contaminados com Cd, Pb, Zn e As, provenientes de fundição e mineração. De forma semelhante, Teodoro et al. (2020) demonstraram que a adição de biocarvão co-compostado melhorou o crescimento e o desenvolvimento de plantas, aumentando a produção de clorofila total e carotenoides em *Lolium perenne*. Esses efeitos positivos podem ser atribuídos à melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, ao aumento da disponibilidade de nutrientes e ao favorecimento das atividades enzimáticas proporcionadas pelos melhoramentos.

Diferentemente da maioria dos melhoramentos orgânicos do solo, como composto e turfa, que são facilmente decompostos, a natureza recalcitrante do biocarvão confere maior estabilidade e, portanto, pode estender seus benefícios por longo período (Basak et al., 2022). Contudo, os resultados desta pesquisa mostraram que a maior adição de biocarvão (10%), prejudicou a germinação e o crescimento do milho. Resultado similar foi observado por Jun et al. (2020), que estudaram o crescimento em campo do girassol (*Helianthus annuus* L.) em solo contaminado com Cd, Pb, Zn e As. Os autores relataram que a adição de 2,5% e 5% de biocarvão promoveu o crescimento e aumentou significativamente a biomassa das plantas, enquanto a aplicação de 10% foi excessiva, resultando na inibição do crescimento e na redução da biomassa.

Ademais, altas taxas de biocarvão aplicadas em solos argilosos podem reduzir a água disponível, aumentar a probabilidade de excesso de salinidade e elevar o pH (principalmente em solos alcalinos), o que pode levar à precipitação de nutrientes e à redução da fertilidade. Além disso, efeitos adversos sobre a reprodução, o crescimento e a integridade do DNA de invertebrados já foram relatados, assim como alterações no microbioma do solo, incluindo mudanças na proporção de fungos e bactérias (Brtnicky et al., 2021).

Outras espécies vegetais precisam ser avaliadas em pesquisas futuras utilizando os mesmos materiais deste estudo, mas considerando outros contaminantes e cenários a longo prazo, incluindo múltiplos ciclos de cultivo, para avaliar a persistência dos benefícios sobre o crescimento vegetal e a mobilidade dos MPTs. Além disso, estudos que integrem a avaliação de solos com diferentes texturas, pHs e condições climáticas poderiam fornecer diretrizes mais precisas para otimizar a aplicação de melhoramentos em casos de contaminação real, minimizando efeitos adversos e maximizando a recuperação da qualidade do solo e a segurança ambiental.

4 CONCLUSÃO

A adição de melhoramentos em solo contaminado com Cd, Pb e Zn promoveu alterações na disponibilidade dos contaminantes e no crescimento do milho. O composto e o biocarvão se destacaram por reduzir a fração mais móvel do Cd e favorecer a redistribuição de Pb e Zn para formas menos disponíveis, refletindo em maior retenção de metais no solo e menor risco ambiental. Entretanto, altas taxas de biocarvão (10%) mostraram efeitos adversos, prejudicando a germinação e o crescimento das plantas, possivelmente devido a alterações na disponibilidade de água, salinidade e pH do solo. Comparativamente, a turfa apresentou menor efeito sobre o crescimento, mantendo o metal em frações mais móveis. Esses resultados indicam que o tipo de melhoramento e a taxa aplicada são fatores críticos para maximizar os benefícios do tratamento de solos contaminados. O estudo evidencia a necessidade de avaliações integradas de solos, plantas e microbiota para otimizar estratégias de remediação, garantindo segurança ambiental e produtividade agrícola sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (n° processo: 2017/16961-0) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 310989/2020-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). NBR ISO 11269-2. *Qualidade do solo – Determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre*. Parte 2: Efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 13600. *Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C*. Rio de Janeiro.

Alloway, B. J. (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3ª ed. Springer Science & Business Media.

Basak, B. B., Sarkar, B., Saha, A., Sarkar, A., Mandal, S., Biswas, J. K., ... Bolan, N. S. (2022). Revamping highly weathered soils in the tropics with biochar application: What we know and what is needed. *Science of the Total Environment*, 822, 153461.

Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., … Pecina V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of the Total Environment* 796, 148756.

Ji, Y., Zheng, N., An, Q., Sun, S., Wang, S., Li, X., ... Zhang, W. (2022). The effect of carbonization temperature on the capacity and mechanisms of Cd (II)-Pb (II) mix-ions adsorption by wood ear mushroom sticks derived biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113646.

Jun L., Wei H., Aili M, Juan N., Hongyan X., Jingsong H., Yunhua Z., Cuiying P. (2020). Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil using sunflower: a field experiment. *Environmental Research*, 109886.

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*, 4rd ed. CRC Press LLC, Boca Raton.

Lima, J. Z., da Silva, E. F., Patinha, C., Durães, N., Vieira, E. M., Rodrigues, V. G. S. (2022a). Sorption of arsenic by composts and biochars derived from the organic fraction of municipal solid wastes: Kinetic, isotherm and oral bioaccessibility study. *Environmental Research*, 204, 111988.

Lima, J. Z., da Silva, E. F., Patinha, C., Rodrigues, V. G. S. (2022b). Sorption and post-sorption performances of Cd, Pb and Zn onto peat, compost and biochar. *Journal of Environmental Management*, 321, 115968.

Lima, J. Z., Nauerth, I. M. R., da Silva, E. F., Pejon, O. J., Rodrigues, V. G. S. (2023). Competitive sorption and desorption of cadmium, lead, and zinc onto peat, compost, and biochar. *Journal of Environmental Management*, 344, 118515.

Raimondi, I.M. (2019). *Turfa, composto de torta de cana-de-açúcar e zeólitas como sorventes de Pb, Cd e Zn: Equilíbrio em lote, cinética, dessorção e bioacessibilidade*. Tese (Doutorado) – EESC, USP, São Carlos.

Rauret, G. (1998). Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment. *Talanta* 46, 449-455.

Rauret, G., López-Sánchez, J.F., Sahuquillo A., Rubio R., Davidson C., Ure A., Quevauniller P. (1999). Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring* 1(1), 57-61.

Ren, C., Guo, D., Liu, X., Li, R., Zhang, Z. (2020). Performance of the emerging biochar on the stabilization of potentially toxic metals in smelter-and mining-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(35), 43428-43438.

Saqib Rashid M., Liu G., Yousaf B., Song Y., Ahmed R., … Cheema A.I. (2022). Efficacy of rice husk biochar and compost amendments on the translocation, bioavailability, and heavy metals speciation in contaminated soil: role of free radical production in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Cleaner Production* 330, 129805.

Soria, R.I., Rolfe, S.A., Betancourth, M.P., Thornton, S.F. (2020). The relationship between properties of plant-based biochars and sorption of Cd (II), Pb (II) and Zn (II) in soil model systems. *Heliyon*, 6(11).

Teodoro, M., Trakal, L., Gallagher, B. N., Šimek, P., Soudek, P., Pohořelý, M., ... Mohan, D. (2020). Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal contaminated soil. *Chemosphere*, 242, 125255.

US EPA - US Environmental Protection Agency. (1996). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*, vol. 2. US EPA, Washington, DC, USA. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/71

Avaliação do Ciclo de Vida da Fibra de Coco como Reforço de Solo: Análise Ambiental e Geotécnica

Mayara Luana Santana Santos
MSc. em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, mayaraluana.ml@gmail.com

Mario Rene Rivera Osorto
MSc. em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, marior.riverao@outlook.com

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora Titular, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: A crescente demanda por soluções geotécnicas mais sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas aos métodos convencionais de melhoria de solos, como o uso de cimento, associados a elevado consumo energético e emissões significativas de gases de efeito estufa. Nesse contexto, as fibras naturais, em especial a fibra de coco, destacam-se como potencial material de reforço, já reconhecido por sua eficiência mecânica em solos. O presente estudo tem como objetivo avaliar, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), 1 m³ de solo reforçado com fibras de coco, 0,25% e 0,50% em relação ao peso seco do solo na estabilização de taludes, comparando-o ao solo puro e à solução convencional com 3% de cimento. A modelagem foi realizada no software OpenLCA, utilizando dados primários experimentais e dados secundários da base Ecoinvent 3.9.1, com aplicação do método ReCiPe 2016. Os resultados indicaram que a adição de fibras promove aumento moderado nos impactos ambientais em relação ao solo natural, até 21,3% no potencial de aquecimento global, porém significativamente inferior à solução com cimento, que apresentou incremento de aproximadamente 294,6%. Conclui-se que, quando atendidos os requisitos geotécnicos, o uso de fibras de coco configura alternativa ambientalmente favorável para melhoria de taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Fibras de coco, Reforço de solo, Geotecnia sustentável, Impactos ambientais.

ABSTRACT: The growing demand for more sustainable geotechnical solutions has driven the search for alternatives to conventional soil improvement methods, such as the use of cement, which are associated with high energy consumption and significant greenhouse gas emissions. In this context, natural fibers, particularly coconut fibers, stand out as a potential reinforcement material, already recognized for their mechanical efficiency in soils. This study aims to evaluate, through Life Cycle Assessment (LCA), 1 m³ of soil reinforced with coconut fibers, 0.25% and 0.50% by dry soil weight for slope stabilization, comparing it with natural soil and a conventional solution using 3% cement. The modeling was conducted using OpenLCA software, based on primary experimental data and secondary data from the Ecoinvent 3.9.1 database, applying the ReCiPe 2016 impact assessment method. The results indicated that the incorporation of fibers leads to a moderate increase in environmental impacts compared to natural soil, up to 21.3% in Global Warming Potential, yet significantly lower than the cement-based solution, which showed an increase of approximately 294.6%. It is concluded that, when geotechnical requirements are satisfied, the use of coconut fibers represents an environmentally favorable alternative for slope improvement.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment (LCA), Coconut fibers, Soil reinforcement, Sustainable geotechnics, Environmental impacts.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, observa-se um crescimento significativo da demanda por soluções geotécnicas mais sustentáveis, impulsionado tanto por restrições econômicas quanto pela necessidade de reduzir os impactos ambientais associados às obras de infraestrutura. Tradicionalmente, técnicas de estabilização e reforço de solos baseiam-se no emprego de materiais convencionais, como cimento, cal e geossintéticos, os quais, embora

eficientes do ponto de vista técnico, frequentemente apresentam elevado custo energético de produção, consumo intensivo de recursos naturais e significativa emissão de gases de efeito estufa (Mohammed *et al.*, 2023). Nesse cenário, torna-se cada vez mais relevante a busca por materiais alternativos que conciliem desempenho geotécnico adequado com menor impacto ambiental.

Dentre as alternativas investigadas, destaca-se o uso de fibras naturais como elementos de reforço de solos, abordagem que tem sido amplamente estudada em diferentes contextos geotécnicos (Santos, 2026). Conforme Imran *et al.*, (2024), entre os diversos tipos de fibras vegetais, a fibra de coco tem se destacado em estudos recentes em virtude de sua elevada resistência à tração, relativa durabilidade em meios naturais e significativa disponibilidade como subproduto agroindustrial. Investigações experimentais conduzidas por diferentes autores têm demonstrado que a incorporação de fibras de coco em solos pode resultar em ganhos expressivos de resistência à compressão simples e ao cisalhamento, bem como em melhorias no comportamento pós-pico, indicando a viabilidade técnica do material como elemento de reforço em aplicações como estabilização de taludes e reforço de solos moles (Santos & Casagrande, 2023).

Apesar desses avanços, observa-se que a maior parte das pesquisas se concentra predominantemente na avaliação do desempenho mecânico, permanecendo ainda limitada a compreensão acerca dos impactos ambientais associados à utilização dessas fibras em aplicações geotécnicas. Em outras palavras, embora a eficiência técnica já tenha sido amplamente demonstrada, ainda existe uma lacuna relevante quanto à real vantagem ambiental do uso de fibras naturais quando analisado sob uma perspectiva sistêmica, que considere todas as etapas envolvidas, desde a obtenção da matéria-prima até a fase de aplicação.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresenta-se como uma ferramenta metodológica particularmente adequada, uma vez que permite quantificar, de forma sistemática e padronizada, os impactos ambientais associados a produtos, processos ou sistemas ao longo de todo o seu ciclo de vida (Dervishaj & Gudmundsson, 2024).Trata-se de uma metodologia amplamente consolidada no meio científico e definida pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 da Organização Internacional de Normalização, adequadas para o mercado brasileiro, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo cada vez mais empregada como instrumento de apoio à tomada de decisão em projetos de engenharia e infraestrutura.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar a Avaliação do Ciclo de Vida do uso de fibras de coco como material de reforço de solo em um talude em comparação com uma solução de reforço de solo convencional, integrando a análise ambiental à avaliação geotécnica, de modo a contribuir para o avanço do conhecimento acerca da viabilidade técnica e ambiental dessa solução e fornecer subsídios para a adoção de práticas mais sustentáveis na engenharia geotécnica.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Solos Reforçados com Fibras Naturais

O emprego de técnicas de reforço é frequentemente adotado quando o solo disponível no local da obra não apresenta, em seu estado natural, as propriedades geotécnicas requeridas em projeto, tornando necessária a melhoria de determinadas características de resistência e deformabilidade. A incorporação de fibras aos solos, formando um material compósito, é uma prática conhecida, entretanto o aprofundamento científico sobre esse tema intensificou-se principalmente nas últimas décadas. Atualmente, a técnica tem sido aplicada em diferentes contextos da engenharia geotécnica, incluindo o reforço de solos moles, a estabilização de taludes, a execução de aterros e o aumento da estabilidade em estruturas de contenção, evidenciando sua versatilidade e potencial de aplicação.

No contexto brasileiro, a fibra de coco tem sido objeto de diversas investigações voltadas à avaliação de sua aplicabilidade como material de reforço de solos. Santos & Casagrande (2023), por exemplo, analisou o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos constituídos por solo argiloso reforçado com fibras de coco, com o objetivo de verificar o potencial de utilização desse material em obras geotécnicas. Os resultados obtidos indicaram que, mesmo após seis meses de envelhecimento natural, as fibras mantiveram sua contribuição para o reforço do solo, apresentando baixos níveis de degradação e desempenho satisfatório do ponto de vista mecânico.

2.1.1 Fibras naturais de coco

As fibras de coco verde são originárias do fruto do coqueiro, cultura amplamente difundida em regiões tropicais e subtropicais. Segundo a FAO (2023) o Brasil permanece entre os principais produtores mundiais: estimativas recentes indicam uma produção em torno de 1,8 a 2,1 milhões de toneladas de coco em 2022 e 2023, mantendo-se como um dos maiores produtores globais, com forte concentração da atividade na região Nordeste. A demanda crescente por água de coco e derivados tem impulsionado a expansão do cultivo, especialmente nos estados nordestinos, que respondem por mais de 70% da produção nacional em anos recentes, com destaque para Ceará, Bahia, Pernambuco e Sergipe.

Após o consumo da água de coco, a casca é considerada um subproduto e corresponde a aproximadamente 80 a 85% da massa do fruto, constituindo-se em uma biomassa lignocelulósica volumosa e de difícil disposição adequada. Estudos apontam que apenas uma fração ainda limitada desse resíduo é efetivamente reaproveitada em cadeias industriais (produção de fibras, substratos, energia e biocombustíveis), de modo que grande parte das cascas continua sendo descartada sem beneficiamento, apesar de seu reconhecido potencial energético e de uso em materiais (Cabral *et al.*, 2016).

As fibras extraídas das cascas de coco, portanto, são frequentemente tratadas como rejeito, mas apresentam elevado potencial tecnológico ainda pouco explorado em aplicações de engenharia, inclusive como reforço em matrizes cimentícias e em solos. Diversos trabalhos recentes, como de Santos & Casagrande (2023), indicam que as fibras de coco exibem boa resistência à tração, elevada tenacidade e desempenho mecânico satisfatório quando incorporadas a concretos e solos, com propriedades que dependem do comprimento, diâmetro e integridade superficial das fibras. Embora biodegradáveis, o alto teor de lignina confere a essas fibras uma durabilidade relativamente superior à de muitas outras fibras vegetais em meios naturais e cimentícios, o que reforça seu interesse como reforço de baixo custo, renovável e associado ao aproveitamento de um subproduto agroindustrial abundante.

2.2 Avaliação de Ciclo de Vida em Solos Reforçados com Fibras Naturais

No contexto de solos reforçados com fibras, a ACV permite comparar soluções convencionais, como estabilização com cal ou solo-cimento, com alternativas que empregam fibras naturais, considerando todas as etapas, desde a extração de matérias-primas até a disposição final. Estudos de ACV, como Merta *et al.,* (2018) aplicados a compósitos cimentícios e de concreto reforçados com fibras naturais mostra a redução de impactos como potencial de aquecimento global, demanda de energia fóssil e esgotamento de recursos quando há substituição parcial de reforços sintéticos por fibras de origem vegetal, ainda que existam *trade-offs* em categorias como eutrofização e ecotoxicidade associadas ao cultivo agrícola.

Embora a literatura de ACV focada especificamente em solos reforçados com fibras naturais ainda seja incipiente, resultados obtidos para compósitos cimentícios e estruturas reforçadas com fibras vegetais indicam tendências relevantes para a geotecnia. No estudo de Lopez-Arraiza *et al.,* (2025) foram realizadas avaliações de ciclo de vida com fibras naturais, como linho, mostram pegada ambiental inferior à de soluções convencionais, especialmente quando consideradas abordagens “berço ao-aoportão-portão” e cenários de aproveitamento de resíduos agroindustriais como fonte de fibra.

Transpondo essas evidências para o caso de solos reforçados, a utilização de fibras naturais oriundas de resíduos agroindustriais, como o coco, tende a apresentar vantagens ambientais relevantes frente a reforços convencionais, sobretudo quando a fibra é considerada resíduo de baixo valor. Ainda assim, lacunas importantes permanecem, como a necessidade de modelos que integrem, de forma acoplada, desempenho mecânico, durabilidade e impactos de ciclo de vida, bem como a padronização de inventários específicos para fibras naturais aplicadas em geotecnia.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do escopo

A ACV realizada neste estudo tem como objetivo quantificar os impactos ambientais associados ao uso de fibras de coco como material de reforço de solo aplicado à estabilização de taludes, considerando as

principais etapas envolvidas desde a obtenção da matéria-prima até sua aplicação na obra geotécnica. Comparando com outro tipo convencional de melhoramento de solo.

O limite sistema analisado compreende as etapas de produção da matéria prima e beneficiamento das fibras de coco, preparo da mistura solo-fibra e execução do reforço no talude (Figura 1). Dessa forma, a análise contempla os processos diretamente relacionados à produção e utilização do material de reforço, permitindo avaliar os impactos ambientais associados à sua implementação em condições representativas de campo. Não contempla as etapas de operação e manutenção dos taludes. Para o presente estudo, o limite espacial considerou-se o local do talude na região nordeste, estabelecendo distâncias padrão para transporte dos materiais e instalação. Contudo, o foco do estudo foi definido da forma que o local de instalação não afete o resultado, só considerando como parâmetro geral que o talude é no Brasil.



Figura 1. Limite do Sistema.

Como unidade funcional, adotou-se um volume unitário (m³) compactado a 100% de proctor normal de: solo puro, para fins de comparação, solo reforçado com 0,25% de fibras de coco, solo reforçado com 0,50% de fibras de coco e solo estabilizado com 3,0% de cimento, para ter uma comparação com outro método convencional de melhoramento de solos.

A etapa de modelagem do inventário do ciclo de vida, foram utilizados dados primários obtidos a partir dos estudos com fibras de coco em solo reforçado de Aguilar (2015), os quais foram complementados por dados secundários provenientes da base de dados de inventário de ciclo de vida Ecoinvent, versão 3.9.1, amplamente empregada em estudos ambientais devido à sua abrangência e confiabilidade. Já para a solução convencional de solo-cimento são extraídos os dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em termos de consumo de materiais, rendimentos de equipamentos e consumo energético. O gerenciamento e a modelagem dos dados primários e secundários foram realizados com o auxílio do software OpenLCA, que possibilita a estruturação dos fluxos de materiais e energia, bem como a organização sistemática dos processos que compõem o sistema analisado. Na Tabela 1 é apresentado os inventários de processos considerados para cada uma das soluções de misturas com solo adotadas das unidades funcionais de 1 m³.

Tabela 1. Inventário dos processos

Produto	Quantidade				Unidade
	Solo Puro	**Solo + 0,25% Fibra de coco**	**Solo + 0,50% Fibra de coco**	**Solo + 3% de cimento**	
Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	0,0031	0,0031	0,0031	-	h
Motoniveladora – 93 kW	0,0059	0,0059	0,0059	-	h
Caminhão tanque com capacidade de 10000 L – 188 kW	0,0054	0,0054	0,0054	0,00895	h
Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido – 130 kW	-	-	-	0,0087	h
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27t – 85 kW	-	-	-	0,00298	h
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t – 82 kW	0,0017	0,0017	0,0017	0,0074	h
Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	-	-	-	0,0083	h
Grupo gerador – 113 kVA	-	-	-	0,0083	h
Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h – 44 kW	-	-	-	0,0083	h
Areia	1614,33	1568,42	1553,49	2560,80	kg
Fibras de coco	-	3,92	7,77		kg
Água	161,43	156,84	155,35	256,08	kg
Cimento Portand CP II	-	-	-	61,89	kg

Para a etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), foi adotada a metodologia ReCiPe 2016 níveis *midpoint*, originalmente desenvolvida em 2008 e posteriormente atualizada, a qual apresenta representatividade global. Essa metodologia permite a classificação e a caracterização das emissões e da extração de recursos naturais em diferentes categorias de impacto, por meio da aplicação de fatores de caracterização, possibilitando a quantificação dos potenciais impactos ambientais associados ao sistema analisado.

As categorias de impacto utilizadas no presente estudo são: Potencial de Aquecimento Global (kg CO_2-eq), Escassez dos recursos energéticos (kg oil-eq), Escassez dos recursos minerais (kg Cu-eq), Formação de material particulado (kg PM2.5-eq) e Consumo de água (m³). A seleção dessas categorias específicas justifica-se por sua maior relevância para o contexto da engenharia geotécnica, especialmente em obras de infraestrutura, nas quais se destacam as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de energia e recursos naturais, a geração de poluentes atmosféricos associados a equipamentos e processos construtivos e a demanda hídrica. Dessa forma, optou-se por priorizar indicadores relacionados ao uso intensivo de materiais, energia e processos mecânicos, característicos de intervenções em solo, garantindo maior objetividade na interpretação dos resultados.

4 RESULTADOS

A partir da Metodologia ACV, são apresentados os resultados para 1 m³ de solo puro (ao natural), de solo reforçado com 0,25% de fibra de coco, 0,50% de fibras de coco e solo estabilizado com 3,0% de cimento. Os resultados são representados na Figura 1 para cada uma das categorias de impacto previamente selecionadas. As categorias de formação de material particulado, expressado em kg de partículas suspendidas no ar de 2.5 micras (PM2.5) equivalentes; esgotamento de recursos fósseis, expressado em kg de petróleo equivalentes; potencial de aquecimento global e mudanças climáticas, expressado em kg de dióxido de carbono equivalentes; esgotamento de recursos minerais, expressado em kg de cobre equivalentes e consumo de água em termos de volume de água utilizada para o processo, em m³.

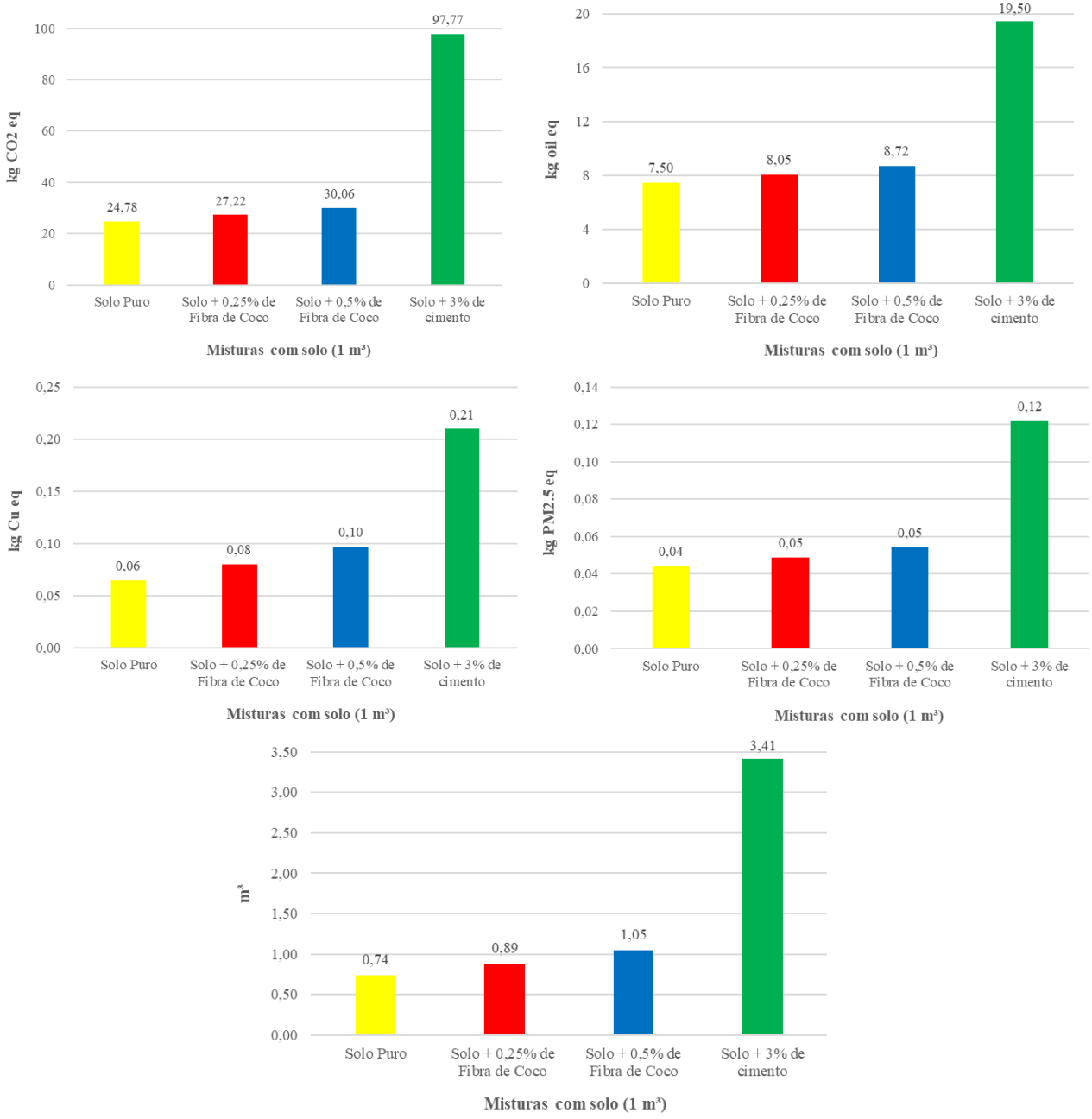


Figura 2. Resultados da AICV: (a) Potencial de Aquecimento Global; (b) Escassez dos recursos energéticos; (c) Escassez dos recursos minerais; (d) Formação de material particulado; (e) Consumo de água.

O cenário de solo puro na análise é fundamental para estabelecer uma linha de base ambiental do sistema estudado. De fato, esse cenário apresentou os menores valores em todas as categorias de impacto avaliadas. Entretanto, sob a perspectiva geotécnica, especialmente em obras como taludes de grande porte, o solo natural, em sua condição original, frequentemente não atende aos requisitos mínimos de estabilidade e segurança estabelecidos em projeto. Assim, embora ambientalmente mais favorável em termos absolutos, sua aplicação isolada pode não ser tecnicamente viável. Nesse contexto, a adoção de técnicas de melhoria ou reforço torna-se necessária, e a análise integrada entre desempenho mecânico e impacto ambiental passa a ser determinante para a escolha da solução mais adequada.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o potencial de aquecimento global aumenta de 24,78 kg CO_2 eq, no solo puro, para 27,22 kg CO_2 eq com a incorporação de 0,25% de fibras de coco, o que representa um acréscimo aproximado de 9,9%. Para o teor de 0,50% de fibras, o valor alcança 30,06 kg CO_2 eq,

correspondendo a um aumento de cerca de 21,3% em relação ao solo natural. Embora haja crescimento progressivo dos impactos com o aumento do teor de fibras, tal variação mostra-se relativamente moderada quando comparada à estabilização convencional com 3% de cimento, cujo impacto atinge 97,77 kg CO_2 eq, representando um incremento de aproximadamente 294,6% em relação ao solo puro. Esses resultados evidenciam que, ainda que a solução cimentícia seja amplamente reconhecida por sua eficiência geotécnica, seu custo ambiental é substancialmente mais elevado. O expressivo aumento nas emissões associadas ao cimento está relacionado, sobretudo, ao processo de produção do clínquer, intensivo em energia e emissões de CO_2. Assim, sob a ótica ambiental, a estabilização com cimento revela-se significativamente mais agressiva quando comparada às alternativas com fibras naturais.

Na categoria de recursos energéticos, os valores seguem tendência semelhante. O solo puro apresentou 7,50, aumentando para 8,05 e 8,72 com 0,25% e 0,50% de fibras, respectivamente. Já a mistura com cimento atingiu 19,50. Esse resultado reforça que, embora a introdução das fibras gere incremento ambiental em relação ao solo natural, tal aumento é marginal quando comparado ao impacto associado à produção do cimento. Nas categorias relacionadas à ecotoxicidade e formação de material particulado fino, observa-se comportamento consistente: o aumento do teor de fibra implica leve elevação nos impactos, enquanto o uso de cimento resulta em valores substancialmente superiores. Por exemplo, na formação de material particulado, o solo puro apresentou 0,04 kg PM2.5-Eq, enquanto a mistura com 3% de cimento atingiu 0,12 kg PM2.5-Eq, aproximadamente três vezes superior. Esse resultado é coerente com os processos industriais associados à produção do clínquer. No indicador relacionado ao consumo de recursos (m^3), nota-se aumento progressivo com a adição de fibras de 0,74 para 1,05 m^3, porém novamente com diferença marcante em relação ao cimento.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos a partir de uma normalização interna dos impactos ambientais avaliados, na qual o maior valor de cada categoria foi considerado como referência (100%), sendo os demais resultados expressos de forma relativa a esse valor. Nesse caso, o cenário de solo melhorado com 3% de cimento apresentou os maiores impactos em todas as categorias analisadas. A partir dessa normalização, torna-se possível comparar visualmente o desempenho ambiental dos diferentes cenários avaliados, evidenciando que as soluções com reforço de fibras de coco apresentam impactos significativamente inferiores aos observados na estabilização com cimento. Observa-se ainda que o aumento do teor de fibras de 0,25% para 0,50% promove apenas incrementos moderados nos impactos, mantendo-se, entretanto, substancialmente abaixo do cenário cimentado em todas as categorias consideradas.

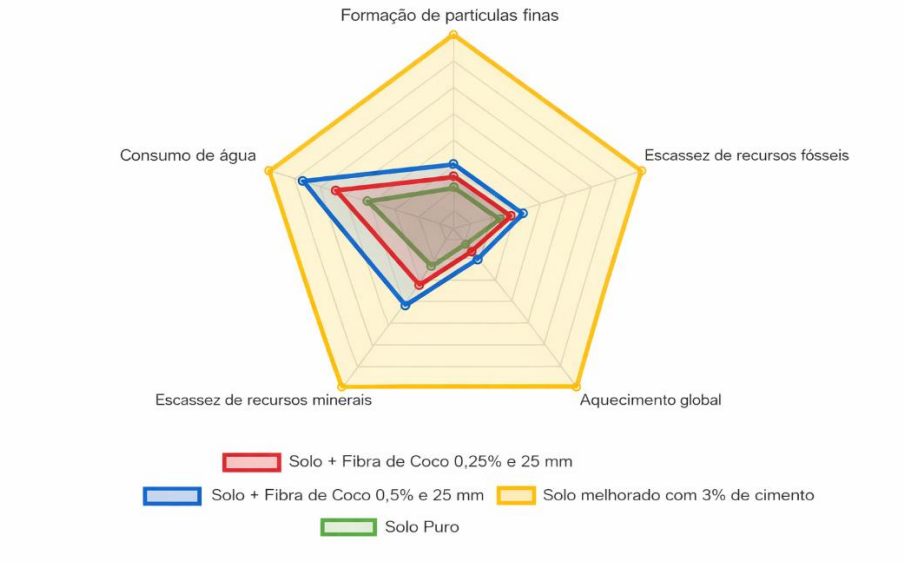


Figura 3. Normalização interna dos impactos ambientais.

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a incorporação de fibras de coco provoca aumento moderado nos impactos ambientais quando comparada ao solo puro, o que era esperado, uma vez que há introdução de um novo

material no sistema. Entretanto, quando a análise é realizada em perspectiva comparativa com a estabilização tradicional com cimento, observa-se redução significativa em todas as categorias avaliadas.

Isso sugere que o uso de fibras naturais pode representar uma alternativa ambientalmente mais favorável para aplicações geotécnicas específicas, especialmente quando a solução convencional envolver adições cimentícias. Contudo, é fundamental destacar que a viabilidade ambiental não deve ser analisada isoladamente. A escolha da solução deve considerar simultaneamente o desempenho geotécnico. Caso os ganhos no fator de segurança proporcionados pelas fibras sejam suficientes para atender aos requisitos de estabilidade, a solução passa a apresentar não apenas viabilidade técnica, mas também vantagem ambiental relativa. Dessa forma, os resultados reforçam a importância de análises integradas entre desempenho mecânico e avaliação ambiental, evitando decisões baseadas exclusivamente em critérios estruturais ou exclusivamente ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, da Universidade de Brasília (PPGG/UnB), ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos NGM/UnB, ao CNPq, na colaboração, suporte e financiamento do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 14040 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 21 p., 2009.

ABNT NBR ISO 14044 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46 p., (versão corrigida 2014), 2009.

Cabral, M. M. S., Abud, A. K. S., Silva, C. E. F., & Almeida, R. M. R. G. (2016). Bioethanol production from coconut husk fiber. Ciência Rural, 46(10), 1872–1877. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151331

Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2024). From LCA to circular design: A comparative study of digital tools for the built environment. Resources, Conservation and Recyclinih. https:// doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107291.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). FAOSTAT statistical database: Crops and livestock products – Coconut production (2022–2023). FAO. https://www.fao.org/faostat.

Imran, A. I., Siregar, J. P., Cionita, T., Hadi, A. E., Setiyo, M., Mat Rejab, M. R., Jaafar, J., Fitriyana, D. F., & Dewi, R. (2024). Advancements in sustainable material development: A comprehensive review of coir fiber and its composites. Mechanical Engineering for Society and Industry, 4(3), 415–454. https://doi.org/10.31603/mesi.12556.

Lopez-Arraiza, A., Essamari, L., Iturrondobeitia, M. et al. Life cycle assessment of glass fibre versus flax fibre reinforced composite ship hulls. Sci Rep 15, 16283 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-00811-y

Merta, I., Mladenovič, A., Turk, J., Šajna, A., & Mauko Pranjić, A. (2018). Avaliação do Ciclo de Vida de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras Naturais. Key Engineering Materials, 761, 204–209. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.761.204

Mohammed, A.A.; Nahazanan, H.; Nasir, N.A.M.; Huseien, G.F.; Saad, A.H. Calcium-Based Binders in Concrete or Soil Stabilization: Challenges, Problems, and Calcined Clay as Partial Replacement to Produce Low-Carbon Cement. Materials 2023, 16, 2020. https://doi.org/10.3390/ma16052020.

Santos, M. L. de J., & Casagrande, M. D. T. (2023). Estudo do Comportamento de um Solo Tropical Reforçado com Fibras Naturais de Coco. X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.I-027.

Santos, M. L. de J., Lopes, M. M., Silva, A. B., Ferreira, J. W. dos S., & Casagrande, M. D. T. (2026). Mechanical performance and durability of açaí fibers as reinforcement in tropical clay soil. Journal of Natural Fibers, 23(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2595560.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/72

Camadas De Cobertura De Aterros Sanitários: Estudo Dos Principais Parâmetros Geotécnicos De Um Solo Considerando Informações Do Estado Da Arte

Gilberto da Conceição de Jesus Júnior
Graduando do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana-DTEC, Feira de Santana-Ba, Brasil, gibaguvix@gmail.com

Gabriela Santos Silva
Graduanda do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana-DTEC, Feira de Santana-Ba, Brasil, gabrielasantos.s@hotmail.com

Maria do Socorro Costa São Mateus
Professora Doutora, Universidade Estadual de Feira de Santana-DTEC, Feira de Santana-Ba, Brasil, socorro@uefs.br

RESUMO: As camadas de cobertura de aterros sanitários desempenham papel fundamental no controle da infiltração de água e da emissão de gases, influenciando diretamente a geração de lixiviados e o desempenho ambiental do sistema. Este trabalho analisa os principais parâmetros geotécnicos que governam o comportamento hidráulico dessas camadas, com base em revisão bibliográfica e na caracterização de um solo utilizado como cobertura final em um aterro sanitário. A literatura evidencia que o desempenho das coberturas é controlado por condições predominantemente não saturadas, sendo insuficiente a avaliação baseada apenas na condutividade hidráulica saturada. Parâmetros como sucção matricial, teor de umidade, estrutura do solo, capacidade de armazenamento hídrico e interação solo–atmosfera mostram-se determinantes para o desempenho de longo prazo. Experimentalmente, o solo analisado foi caracterizado quanto à granulometria, limites de consistência, compactação e classificação SUCS, apresentando comportamento distinto dos solos argilosos tradicionalmente recomendados para camadas convencionais. Os resultados reforçam a necessidade de abordagens baseadas em desempenho, incorporando critérios hidráulicos, mecânicos e ambientais no projeto e na avaliação de camadas de cobertura de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de Cobertura, Aterros Sanitários, Parâmetros Geotécnicos.

ABSTRACT: Sanitary landfill cover layers play a fundamental role in controlling water infiltration and gas emissions, directly influencing leachate generation and the overall environmental performance of the system. This study analyzes the main geotechnical parameters governing the hydraulic behavior of these layers, based on a literature review and the characterization of a soil used as a final cover in a sanitary landfill. The literature indicates that the performance of cover systems is predominantly controlled by unsaturated conditions, making evaluations based solely on saturated hydraulic conductivity insufficient. Parameters such as matric suction, moisture content, soil structure, water storage capacity, and soil–atmosphere interaction are shown to be decisive for long-term performance. Experimentally, the analyzed soil was characterized in terms of grain-size distribution, consistency limits, compaction, and SUCS classification, presenting behavior distinct from the clayey soils traditionally recommended for conventional cover layers. The results reinforce the need for performance-based approaches that incorporate hydraulic, mechanical, and environmental criteria in the design and evaluation of landfill cover layers.

KEYWORDS: Cover Layer, Sanitary Landfills, Geotechnical parameters.

1 Introdução

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), quando dispostos em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, geram líquidos (chorume) e gases durante a decomposição. O chorume, ao se misturar com a água da chuva, forma o lixiviado, altamente poluidor; já entre os gases, destacam-se o metano (CH_4) e o gás carbônico

(CO_2). A entrada de água no aterro e a saída de gases dependem diretamente da camada de cobertura, cuja eficiência está relacionada à espessura, composição mineralógica, granulometria, arranjo estrutural e permeabilidade, no caso de serem compostas por materiais porosos. Além da eficácia dessas propriedades geotécnicas, é necessário avaliar a compatibilidade do sistema com o clima local.

As camadas de cobertura são um revestimento impermeável executado sobre a última camada de resíduos e suas principais funções são isolar os resíduos do meio ambiente, controlar a entrada de água e a saída de gases. Atuam como barreira à infiltração de chuva e à liberação de biogás, prevenindo o aumento de lixiviados e impactos atmosféricos. (Mariano, 2008).

As camadas podem ser projetadas como convencionais (formadas por solo compactado e geossintéticos) ou como alternativas e deverão ser compactadas. Dentre estas, existem as evapotranspirativas (utilizam o potencial de armazenamento de água no solo ou material poroso); oxidativas (utilizam bactérias metanotróficas do composto orgânico para oxidar o metano.

Para a avaliação do pleno funcionamento do sistema de cobertura, é executado um plano de monitoramento geotécnico que consiste em inspeções visuais e na realização de ensaios no solo como a medição de permeabilidade a água pela camada de cobertura. Nesse sentido, o entendimento do comportamento geotécnico do solo, in situ e em laboratório, possibilitam a eficiência e a segurança desejada ao projeto de sistemas de cobertura (Araujo, 2017). Para as camadas oxidativas, por exemplo, parâmetros como textura do solo, matéria orgânica e pH são determinantes e devem ser acompanhados para que se tenha o devido funcionamento da camada (Lira, 2017).

Urge destacar que camadas de cobertura constituídas por materiais porosos possuem aplicação como coberturas temporárias para os aterros sanitários e como coberturas finais para municípios de pequeno e médio porte. Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos da Bahia (PERS-BA), cerca de 67,39% dos municípios baianos ainda utilizam vazadouros a céu aberto como forma de disposição final, evidenciando a necessidade de soluções viáveis para adequação à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Além disso, dados do IBGE indicam que aproximadamente 60,34% dos 417 municípios da Bahia possuem população igual ou inferior a 20.000 habitantes, o que, em geral, está associado a menor capacidade financeira e técnica para implantação de aterros sanitários convencionais de maior complexidade.

Este trabalho apresenta os principais parâmetros de solo, considerados para garantir o bom funcionamento de camadas de cobertura de aterros de RSU. Por meio da revisão bibliográfica, foi possível ver que a eficiência das camadas de cobertura de aterros sanitários de RSU está diretamente associada ao comportamento geotécnico dos solos em condição predominantemente não saturada, no qual parâmetros como sucção matricial, teor de umidade, estrutura do solo e permeabilidade controlam os processos de infiltração, armazenamento e redistribuição da água.

Estudos demonstram que abordagens tradicionais baseadas exclusivamente na condutividade hidráulica saturada são insuficientes para representar o desempenho hidráulico de longo prazo das coberturas, uma vez que variações climáticas, ciclos de secagem e umedecimento, fissuração, alterações estruturais e processos pedogenéticos modificam significativamente suas propriedades ao longo do tempo.

Nesse contexto, pesquisas nacionais e internacionais indicam a necessidade de incorporar parâmetros associados ao regime não saturado, ao balanço hídrico, à capacidade de armazenamento de água no solo e à interação solo–atmosfera no dimensionamento e na avaliação de desempenho de coberturas convencionais e alternativas, bem como considerar seus efeitos hidráulicos, mecânicos e ambientais, reforçando a importância de monitoramento geotécnico contínuo e critérios de projeto compatíveis com o clima e o material empregado.

2 Revisão de Literatura

2.1 Principais parâmetros geotécnicos para camadas de cobertura de aterro sanitário de RSU

O solo é frequentemente encontrado em seu estado natural na condição não saturado, desse modo repercussões específicas ocorrem nessa condição e caracterizam o seu comportamento (Vilar, 2017). Durante a infiltração, a saturação plena raramente é atingida e o fluxo de água na camada de cobertura depende das precipitações efetivas, e é controlado por parâmetros como estrutura do solo, condutividade hidráulica e teor de umidade, os quais se modificam ao longo da vida útil do aterro em função das condições climáticas e do comportamento mecânico dos resíduos (São Mateus, 2008).

Nesse contexto, a sucção matricial, associada às forças capilares e de adsorção, regula a retenção de água no solo e se relaciona diretamente com o grau de saturação, cuja redução ocorre à medida que o ar passa a ocupar os vazios do material. As camadas de cobertura são compactadas na umidade ótima e, neste caso, em geral elas não estão na condição saturada. Desta forma, torna-se importante determinar a curva de retenção de umidade do material de cobertura, para compreender os fluxos de infiltração e evaporação da água, bem como o armazenamento.

Para a avaliação do pleno funcionamento do sistema de cobertura, é executado um plano de monitoramento geotécnico que consiste em inspeções visuais e na realização de ensaios no solo como a medição de permeabilidade a água pela camada de cobertura de solo compactado. Nesse sentido, o entendimento do comportamento geotécnico do solo, in situ e em laboratório, possibilitam a eficiência e a segurança desejada ao projeto de sistemas de cobertura (Araujo, 2017). Para as camadas oxidativas, por exemplo, parâmetros como textura do solo, matéria orgânica, umidade do solo, temperatura, nutrientes e pH são determinantes e devem ser acompanhados para que se tenha o funcionamento da camada (Lira, 2017). Embora haja recomendações na ABNT NBR 13896, quando à condutividade hidráulica do solo utilizado nas camadas de cobertura, não existem demais exigência quanto ao tipo de solo, espessura e manutenção ao longo do tempo.

2.2 Desempenho das camadas de cobertura convencionais

A cobertura final de um aterro sanitário é composta pelas seguintes camadas a partir da cobertura: de solo de cultivo; de separação e filtração; de drenagem de águas pluviais; de proteção da geomembrana; de impermeabilização composta por geomembrana ou argila; de drenagem de gases; e de regularização (Boscov, 2008), sendo que a exclusão de uma ou mais camadas dependerá das necessidades de cada aterro sanitário. Apesar disso, nem todas coberturas finais possui esses componentes, sendo que essa escolha é definida de acordo com as necessidades do aterro sanitário.

A camada convencional é uma barreiras de baixa permeabilidade e geralmente utilizam solos argilosos compactados e, em alguns casos, geossintéticos, com o objetivo de reduzir a infiltração por meio da impermeabilização (Medeiros, 2020). O desempenho dessas camadas de cobertura varia ao longo do tempo, devido a parâmetros como estrutura, índice de vazios, grau de compactação, umidade de compactação e variações climáticas tais como precipitação e pressão atmosférica, desse modo, estudos monitorando essas camadas em climas diferentes são necessários para entender o comportamento (Lopes, 2011).

As camadas de cobertura finais com argila compactada, embora atendam às indicações normativas, apresentam queda de desempenho hidráulico ao longo do tempo. Albright et al. (2006a), a partir do monitoramento de três camadas de cobertura por um perído de 2 a 4 anos com lisímetros instrumentados em diferentes condições climáticas, observaram aumento das taxas drenagem por fatores que variaram de 100 a 750. Esse aumento ocasionou na extrapolação da taxa de drenagem inicial e ocorreu em um curto espaço de tempo em comparação com a vida útil de projeto exigida frequentemente para 30 anos, nesse sentido, isso foi associado à formação de caminhos preferenciais de fluxo devido ciclo de congelamento e descongelamento do solo.

Analogamente, em clima úmido, Albright et al. (2006b) verificaram aumento da condutividade hidráulica da camada em até três ordens de grandeza, saindo de 10^(-7) para 10^(-4) em apenas quatro anos, indicando que o atendimento inicial à condutividade hidráulica saturada não assegura desempenho hidráulico de longo prazo. Isso acontece, porque o RSU se decompõe e o recalque diferencial é bastante elevado, causando recalque da camada de cobertura e, consequentemente, fissuração e aumento da condutividade hidráulica, ademais a presença de ciclos de congelamento e descongelamento, nesse caso, pode ter facilitado a formação de fluxo preferenciais através da camada.

Nesse sentido, a perda de eficiência das camadas de cobertura está associada a ciclos de secagem e umedecimento, que induzem fissuração e modificam as propriedades hidráulicas de solos argilosos. Magalhães e Soares (2021) observaram que, embora a secagem superficial gere trincas em argilas expansivas, o reumedecimento promove o fechamento dessas fissuras devido à expansão do material, indicando potencial de restrição à infiltração. Em regiões semiáridas, Silva et al. (2022) verificaram que o comportamento hidráulico é dominado pela condição não saturada, com redução abrupta da permeabilidade à medida que a umidade diminui, evidenciando que a permeabilidade saturada não representa o regime hidráulico

predominante, sendo, portanto, importante determinar as propriedades não saturadas, como já é de conhecimento geral. É importante destacar que, em regiões áridas e semi-áridas, o regime de chuvas é bem definido, fato que permite uma camada de cobertura armazenar água no período chuvoso, para evaporar no período de estiagem.

Oliveira et al. (2020) destacam a escassez de normas específicas no Brasil e propõem o uso do Método de Balanço Hídrico proposto por Pereira (2005) adaptado da de Thornthwaite e Mather (1957), para estimar a espessura da cobertura em função do fluxo de água. Sendo a condutividade hidráulica saturada insuficiente para representar o comportamento real das coberturas, indicaram a incorporação de parâmetros como armazenamento de água no solo, sucção matricial e permeabilidade não saturada, especialmente em climas semiáridos para avalia-la.

Albright et al. (2013) avaliaram o desempenho hidrológico em campo de coberturas finais de aterros com barreiras compostas ao verificar a compatibilidade entre as taxas de percolação medidas em campo e aquelas previstas em projeto em um monitoramento do balanço hídrico, ao longo de três a cinco anos. Contudo, foram observadas discrepâncias relevantes entre dados medidos e previsões de modelos hidrológicos, levando à conclusão de que os modelos hidrológicos frequentemente não previam com precisão os componentes do balanço hídrico medidos em campo, evidenciando a dependência do desempenho à integridade da geomembrana e à evolução das propriedades hidráulicas do solo.

2.3 Desempenho das camadas de cobertura alternativa

Zornberg et al. (2003) demonstram que coberturas evapotranspirativas funcionam a partir do armazenamento temporário de água no solo e de sua remoção por evapotranspiração, sendo a percolação influenciada de forma não linear por parâmetros como espessura da camada, condutividade hidráulica saturada, curva de retenção de água e profundidade radicular. De forma complementar, Albright et al. (2004), com base em lisímetros de grande escala, mostram que o escoamento superficial e a drenagem lateral influenciam pouco no balanço hídrico, enquanto a percolação varia conforme o tipo de cobertura e o clima, estando associada à capacidade de armazenamento hídrico do solo e às condições atmosféricas locais.

Ademais, Apiwantragoon e Benson (2023) demonstraram, a partir de dados de campo, que a equivalência hidráulica entre sistemas depende da taxa de percolação, da eficiência de armazenamento e do tempo de monitoramento, sendo influenciada por processos de dessecação e alterações pedogenéticas ao longo do tempo.

Estudos experimentais aprofundam a compreensão dos mecanismos associados à perda de desempenho de camadas de cobertura. Lobo, Machado e Marques Filho (2021) observaram, em ensaios com canal bidimensional instrumentado, que camadas argilosas compactadas submetidas a ciclos de insolação e precipitação típicos do semiárido desenvolveram trincas de retração, comprometendo a função hidráulica da barreira.

De forma convergente, Balugani, Lubczynski e Metselaar (2023) demonstraram, em lisímetros de campo, que a evaporação em solos secos é fortemente influenciada por gradientes térmicos, superando estimativas baseadas apenas na difusão de vapor. Esses resultados indicam que parâmetros como sucção, umidade volumétrica, temperatura do solo e espessura da zona seca são determinantes no comportamento hidráulico real, reforçando a necessidade de abordagens que considerem o regime não saturado e a interação solo–atmosfera. São Mateus (2008) e São Mateus et al. (2012) mostram a influência de cada parâmetro do balanço hídrico ao incluírem os parâmetros de teor de umidade, curva de retenção de umidade e infiltração do material da camada de cobertura e do RSU.

Estudos recentes ampliam a compreensão do papel das camadas de cobertura ao considerar, além da função hidráulica, seus efeitos mecânicos e ambientais. Norberto, Medeiros e Mariano (2018) demonstram que a inclusão da camada de cobertura em análises de estabilidade de aterros contribui para o aumento do fator de segurança dos taludes, a partir da incorporação de seus parâmetros de resistência ao cisalhamento vez que a camada de cobertura impede o aumento da umidade nos resíduos sólidos e, consequentemente, a redução da resistência.

Em relação à adição de composto orgânico ao solo para compor a camada de cobertura, Santos et al. (2021) mostram que a adição de composto orgânico eleva os limites de consistência, reduz a massa específica

seca máxima e aumenta a retenção de umidade em relação ao solo natural. Por sua vez, Sena et al. (2025) demonstram que, em solos com composto orgânico, a permeabilidade ao ar é fortemente reduzida com o aumento do grau de compactação e do teor de umidade, indicando que o desempenho dessas camadas depende diretamente do controle desses parâmetros durante a execução.

Medeiros et al. (2024) compararam camadas de cobertura convencionais e oxidativas, destacando a relevância de parâmetros como porosidade, permeabilidade ao ar e retenção de umidade para a oxidação biológica do metano, bem como para a estabilidade física da camada.

Costa et al. (2018) ao realizarem ensaios em colunas de solos comparando o desempenho de um solo siltoso e um solo adicionado de composto orgânico misturados na proporção 1:1, demonstraram que a mistura solo e composto orgânico apresentou desempenho superior ao solo convencional, promovendo maior retenção de água na camada e restringindo a infiltração para maiores profundidades, além de não apresentar macrofissuras visíveis, indicando melhor comportamento à retração.

Em relação às emissões de CH_4, ambas as camadas, convencional e solo compostado, tiveram desempenho semelhante em condições sem precipitação; entretanto, após eventos de infiltração, a mistura solo e composto alcançou redução de emissões em torno de 80%, enquanto o solo isolado atingiu cerca de 60%, evidenciando maior eficiência na mitigação de biogás. De modo geral, o uso do composto orgânico associado ao solo mostrou-se mais eficaz na redução da infiltração e das emissões, configurando alternativa tecnicamente mais eficiente às coberturas convencionais.

2.4 O solo estudado

A tabela 1 apresenta os valores determinados em laboratório, do solo estudado visando o seu aproveitamento enquanto camada de cobertura final de aterro sanitário. Pode-se ver que a granulometria do solo apresenta uma distribuição contínua e mostra que o solo possui em sua constituição uma fração maior de areia, desse modo, classifica-se o solo como uma areia média pedregulhosa. Segundamente, foi determinado também a massa específica dos sólidos e foi encontrado um valor de 2,693 g/cm³, e também os índices de consistência, que caracterizaram o solo como de baixa plasticidade. Além disso, os valores de teor de umidade ótimo e de massa específica seca máxima, encontrados para o ensaio de compactação, correspondem a 10,00% e 1,990 g/cm³, respectivamente.

Tabela 1 – Resumo dos Resultados da Caracterização Geotécnica, Fonte: Autoral.

Análise		Solo do Aterro Sanitário
Granulometria	Pedregulho %	25,81
	Areia Grossa %	21,35
	Areia Média %	27,04
	Areia Fina %	9,95
	Silte %	9,85
	Argila %	6
Índices de Consistência	Limite de Liquidez (LL) %	26
	Limite de Plasticidade (LP) %	17
	Índice de Plasticidade (IP) %	9
Massa específica dos grãos (g/cm³)		2,693
Classificação Sistema Unificado		SM

Nesse sentido, de acordo com (CETESB, 1993), se tratando de uma camada convencional, para que um solo argiloso possa ser caracterizado adequado como impermeabilização de aterros, precisa obedecer a alguns parâmetros. Foi comparado os parâmetros do solo estudado com as camadas citadas na literatura, mostrado na tabela 2, em seguida foi observado que as características do solo estudado e classificado como

areia siltosa (SM) possui divergências significativas para as peculiaridades de um solo indicado para se comportar como camada de cobertura convencional.

Tabela 2 – Comparação entre as características dos solos usados nas camadas de cobertura convencional e alternativas, Fonte: Autoral.

Parâmetros	CAM. CONV. (CETESB, 1993)	CAM. OXIDATIVA (Costa, 2018)	CAM. MONOLÍTICA (Zornberg, 2007)	CAM. ESTUDADA
Classificação SUCS	CL, CH, SC ou OH	ML	CL	SM
Limite de Liquidez	≥30%	43,71	26,7	26%
Índice de Plasticidade	≥15%	33,02	11,7	9%
Coeficiente de permeabilidade	< 10^(-7) cm/s	1,9 × 10^(-7) cm/s	4.70×10^(−4) cm/s	-

CONV. = CONVENCIONAL; CAM. = CAMADA.
CL – ARGILA DE BAIXA COMPRESSIBILIDADE; CH ARGILA DE ALTA COMPRESSIBILIDADE; SC- AREIA ARGILOSA; OH SOLO ORGÂNICO DE ALTA COMPRESSIBILIDADE; ML – SILTE DE BAIXA COMPRESSIBILIDADE; SM- AREIA SILTOSA.

3 CONCLUSÃO

A partir da análise desenvolvida, conclui-se que o desempenho das camadas de cobertura de aterros sanitários é controlado por um conjunto integrado de parâmetros geotécnicos e hidrológicos, sendo inadequado avaliá-lo apenas com base na condutividade hidráulica saturada. A estrutura do solo, o índice de vazios, o grau e a umidade de compactação condicionam diretamente a condutividade hidráulica e a evolução do comportamento hidráulico ao longo do tempo. A sucção matricial e o grau de saturação mostraram-se fundamentais para descrever o regime não saturado predominante, influenciando a retenção de água e a redução da permeabilidade em condições secas. A curva de retenção de umidade constitui ferramenta central para compreender a capacidade de armazenamento hídrico do solo e sua resposta aos ciclos de secagem e umedecimento. Observa-se ainda que a espessura da camada, a permeabilidade não saturada, a temperatura do solo e os processos de evaporação e evapotranspiração afetam diretamente a percolação e o desempenho hidráulico de longo prazo. Dessa forma, o dimensionamento e a avaliação de camadas de cobertura devem adotar abordagens baseadas em desempenho, incorporando parâmetros hidráulicos, mecânicos e ambientais de forma integrada e compatível com o regime não saturado. O solo estudado foi classificado como uma areia siltosa (SM), com pequena fração de argila de baixa compressibilidade, apresentando baixa quantidade de finos e limites de consistência distintos dos solos argilosos convencionalmente empregados em camadas de cobertura. A partir da granulometria do solo estudado, é possível inferir um valor elevado para o coeficiente de permeabilidade. Os ensaios para determinação dos parâmetros hidráulicos encontram-se em andamento. Para as condições climáticas semiáridas, como as de Feira de Santana-BA, será possível utilizar camada de cobertura alternativa, do tipo evapotranspirativa e, para isto, recomenda-se avaliar o balanço hídrico, bem como a possibilidade de dosagem do solo para ajustar os parâmetros geotécnicos. Estudos produzidos por Costa et al. (2018) apontam que a incorporação de compostos orgânicos a solos arenosos, pode reduzir significativamente a emissão de gases fugitivos (biogás) para a atmosfera e manter taxas de infiltração em níveis aceitáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Abichou, T.; Apiwantragoon, P.; Rock, S. A.; Lyles, B. F. (2012). Field hydrology of landfill final covers with composite barrier layers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 138 (3), p. 337–348.

Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Abichou, T.; McDonald, E. V.; Tyler, S. W.; Rock, S. A. (2006). Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (11), p. 1393–1403.

Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Abichou, T.; Tyler, S. W.; Rock, S. A. (2006). Field performance of three compacted clay landfill covers. *Vadose Zone Journal*, 5 (4), p. 1157–1171.

Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Roesler, A. C.; Abichou, T.; Apiwantragoon, P.; Lyles, B. F.; Rock, S. A. (2004). Field water balance of landfill final covers. *Journal of Environmental Quality*, 33, p. 2317–2332.

Apiwantragoon, P.; Benson, C. H. (2025). Water balance landfill covers: Hydraulic performance and equivalency. *Geoenvironmental Engineering* (GSP 362), American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 145–165.

Araujo, P. S. (2017). *Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário*. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Balugani, E.; Lubczynski, M. W.; Metselaar, K. (2023). Lysimeter and in situ field experiments to study soil evaporation through a dry soil layer under semi-arid climate. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033878.

Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (1993). *Resíduos sólidos industriais*. 2. ed. rev. ampl. São Paulo: CETESB, 234 p.

Costa, D. M.; Mariano, M. O. H.; Araújo, L. B.; Jucá, J. F. T. (2018). Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23 (1), p. 77–90.

Lira, B. S. (2017). *Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 116 p.

LOBO, B. R. H.; MACHADO, S. L.; MARQUES FILHO, E. P. Construction and test of an instrumented 2D channel with rainfall and insolation control. Research Square, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-777481/v1. Acesso em: 27 out. 2025.

Lopes, R. L. (2011). *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 250 p.

Magalhães, P. R. F.; Soares, A. B. (2021). Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no Nordeste do Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 26 (6), p. 1069–1077.

Mariano, M. O. H. (2008). Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 243 p.

Medeiros, R. M.; Oliveira, A. D.; Norberto, A. S.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2020). Avaliação das propriedades físicas na camada de cobertura oxidativa em áreas de disposição final de resíduos sólidos. In: *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, SP. Anais *do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. ABMS.

Medeiros, R. M.; Oliveira, A. D.; Oliveira Júnior, A. I.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2024). Camada de cobertura oxidativa para redução da emissão do gás metano em áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. In: *XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú, SC. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. ABMS.

Norberto, A. S.; Medeiros, R. M.; Mariano, M. O. H. (2018). Avaliação do efeito da camada de cobertura na estabilidade em aterros de resíduos sólidos urbanos. In: *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2018*, Salvador, BA. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. ABMS.

Oliveira, M. S.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2020). Dimensionamento de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação ao fluxo de água. In: *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, SP. Anais *do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. ABMS.

Santos, J. J. N.; Souza, J. C. M.; Araújo, P. S.; Melo, M. C.; Monteiro, V. E. D. (2021). Efeito da adição de composto orgânico no solo de camadas de cobertura de aterros sanitários e sua influência nas propriedades geotécnicas. *Revista DAE*, 69 (230), p. 154–166.

São Mateus, M. S. C. (2008). *Proposta de modelo para avaliação do balanço hídrico de aterros de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 312 p.

São Mateus, M. S. C.; Machado, S. L.; Barbosa, M. C. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. *Waste Management*. 32 (3), p. 471–481.

Sena, T. S.; Santos, J. J. N.; Souza, J. C. M.; Soares, A. B.; Melo, M. C.; Monteiro, V. E. D. (2025). Effects of organic compost, saturation, and compaction on air permeability in compost-modified soil for landfill biocover systems. *Journal of Environmental Engineering*, 151 (10), 04025064.

Silva, T. F.; Santos, J. J. N.; Souza, J. C. M.; Araújo, P. S.; Paiva, W. (2022). Comportamento da permeabilidade não saturada em camada de cobertura de aterro sanitário no semiárido brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27 (5), p. 1049–1057.

Vilar, O. M. (2021). *Fundamentos da mecânica dos solos não saturados*. São Carlos.

Zornberg, J. G.; LaFountain, L.; Caldwell, J. A. (2003). Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (6), p. 427–438.

Zornberg, J. G.; McCartney, J. S. (2007). Evapotranspirative cover systems for waste containment. In: *The Handbook of Groundwater Engineering*. Boca Raton: CRC Press, p. 34-1–34-31.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/73

Camadas de Cobertura em Aterros Sanitários e Emissões de Biogás: Uma Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica

Mariana Guimarães de Moraes Rocha
Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, mariana_rocha@discente.ufg.br

Laís Roberta Galdino de Oliveira
Professora Adjunta, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

RESUMO: A gestão de resíduos sólidos urbanos permanece um desafio crítico, especialmente em países em desenvolvimento, onde a elevada fração orgânica dos resíduos intensifica a geração de biogás. Em aterros sanitários, a decomposição anaeróbia produz predominantemente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), gases cujo fluxo depende de condições físico-químicas e biológicas do ambiente. As camadas de cobertura desempenham papel essencial no controle das emissões fugitivas, especialmente do CH_4, que tem potencial de aquecimento global é 28 vezes superior ao CO_2. Este estudo realizou uma revisão sistemática e análise bibliométrica sobre camadas de cobertura em aterros sanitários e sua relação com a emissão de biogás, abrangendo publicações científicas dos últimos 20 anos (2005–2025), identificando 16 artigos relevantes. Os resultados evidenciam que sistemas alternativos, como biocoberturas e coberturas vegetadas, se destacam pela maior eficiência na oxidação microbiana do metano e redução nas emissões de biogás. As lacunas identificadas incluem a necessidade de padronização de metodologias de medição e estudos a longo prazo em coberturas de solos lateríticos. Além disso, avanços recentes oferecem subsídios para o desenvolvimento de soluções mais eficazes para mitigação de gases de efeito estufa em aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização geotécnica, Emissões fugitivas, Barreira de argila, Camadas alternativas, Sistema de cobertura.

ABSTRACT: Municipal solid waste management remains a critical challenge, especially in developing countries, where the high organic fraction of waste intensifies biogas generation. In sanitary landfills, anaerobic decomposition predominantly produces methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), gases whose flux depends on the physicochemical and biological conditions of the waste mass. Cover layers play an essential role in controlling fugitive emissions, particularly CH_4, a gas with a global warming potential 28 times higher than that of CO_2. This study conducted a systematic review and bibliometric analysis of landfill cover layers and their relationship with biogas emissions, encompassing scientific publications from the last 20 years (2005–2025) and identifying 16 relevant articles. The results demonstrate that alternative systems, such as biocovers and vegetated covers, stand out for their higher efficiency in microbial methane oxidation and reduction in biogas emissions. The identified gaps include the need for standardized measurement methodologies and long-term studies on lateritic soil covers. Furthermore, recent advances provide support for the development of more effective solutions for mitigating greenhouse gases in landfills.

KEYWORDS: Geotechnical characterization, Fugitive emissions, Clay barrier, Conventional layer, Cover system.

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um dos principais desafios ambientais e de saúde pública da atualidade, sobretudo em países em desenvolvimento, onde a rápida urbanização intensifica a geração de resíduos (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012). No cenário normativo brasileiro, essa prática passou por uma reestruturação com a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Sob a ótica da PNRS, o aterro sanitário deixa de ser um receptor genérico de resíduos para se tornar o destino final exclusivo de rejeitos. Nesse contexto, a implantação de aterros

sanitários tecnicamente planejados e cientificamente fundamentados, capazes de mitigar riscos ao meio ambiente e à saúde pública, torna-se uma necessidade imprescindível diante das demandas da atualidade (OSAZEE, 2021).

A biodegradação da fração orgânica dos RSU em aterros sanitários ocorre por meio de processos físicos, químicos e biológicos, que evoluem em estágios temporais distintos, resultando na geração de lixiviados e de biogás constituído majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (TEIXEIRA et al., 2009).

As camadas de cobertura utilizadas em aterros sanitários desempenham papel fundamental no controle das emissões gasosas, especialmente do metano, principal componente do biogás produzido em aterros sanitários, que possui potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao dióxido de carbono em um período de 100 anos, conforme relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013).

Segundo Maciel (2009), a estimativa do potencial de geração de biogás em aterros de RSU no Brasil representa um desafio significativo em decorrência dos modelos utilizados no país, que se baseiam em referências internacionais, se mostrado pouco satisfatórios quando aplicados ao contexto brasileiro. Além disso, Maciel (2009) afirma que os projetos de aproveitamento energético existentes enfrentam limitações técnicas decorrentes de previsões imprecisas de produção de biogás, possivelmente devido ao uso de parâmetros desenvolvidos para aterros que operam sob condições climáticas, características de resíduos e práticas operacionais substancialmente distintas das encontradas no Brasil.

Apesar da consolidação dos sistemas de extração ativa via drenos verticais e horizontais para queima ou valorização energética, a gestão do biogás em aterros é comprometida pela eficiência de coleta reduzida (50-75%), pelos custos elevados de instalação e manutenção e pela ocorrência de emissões fugitivas substanciais através das camadas de cobertura (SPOKAS et al., 2006).

Diante deste cenário, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática e análise bibliométrica da produção científica sobre a influência das camadas de cobertura de aterros sanitários nas emissões de biogás, identificando: (i) os artigos mais citados e suas contribuições principais; (ii) os autores mais influentes na área; (iii) os periódicos de maior relevância; e (iv) as tendências e lacunas do conhecimento atual. Esta análise visa fornecer subsídios técnico-científicos para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de controle de emissões de metano em aterros sanitários brasileiros, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aterro sanitário é capaz de receber diferentes tipos de resíduos e funciona como um reator dinâmico, uma vez que, em seu interior, ocorrem diversas reações químicas e biológicas resultantes da decomposição da matéria orgânica, onde os principais elementos de entrada são os resíduos e a água, enquanto os elementos de saída correspondem aos gases e aos lixiviados gerados ao longo do processo de degradação (ELK, 2007).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Urbana e Ambiental (ABREMA, 2024), aproximadamente 45,3% dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil é composto por matéria orgânica, o que evidencia um expressivo potencial energético associado ao aproveitamento do biogás gerado durante a decomposição desses materiais.

2.1 Geração de Biogás em Aterros Sanitários

A formação de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos é um processo complexo, influenciado tanto pela diversidade dos materiais depositados quanto pelos múltiplos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem ao longo do tempo , sendo produzido principalmente pela degradação microbiana da matéria orgânica sob condições anaeróbias, e com composição variando de acordo com as características dos resíduos submetidos à decomposição, resultando na variação de composição do biogás em diferentes regiões do aterro sanitário (MARIANO, 2008).

De acordo com a Enviroment Agency (2004), existem algumas variáveis que podem alterar a composição dos gases em um aterro sanitário, entre elas podemos citar a idade e as propriedades físico-químicas do resíduo, as características hidráulicas do local, a temperatura, armazenamento e pré-tratamento, entre outras.

Os principais componentes do biogás gerado em aterros sanitários são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), que juntos podem representar cerca de 99% do total de gases emitidos, sendo que o CH_4 varia entre 30% e 70% do total de gases gerado no aterro sanitário, e o CO_2 compõe de 20% a 50% dos gases produzidos (MACIEL, 2009). Maciel (2009) afirma ainda que existem outros compostos, como hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e monóxido de carbono (CO), que podem estar presentes no ambiente dependendo da fase de biodegradação e das condições ambientais do sistema. Nikiema et al. (2007) reforça que as concentrações desses gases variam de acordo com o tipo de resíduo disposto e a idade do aterro sanitário.

Nos primeiros anos de operação do aterro sanitário a taxa de emissão de biogás cresce rapidamente, atingindo valores elevados em um curto período, e posteriormente, observa-se um declínio gradual e contínuo dessas emissões, sendo que a maior parte da produção de CH_4 e CO_2 ocorre nos primeiros 20 anos após a disposição dos resíduos podendo persistir por 50 anos ou mais, dependendo das condições ambientais e operacionais do aterro (NIKIEMA et al., 2007).

A decomposição biológica dos resíduos em aterros sanitários ocorre tanto em condições aeróbias (aqueles que dependem do O_2 para se desenvolverem) quanto anaeróbias (aqueles que atuam na ausência de O_2), conforme descrito por Kumar et al. (2004), e podem ocorrer simultaneamente em diferentes regiões do maciço de resíduos (USACE, 2008). A oxidação microbiana do metano é um processo biológico natural realizado por bactérias metanotróficas (micro-organismos que utilizam metano como única fonte de carbono e energia), ocorrendo naturalmente em ambientes onde ele coexiste com o oxigênio, como nas coberturas de aterros sanitários, onde as bactérias metanotróficas se estabelecem e se adaptam às condições do meio (TEIXEIRA et al., 2009).

2.2 Sistemas de Cobertura de um Atero Sanitário

Um aterro sanitário configura-se como uma área destinada à disposição controlada de resíduos sólidos, organizada em células nas quais os materiais são depositados e, ao final de cada jornada de trabalho, recobertos por uma camada de solo de 300 mm de espessura , chamada cobertura diária ou cobertura operacional (ABNT, 2010). Essa prática visa reduzir a infiltração de água de chuva, evitar o arraste de materiais leves pelo vento, atenuar odores e inibir a presença de animais e a proliferação de vetores, contribuindo para melhores condições sanitárias e ambientais (DANIEL, 1993)

As coberturas intermediárias são utilizadas em setores do aterro sanitários onde não haverá disposição de resíduos por um intervalo aproximado de 60 a 90 dias, mas que voltarão a receber materiais em fases posteriores da operação (CHETRI; REDDY, 2021). O autor afirma ainda que a cobertura final é aplicada quando o aterro sanitário atinge sua capacidade projetada de disposição, promovendo o encerramento definitivo da célula ou do maciço como um todo.

Segundo Mariano (2008), as camadas de cobertura das células de um aterro sanitário atuam como uma barreira isolante entre o maciço de resíduos e o meio externo, reduzindo a infiltração de água pluvial na massa de resíduos e contendo a liberação de gases para a atmosfera. O autor supracitado ressalta que essa camada deve apresentar baixa permeabilidade e elevada durabilidade, tornando a seleção dos materiais e do sistema de cobertura adotados no fechamento do aterro sanitário, um aspecto crucial do projeto, diretamente vinculado ao desempenho operacional e ambiental da instalação.

Mariano (2008) acrescenta que existem dois tipos principais de sistemas de cobertura final, sendo eles os sistemas convencionais (que utilizam camadas de solo argiloso compactado como barreira hidráulica) e os sistemas alternativos (que utilizam diferentes tipos de solo ou uma mistura de solo com outros tipos de materiais) atuando como barreira física e promovendo a oxidação do metano. A escolha entre o uso de uma camada de cobertura convencional ou alternativa depende de variáveis como as condições climáticas locais, a disponibilidade de solos argilosos adequados e os custos de implantação, destacando as coberturas alternativas (em especial as do tipo oxidativa e evapotranspirativa) por demonstrarem maior eficiência no controle das emissões gasosas e menor custo quando comparadas às soluções tradicionais (MARIANO, 2008).

3 METODOLOGIA

A revisão sistemática e análise bibliométrica foi conduzida através de buscas estruturadas em bases de dados científicas reconhecidas internacionalmente. A estratégia metodológica seguiu as diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) adaptadas para estudos bibliométricos.

Foram consultadas as bases de dados Scopus (Elsevier), Web of Science (Clarivate Analytics) e Science Direct (Elsevier), com o período de análise de 2005 a 2025. Para a string de busca, utilizou-se os termos: ("landfill") AND ("cover layer" OR "final cover" OR “landfill cover system”) AND ("biogas emission" OR "methane”) AND (“geotechnical" OR “geotechnics”).

Os critérios de inclusão foram baseados em artigos publicados em periódicos, sem restrição quanto ao idioma, contemplando estudos empíricos, modelagens numéricas, revisões sistemáticas e estudos de caso, todos voltados para as interações entre camadas de cobertura e emissões de biogás em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Os critérios de exclusão adotados foram capítulos de livros, teses e dissertações, publicações duplicadas e estudos sem relação direta com o tema.

Após a aplicação dos critérios de seleção, foram identificados inicialmente 144 documentos potencialmente relevantes, sendo 11 deles em duplicata, restando 133 documentos. Realizando uma análise sistemática desses artigos, percebeu-se um extensivo número de publicações com uma abordagem fragmentada ou com o escopo limitado para o propósito desse estudo, sendo eliminados subsequentemente. Entre eles, pesquisas de simulações numéricas e análise do fluxo de gás dentro do aterro sanitário, geração de biogás a partir dos componentes de RSU, reaproveitamento e geração de energia através da emissão de biogás, projetos de poços de coleta e modelos numéricos ou estudos de emissão, oxidação ou permeabilidade ao gás da biocobertura desconsiderando o efeito da camada de cobertura. Ademais, foram detectados 2 artigos de revisão da literatura e 4 trabalhos sem acesso para a classificação, que também foram retirados da seleção, restando 16 artigos incluídos na análise bibliométrica final.

Para cada publicação incluída, foram extraídos o título do artigo, autores, ano, periódico de publicação, número de citações, resumo, tipo de estudo e país de origem. A identificação dos pesquisadores de maior relevância foi realizada com base de dados da plataforma Scopus. Os critérios de seleção basearam-se no volume de publicações indexadas, no índice de impacto (índice-h) e na frequência de citações em periódicos. Para a compilação dos dados e análise dos títulos e resumo utilizou-se o Parsifal e Microsoft Excel.

4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise bibliométrica permitiu identificar os principais trabalhos, autores, periódicos e países que vêm contribuindo para o avanço do conhecimento sobre camadas de cobertura aplicadas à mitigação das emissões de biogás em aterros sanitários. Os resultados evidenciam a consolidação das biocoberturas como estratégia promissora para redução das emissões de metano, além de revelar tendências de pesquisa, centros de excelência científica e lacunas que ainda demandam investigação. A Tabela 1 apresenta os 5 artigos mais citados.

Tabela 1. Artigos mais citados.

Rank	Autores	Ano	Título	Periódico	Citações
1	Louis-B. Jugnia; Alexandre R. Cabral; Charles W. Greer	2008	Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover.	Ecological Engineering	74
2	Erin N. Yargicoglu; Krishna R. Reddy	2017	Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study.	Journal of Environmental Management	71
3	Felipe J. Maciel; José F. T. Jucá	2011	Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil.	Waste Management	70

4	Charles W. W. Ng; Zhong-K. Chen; Jason L. Coo; Rui Chen and Chao Zhou	2015	Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover.	Waste Management	70
5	Yun-Y. Lee; Hyekyeng Jung; Hee-W. Ryu; Kyung-C. Oh; Jun-M. Jeon; Kyung-S. Cho	2018	Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill.	Waste Management	46

Os artigos mais citados concentram-se principalmente na avaliação da eficiência de camadas de cobertura para oxidação biológica do metano e no desenvolvimento de materiais capazes de aumentar a retenção e o tratamento do biogás. O estudo de Jugnia et al. (2008) destaca-se como a principal referência da área, evidenciando a relevância das biocoberturas experimentais para mitigação das emissões de metano. Da mesma forma, Yargicoglu e Reddy (2017) demonstraram o potencial do biochar como material promotor da atividade metanotrófica. Os trabalhos de Maciel e Jucá (2011) reforçam a importância de estudos realizados em regiões tropicais, enquanto Ng et al. (2015) ampliam a compreensão dos mecanismos físicos de migração gasosa em coberturas compactadas. Em conjunto, esses estudos constituem a base científica que sustenta o desenvolvimento atual das tecnologias de cobertura para aterros sanitários.

A análise dos autores de maior impacto, apresentado na Tabela 2, evidencia forte concentração da produção científica em pesquisadores ligados às áreas de engenharia geotécnica e engenharia ambiental. Charles W. W. Ng apresenta o maior impacto científico, refletindo sua contribuição para os estudos sobre transporte gasoso em meios não saturados. Krishna R. Reddy destaca-se pelos avanços relacionados à utilização de materiais alternativos para aumento da oxidação biológica do metano. No contexto latino-americano, José Fernando Thomé Jucá representa importante referência, sobretudo em pesquisas desenvolvidas sob condições climáticas tropicais, frequentemente sub-representadas na literatura internacional.

Tabela 2. Autores de maior impacto.

Rank	Autores	Instituição	Publicações	Citações	Índice-h
1	Charles W. W. Ng	HKUST	667	27.815	89
2	Krishna R. Reddy	University of Illinois Chicago	527	16.731	70
3	José F. T. Jucá	UFPE	62	865	14
4	Erin N. Yargiçoğlu	Chicago Faculty of Engineering	18	1.347	13
5	Jason L. Coo	Frann Builders Corporation	21	870	13

A identificação dos periódicos de maior impacto revela os principais veículos de disseminação do conhecimento na área e estão exibidos na Tabela 3. Os resultados demonstram clara predominância do periódico Waste Management, responsável por quase metade das publicações identificadas. Esse cenário indica que a temática está fortemente associada às pesquisas sobre gestão de resíduos sólidos urbanos e tecnologias de aterros. A dispersão dos demais estudos em diferentes periódicos sugere caráter multidisciplinar da área, envolvendo engenharia ambiental, geotecnia e ciências ambientais.

Tabela 3. Periódicos de maior impacto.

Periódico	Frequência (%)
Waste Management	43,75
Environmental Science and Pollution Research	6,25

Periódico	Frequência (%)
Ecological Engineering	6,25
Journal of Environmental Management	6,25
Science of the Total Environment	6,25
Outros	31,25

A distribuição geográfica das publicações revela maior participação de Brasil, Estados Unidos e China, cada um representando 18,75% dos estudos identificados. A presença brasileira merece destaque devido à relevância dos desafios associados à gestão de resíduos em regiões tropicais, onde as elevadas temperaturas e a umidade favorecem taxas mais intensas de degradação dos resíduos. Observa-se ainda baixa cooperação internacional entre os países líderes (somente índia e Estônia), indicando potencial para ampliação de redes colaborativas capazes de acelerar o desenvolvimento tecnológico e a transferência de conhecimento. Na Figura 1 é possível visualizar a influencia de cada país.

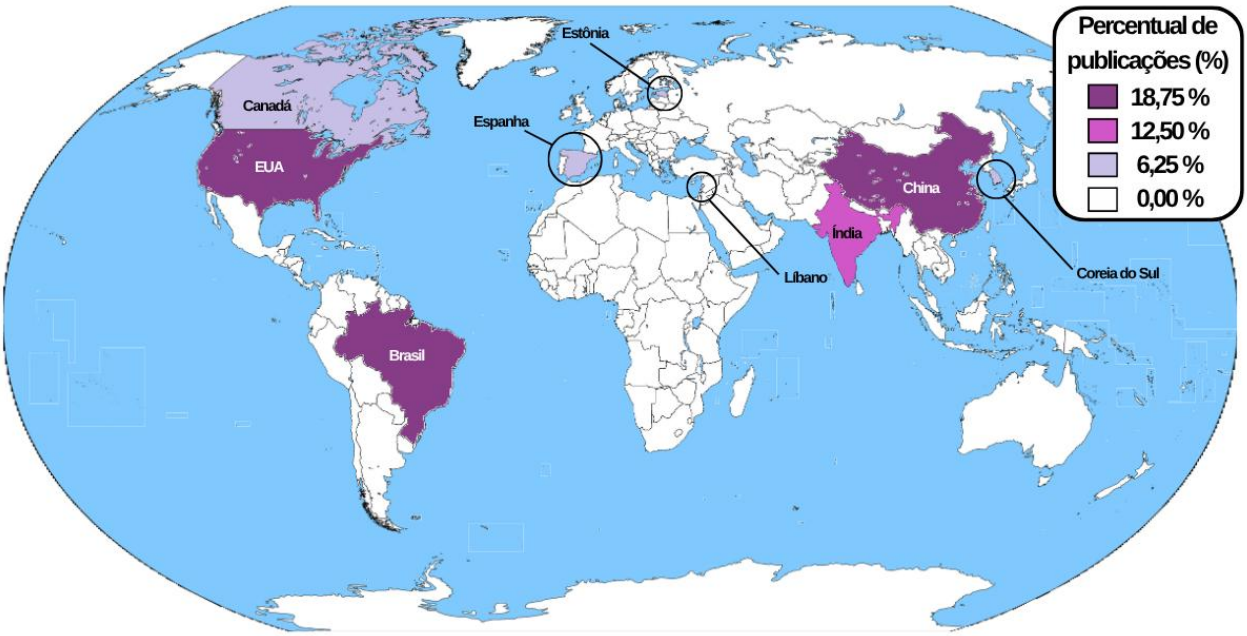


Figura 1. Distribuição geográfica das publicações sobre camadas de cobertura e emissões de biogás em aterros sanitários.

Em termos gerais, os resultados demonstram que as camadas de cobertura biológica para oxidação microbiana de metano constituem uma tecnologia consolidada e cientificamente validada para mitigação das emissões de biogás em aterros sanitários. Entretanto, permanecem desafios importantes relacionados à adaptação dessas tecnologias às condições climáticas tropicais, à escassez de monitoramentos de longo prazo e à ausência de metodologias padronizadas para comparação entre estudos.

Adicionalmente, observa-se a necessidade de avaliações econômicas mais robustas, capazes de subsidiar decisões de gestão e formulação de políticas públicas. O desenvolvimento de novos materiais de cobertura, associados à integração de tecnologias complementares de captura e tratamento de biogás, representa uma das principais tendências para pesquisas futuras. A superação dessas lacunas poderá ampliar a eficiência ambiental dos aterros sanitários e contribuir significativamente para as metas globais de redução das emissões de metano.

5 CONCLUSÕES

A presente revisão sistemática e análise bibliométrica consolidou o conhecimento científico acumulado sobre camadas de cobertura em aterros sanitários e suas relações com emissões de biogás, abrangendo 16 publicações selecionadas criteriosamente no período de 2005 a 2025. As principais conclusões incluem:

- Eficácia comprovada da oxidação microbiana: Camadas oxidativas bem projetadas alcançam eficiências de oxidação de metano entre 35% a 90%, podendo variar sazonalmente conforme a temperatura ambiente, constituindo alternativa viável e ambientalmente superior aos sistemas convencionais.
- Materiais promissores identificados: Compostos de resíduos orgânicos demonstraram desempenho superior devido a propriedades físicas adequadas (porosidade e retenção de umidade), disponibilidade de nutrientes e presença de comunidades metanotróficas ativas. Materiais emergentes como biochar e perlita com húmus de minhoca, apresentam potencial significativo.
- Periódicos de referência: Waste Management se consolida com o principal veículo de disseminação científica sobre essa temática, concentrando 7 publicações, sendo elas: "Effects of biochar-amended soils as intermediate covers on the physical, mechanical and biochemical behaviour of municipal solid wastes" (China), "Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill: Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism" (Líbano), "Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil" (Brasil), "Full-scale experimental study of methane emission in a loess-gravel capillary barrier cover under different seasons" (China), "Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover" (China), "Quantification of methane emissions in a Mediterranean landfill (Southern Spain), "A combination of flux chambers and geostatistical methods" (Espanha) e "Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill" (Coreia do Sul).
- Lacunas e direções futuras: (1) escassez de modelos específicos em climas tropicais (2) monitoramentos de longo prazo, (3) análises econômicas detalhadas, (4) padronização metodológica, (5) desenvolvimento de materiais inovadores e (6) integração otimizada de tecnologias complementares.
- Perspectiva multidisciplinar essencial: A natureza interdisciplinar do tema, integrando microbiologia, engenharia ambiental, ciência do solo, química atmosférica e políticas públicas, requer abordagens colaborativas para desenvolvimento de soluções efetivas.

A consolidação do conhecimento apresentada nesta revisão demonstra que as soluções técnicas para mitigação das emissões de metano em aterros sanitários estão disponíveis e testadas. O desafio remanescente reside na implementação em larga escala, superando barreiras econômicas, institucionais e de capacitação técnica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON) pelo suporte institucional que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho. À CAPES, pelo apoio financeiro imprescindível à pesquisa. Expresso ainda minha sincera gratidão à minha orientadora, Profa. Dra. Laís Roberta Galdino de Oliveira, pela dedicação, orientação criteriosa e incentivo constante ao longo de todo o estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 15849: *Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduso e Meio Ambiente (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 1 de setembro de 2025.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 2010.

Chetri, J.K., Reddy, K.R. (2021). Advancements in Municipal Solid Waste Landfill Cover System: A Review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101, p. 557–588, 2021.

C.W.W. Ng; Z.K. Chen; J.L. Coo; R. Chen and C. Zhou (2015). Gas breakthrough and emission through unsaturated compacted clay in landfill final cover. *Waste Management*, 44, p. 155-163.

Daniel, D.E. (1993). *Geotechnical practice for waste disposal*. Springer–Science+Business Media, B.V, Texas, EUA, p. 686.

Elk, A. G. H. P. (2007). *Redução de emissões na disposição final. (Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos - MDL)*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-eprogramas/saneamento/pmss/biblioteca-virtual/serie-mdl-residuos-solidos>.

Environment agency (2004). *Guidance on monitoring landfill gas surfasse emissions*. Inglaterra, p. 63, 2004.

Erin N. Yargicoglu; Krishna R. Reddy (2017). Effects of biochar and wood pellets amendments added to landfill cover soil on microbial methane oxidation: A laboratory column study. *Journal of Environmental Management,* 193, p. 19-31.

Hoornweg, D., Bhada-tata, P. (2012). *What a waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Urban Development Series , No. 15. Washington, DC, p 116.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 222.

Kumar, S., Mondal, A.N., Gaikwad, S.A., Devotta S., Singh, R.N (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric Environment*, 38(29), p. 4921-4929.

Louis-B. Jugnia; Alexandre R. Cabral; Charles W. Greer (2008). Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. *Ecological Engineering*. 33(2), p. 102-109.

Maciel, F. J. (2009). *Geração de biogás e energia em aterro experiemental de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.. Recife, p. 355.

Maciel, F. J.; Jucá J. F. T. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management,* 31(5), p. 966-977.

Mariano, M. O. H. (2008). *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 243.

Nikiema, J.; Brzezisnki, R.; Heitz, M. (2007) Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. *Environmental Science Biotechnology*, 6, p. 261-284.

Osazee, I. T. G. (2021). Landfill in a Sustainable Waste Disposal. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 2(4), p. 67–74.

Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J. P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C.; Golvan, Y. M.; Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26(5), p. 516-525.

Teixeira, C.E.; Torves, J.C.; Finotti, A.R.; Fedrizzi, F.; Marinho, F.A.M. (2009). Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, 14(1), p. 99-108.

US Army corps of engineers. (2008). *Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems: Engineer manual*. Washington, DC.

Yun-Yeong Lee; Hyekyeng Jung; Hee-Wook Ryu; Kyung-Cheol Oh; Jun-Min Jeon; Kyung-Suk Cho (2018). Seasonal characteristics of odor and methane mitigation and the bacterial community dynamics in an on-site biocover at a sanitary landfill. *Waste Management,* 71, p. 277-286.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/74

Características Físicas e Mecânicas e da Permeabilidade da Mistura de Solo/Fosfogesso como Camada de Base de Aterro Sanitário

Anna Julia Furlan Soria
Discente em Engenharia Civil, Universidade Federal do Triangulo Mineiro, Uberaba, Brasil, annajusoria@gmail.com

Simone Cristina de Jesus
Professora do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triangulo Mineiro, Uberaba, Brasil, simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: Para a aprovação de uma camada de base de aterro sanitário, a mesma deve apresentar requisitos normativos mínimos, sendo um deles o critério de baixa permeabilidade, a qual necessita ser da ordem de 10^{-9} m/s. Esse critério pode ser obtido através da compactação do solo de base do aterro sanitário. Porém, apenas essa compactação pode não ser suficiente para que se alcance o objetivo da baixa condutividade hidráulica. Além disso, percebe-se uma crescente utilização de materiais provenientes de mineração na construção civil, sobretudo em obras rodoviárias e geotécnicas. Dessa forma, pensa-se na incorporação do fosfogesso em solo de camada de base de aterro sanitário, em substituição da bentonita, visto que o material tem uma larga produção nas indústrias de fertilizantes fosfatados. De acordo com os resultados do ensaio de permeabilidade triaxial, o coeficiente de permeabilidade da mistura de 50% de solo com 50% de fosfogesso atinge a uma ordem de 10^{-8} m/s, não estando em conformidade com o requisito mínimo, bem como os limites de consistência. Contudo, ambos se encontram muito próximos dos valores necessários, sendo facilmente atingidos com o incremento de aditivos na mistura. O ensaio de adensamento também prevê boas perspectivas ao uso do material, já que foi constada pouca expansão, apenas sugerindo atenção nos recalques e deformações da estrutura pelo alto tempo de consolidação. Para o ensaio de resistência, a mistura se mostra frágil com comportamento de areia compacta e seu uso é preocupante para obras geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: fosfogesso, condutividade hidráulica, camada de base e aterro sanitário.

ABSTRACT: For a landfill base layer to be approved, it must meet minimum regulatory requirements, one of which is the criterion of low permeability, which needs to be in the order of 10^{-9} m/s. This criterion can be achieved by compacting the landfill base soil. However, only this compaction may not be sufficient to achieve the objective of low hydraulic conductivity. Addictionally, there is a growing use of materials from mining in civil construction, especially in road and geotechnical works. Thus, the incorporation of phosphogypsum in the sanitary landfills base layer soil is considered, in substitution of bentonite, since the material has a large production in the phosphate fertilizer industries. According to the results of the triaxial permeability test, the coefficient of permeability of the mixture of 50% soil with 50% phosphogypsum reaches an order of 10^{-8} m/s, as well as the consistency limits. Though, both are very close to the required values and are easily achieved by adding additives to the mix. The oedometer test also provides good prospects for the use of the material, since little expansion was found, only suggesting that attention be paid to settlements and deformations of the structure due to the long consolidation time. The strength test showed the mixture to be fragile, with the behavior of compacted sand, and its use is worrying for geotechnical works.

KEYWORDS: phosphogypsum, hydraulic conductivity, base layer and landfill.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 89,9% da população tem acesso à coleta domiciliar de resíduos, cuja disposição ocorre principalmente em aterros sanitários, onde cerca de 73,3% do descarte é realizado (SNIS, 2021). Um aterro sanitário é destinado especialmente aos resíduos sólidos urbanos (RSU) e, seguindo princípios de engenharia, minimiza os impactos ambientais se comparado a métodos como aterros controlados (que não possuem impermeabilização e tratamento de efluentes) e lixões (onde o descarte é feito a céu aberto).

Em sua fase de projeto, o local do aterro deve ser escolhido considerando a topografia, geologia, clima e hidrologia, sendo essencial caracterizar os resíduos quanto ao tipo, composição, propriedades e volume. Já na etapa construtiva, uma camada drenante e impermeabilizante na base do aterro é fundamental para evitar a percolação de substâncias tóxicas no solo e a contaminação da água subterrânea.

Especificamente, a camada de base é composta por solos finos para reduzir a carga hidráulica e coletar o percolado. A impermeabilização pode ser feita com solos argilosos compactados, geossintéticos ou geocompostos argilosos, ou uma combinação desses materiais. Como exemplo de mistura, a utilização de bentonita é viável na ausência de solos finos para compactação (BOSCOV, 2008). Por esse motivo, também é pensada a possibilidade de incorporação do fosfogesso para uma mistura que, mesmo sendo uma opção econômica, deve apresentar baixa condutividade hidráulica e ser compatível quimicamente com o percolado a longo prazo.

Dessa forma, é evidente a significativa dependência do aterro sanitário em relação ao solo usado na base, estabelecendo, assim, os requisitos mínimos para a impermeabilização dessa camada compactada. Isso inclui considerar o limite de liquidez, índice de plasticidade, fração de finos, teor de argila, areia e pedregulho, e o coeficiente de permeabilidade, além de sua correlação com a umidade e energia de compactação. Entre esses fatores, a granulometria e os limites de consistência são fundamentais para alcançar baixa permeabilidade. Portanto, mesmo que um solo não atenda a todos esses critérios, poderá ser aprovado se sua condutividade hidráulica for igual ou inferior a 10^{-9} m/s (RIBEIRO; MASCARENHA; SANTOS, 2018), dependendo do tipo de compactação e aditivos utilizados. Esse contexto, somado à possibilidade de adicionar materiais à camada de fundo, levanta a proposta de utilizar fosfogesso como parte do revestimento.

Portanto, este estudo visa avaliar uma mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso para utilização na camada de base do aterro sanitário, aproveitando a grande produção desse material na indústria de fertilizantes fosfatados. Porém, são necessários ensaios para garantir um controle geotécnico seguro, considerando a possível liberação de substâncias tóxicas no solo.

A proporção selecionada baseia-se em ensaios anteriores com 20% de fosfogesso, que demonstraram resultados satisfatórios (RAMOS, 2024). Espera-se, também, que esta pesquisa promova um aumento na aplicação de fosfogesso em obras de engenharia civil.

2 METODOLOGIA

Todas as análises físicas e mecânicas foram realizadas na mistura de 50% de fosfogesso e 50% de solo usado em camada de base do Aterro Sanitário de Uberaba/MG, localizado na Avenida Filomena Cartafina (km 17). O fosfogesso foi fornecido, em seu estado natural, pela empresa Mosaic Fertilizantes (Uberaba/MG). Esse resíduo e o solo foram acondicionados em sacos de 50 kg no Laboratório B1/B2 - Mecânica dos Solos, Geologia, Materiais de Construção Civil e Estrutura e Transporte do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (ICTE/UFTM).

2.1 Análises físicas

A caracterização granulométrica foi realizada para o solo e para a mistura por peneiramento e suas classificações foram feitas pelos métodos SUCS e AASHTO. Todos os procedimentos têm como base a norma brasileira NBR 6457 (ABNT, 2016) e foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade de São Carlos (exceto os ensaios de consistência da mistura, os quais foram feitos no Laboratório da UFTM).

Para o Ensaio do Teor de Umidade, três (3) cápsulas metálicas médias foram utilizadas para armazenar o solo anteriormente preparado. As amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,001g e

deixadas em estufa a 100ºC por 24 horas para determinação do teor de umidade, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Para a preparação da amostra da mistura, tanto o solo quanto o fosfogesso foram destorroados e passados na peneira #40 (0,425mm). Após esse processo, a mistura foi umedecida, a fim de que fosse possível realizar os ensaios com resultados satisfatórios.

Com base na NBR 7180/2016 (ABNT, 2016), o ensaio de Limite de Plasticidade foi realizado utilizando-se almofariz em porcelana e espátula para umedecimento da amostra. Em seguida, a mistura foi moldada em placa de vidro esmerilhada, até seu tamanho se igualar ao gabarito cilíndrico metálico.

Subsequentemente, segundo a NBR 6459/2017 (ABNT 2017), o ensaio de Limite de Liquidez foi realizado no aparelho de Casagrande com cinzel para solos argilosos, onde a mistura foi moldada com auxílio de espátula de lâmina flexível para posterior aplicação dos golpes.

Em ambos ensaios, cinco (5) amostras foram colocadas em cápsulas metálicas, pesadas em balança analítica com precisão de 0,001g e deixadas em estufa a 100ºC por 24 horas para determinação do teor de umidade.

Após uma secagem prévia até a umidade higroscópica de 8,17%, o ensaio de compactação foi realizado com reuso de solo e as amostras foram preparadas conforme a NBR 6457/2024 (ABNT 2024). Imediatamente após a homogeneização do solo, o mecanismo de compactação teve início na Energia Proctor Normal, aplicando a energia referente a 26 golpes em cada uma de três camadas de espessuras equivalentes da mistura, colocadas dentro do cilindro, com auxílio de um soquete pequeno ao longo de toda circunferência.

Com a finalização da compactação, o conjunto foi pesado e levado ao extrator de amostras para a retirada do corpo de prova e seguinte constatação de seu teor de umidade (com pesagens da cápsula, da cápsula com solo na umidade do ensaio e da cápsula com solo após 24h de secagem na estufa com temperatura entre 105°C e 110°C).

Por fim, a amostra foi destorroada na bandeja metálica para um novo ciclo do ensaio de compactação com reuso de solo, sendo todo o procedimento acima repetido até a observação da redução de massa com o aumento dos incrementos de água em pelo menos duas pesagens de corpos de prova distintos.

Como resultado, a curva de compactação foi construída por um total de 8 corpos de prova, sendo 5 no ramo seco, 1 próximo à umidade ótima e 2 no ramo úmido, frutos de incrementos de 50ml, 50ml, 50ml, 80ml, 100ml, 100ml, 100ml e 150ml de água.

2.2 Análise da permeabilidade

Uma nova compactação foi realizada para a mistura, de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016) na Energia do Proctor Normal, nos parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima, que correspondem ao máximo grau de compactação. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do cilindro no extrator e moldado, com um anel de 5cm de diâmetro e estilete, para a confecção da amostra para o ensaio de permeabilidade, nas dimensões de, aproximadamente, 5cm de diâmetro e 11cm de altura.

Após essa primeira etapa, o ensaio para a determinação da permeabilidade foi realizado de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2021), na câmara triaxial. Esta foi montada colocando-se a sua base, pedra porosa e papel filtro abaixo do corpo de prova. Sobre ele, colocou-se, também, papel filtro, pedra porosa e o cabeçote superior. Assim, revestiu-se o corpo de prova com membrana de silicone e a montagem da câmara foi finalizada com a parede de acrílico e a tampa superior.

Dessa forma, o interior da câmara foi preenchido com água a fim de saturar completamente o corpo de prova, aplicando-se uma pressão confinante externa σ_3 (para provocar pequenas variações de tensão na amostra) e uma contra pressão interna u (para eliminar o ar dos vazios ainda presentes), mantendo uma diferença de, sempre, 10 kPa ($\sigma_3 > u$). Por fim, elevam-se os níveis de pressão até a ordem de 400 kPa.

Dessa maneira, podem-se retornar os níveis de pressão (σ_3 e u) para os estipulados para as leituras de permeabilidade. Assim, abre-se a válvula de saída do cabeçote superior para que ocorra fluxo na amostra. A análise da permeabilidade foi realizada observando-se as leituras da variação do menisco de água na bureta graduada, determinando-se o volume de água percolada pelo corpo de prova em certo tempo.

O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Equação 1:

$$k = \frac{a*L}{t*A} * log\left(\frac{Hi}{Hf}\right) \quad (1)$$

2.3 Análises mecânicas

O ensaio de adensamento foi executado seguindo as diretrizes da ABNT NBR 16853/2020, cuja amostra para execução do ensaio foi do tipo deformada e compactada em laboratório. Também, foram utilizados os dados de umidade ótima e densidade aparente seca máxima.

Com isso, o equipamento foi configurado para transmissão de carga e medição da deformação e acoplado ao equipamento de cisalhamento direto, sendo permitida a atuação apenas da força axial no sentido vertical. Como aparato para medição de deformação foi acoplado um deflectômetro com precisão de 0,01mm. O entendimento da amplitude de carga transmitida pelo braço de alavanca ao corpo de prova foi feito através do momento fletor no eixo da rótula.

Assim, foi realizado o primeiro carregamento com a carga de assentamento de 5kPa por 10 minutos para ajuste inicial das partículas, com sequência de carregamento dobrando-se as cargas, sendo utilizadas as tensões de 10kPa (estágio 1), 20kPa (estágio 2), 40kPa (estágio 3), 80kPa (estágio 4), 160kPa (estágio 5), 320kPa (estágio 6) e 640kPa (estágio 7). Em todos os estágios, a leitura do deflectômetro foi realizada nos tempos de 0s, 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 24h e leituras adicionais para os estágios com durações maiores que 24h.

Os gráficos de Taylor e Casagrande foram utilizados na análise do desenvolvimento do adensamento primário e secundário em cada estágio de carregamento, cuja troca para o próximo estágio sendo função do início do adensamento secundário. Essa análise ocorreu para todo o ensaio, com exceção do primeiro, que durou o tempo de 24h.

Ademais, a relação entre o logaritmo da tensão vertical no eixo das abscissas e o índice de vazios, no eixo das ordenadas, também foi avaliada com o gráfico que compreendeu todas as tensões utilizadas no ensaio, inclusos os descarregamentos efetuados, os quais ocorreram em 3 momentos: entre o estágio 4 e 5, entre o estágio 6 e 7 e o último ao final de todo o procedimento. Também, os incrementos de carga foram retirados no sentido inverso ao carregamento, com um intervalo de 30 minutos entre as movimentações para possibilitar a estabilização do solo e a leitura inicial e final do deflectômetro. Os dados iniciais do corpo de prova podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características iniciais do corpo de prova do ensaio de adensamento

Dados do anel		Dados iniciais do corpo de prova	
Altura [cm]	3,35	Massa específica [g/cm³]	1,755
Diâmetro [cm]	7,53	Massa específica dos grãos [g/cm³]	2,283
Área [cm²]	44,57	Massa específica seca [g/cm³]	1,287
Volume [cm³]	149,32	Teor de umidade [%]	36,300
Massa [g]	498,33	Índice de vazios	0,770
Massa anel + solo [g]	761,33	Grau de saturação inicial [%]	100,000
Massa de solo [g]	263,00	Grau de compactação [%]	99,180

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado seguindo a ASTM 3080, sendo feita uma envoltória de 4 pontos, iniciando com a aferição das dimensões dos três anéis de cisalhamento que foram utilizados no ensaio. Todos os anéis identificados por 1, 2 e 3 possuem diâmetro de 6,3 cm, altura de 2,85 cm, área interna de 31,172 cm² e volume de 88,84 cm³, diferenciando-se apenas na tara (914,05 g 908,55 g e 913,54 g, respectivamente).

A massa da mistura foi calculada (159,02 g) e compactada no anel de cisalhamento, totalizando 4 corpos de prova para as tensões de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa e, em seguida, foram aferidas as massas de cada conjunto anel + mistura, cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados da massa do anel + mistura para o ensaio de cisalhamento direto

Anel	Tensão aplicada [kPa]	Massa (anel + mistura) [g]
1	50	1073,90
2	100	1067,87
3	150	1073,16
3	200	1066,47

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

Em seguida, os corpos de prova foram então submersos por 24h para saturar a amostra. Após esse período, foi aplicada a carga sobre o corpo de prova para a sua consolidação e, após 24h com a aplicação de carga, foram instalados os extensômetros do tipo LVDT para registrar os deslocamentos horizontais e verticais. Para isso, os dados foram registrados através de um aquisitor, conectado a um computador onde são registradas as leituras dos extensômetros e da célula de carga presente no sistema. Após a realização dos ensaios, as umidades dos corpos de prova foram aferidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do Limite de Plasticidade (LP), Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) da mistura de solo e fosfogesso encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de consistência da mistura

Amostra	LL	LP	IP
Solo	41	33	8
Mistura	41,50	32,77	8,73

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

Percebe-se que a mistura não atinge os requisitos mínimos para a construção de uma camada de base de aterro sanitário, já que o IP se encontra fora do intervalo para ambas as fontes (mesmo que muito próximo do necessário – 11 < IP), mas o LL se mostra adequado para a utilização dessa mistura (30 < LL < 60) (BOSCOV, 2008).

Para Boscov (2008), a permeabilidade pode ser diminuída de duas maneiras: aumentando energia de compactação, já que o peso específico seco máximo aumenta e teor de umidade ótimo diminui, ou aumentando o teor de umidade de compactação, visto que a estrutura do solo não atingiu seu máximo grau de dispersão na umidade ótima, ou seja, quando se aumenta a umidade de compactação, também há o aumento da dispersão das partículas (FONTOURA FILHO, 2019). Dessa forma, para solos de baixa plasticidade, quando a incorporação do gesso ocorre em maiores teores, o LL pode aumentar em virtude da absorção da água, fato que foi observado na mistura estudada com leve aumento no LL, IP e redução do LP.

Posteriormente, a mistura e o solo fino foram classificados pelos métodos SUCS e AASHTO como ambos pertencentes ao grupo dos siltes de baixa plasticidade ML e A-5, pelas respectivas classificações. Esse fato se mostra satisfatório para a utilização da mistura, já que esse solo fino já é utilizado em camadas de base de aterros sanitários e, mesmo após a substituição de 50% do solo para adição de 50% de fosfogesso, a granulometria das partículas e sua interação com a água não sofreram alterações significativas a ponto de modificar a categoria do solo.

Porém, no ensaio de compactação realizado no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da Universidade Federal de São Carlos (LabGeo/UFSCar), houve constatação de exsudação da água do corpo de prova, o que culmina em duas possibilidades: o teor de umidade está acima do ótimo, ou é característica inerente da mistura proveniente da inserção do fosfogesso. Em ambos os casos, para materiais que apresentam esse tipo de comportamento, mesmo depois de compactados podem se soltar da camada compactada com certa facilidade.

Nesse ensaio, a umidade ótima tem valor de 24,7% e um $\rho_{dmáx}$ de 1,441 g/cm^3. Esses dois valores indicam uma estrutura dispersa e, consequentemente, uma incapacidade de melhorar a permeabilidade com o aumento da umidade na compactação. Por essa razão, apenas o aumento da energia de compactação pode ser capaz de

diminuí-la, já que causa aumento da massa de sólidos em relação à massa de água pela diminuição do índice de vazios.

Além disso, outros 3 corpos de prova foram submetidos à compactação com diferentes umidades e, em todos os casos, houve expulsão de água. Esse fato também torna a segunda possibilidade verdadeira e, então, para melhor compreensão dos mecanismos de saída de água dos poros da mistura compactada, foram realizados estudos pelo ensaio de adensamento.

Segundo Boscov (2008), a permeabilidade diminui muito pouco com o aumento da tensão confinante e do gradiente hidráulico quando a tensão de pré-adensamento aplicada no ensaio triaxial é menor que a tensão aplicada na compactação. Os resultados de permeabilidade presentes na Tabela 4 confirmam essa hipótese. Ainda, percebe-se que os resultados não satisfazem o requisito mínimo de 10^{-9} m/s. Destaca-se que a amostra desse presente sofreu compactação em 3 camadas, com ranhuras entre elas para promover a aderência. Ou seja, mesmo diminuindo os vazios entre as partículas, a água pode ter sido exposta a caminhos preferenciais. Além disso, deve-se atentar ao fato de que há obtenção de permeabilidades uma a três vezes maiores em campo que as obtidas em laboratórios, que são ambientes controlados.

Tabela 4 - Resultados do ensaio triaxial para a permeabilidade

Gradiente Hidráulico	Tensão Confinante [kPa]	Permeabilidade Média [m/s]
20	30	$4{,}21 \times 10^{-8}$
30	40	$7{,}31 \times 10^{-8}$
40	50	$1{,}06 \times 10^{-7}$
40	100	$8{,}19 \times 10^{-8}$
40	150	$8{,}20 \times 10^{-8}$

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

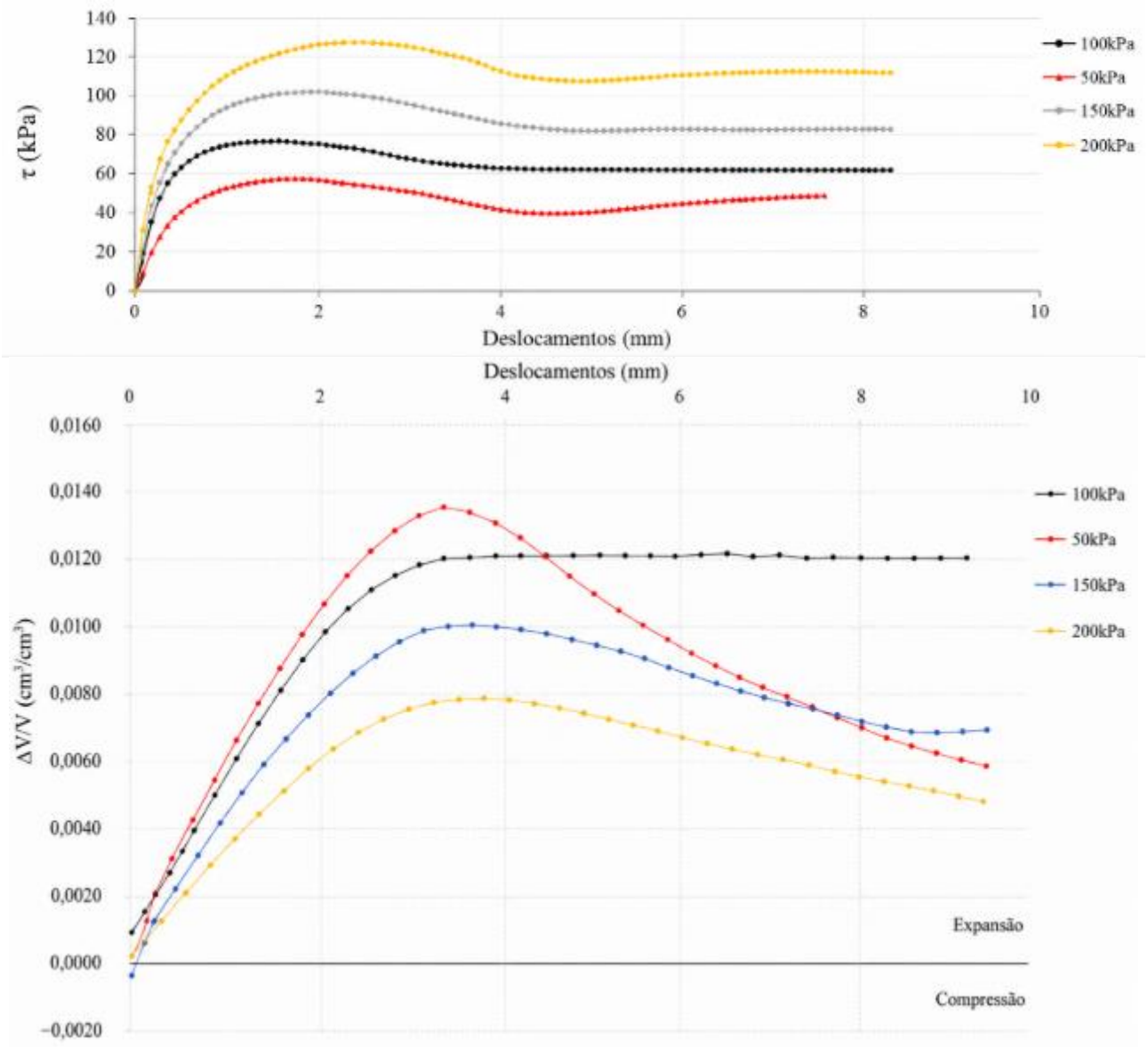
Em sequência, o coeficiente de adensamento somente pôde ser calculado para o Estágio 3, pelo Método de Casagrande (cv = 0,01436), já que nos outros estágios não houve adensamento secundário de forma pronunciada em 20 dias, fato ainda confirmado com o gráfico de índice de vazios pelo logaritmo da tensão, onde não houve estabilização da reta virgem mesmo com uma tensão de 640 kPa. Relacionando esse contexto com o aterro sanitário, o adensamento secundário somente ocorreria após o fim da vida útil do aterro. Também, a não linearidade do índice de vazios a partir da carga de 320 kPa pode indicar quebra dos grãos de fosfogesso que estavam floculados pela ação da água a partir dessa tensão.

A tensão de pré-adensamento foi calculada pelos métodos de Pacheco e Silva (50 kPa) e Casagrande (57,8 kPa), com pequena diferença proveniente da destreza do pesquisador, além dos índices de consolidação do ensaio cc (0,72563), cr (0,02) e cs (0,000217). Esses valores revelam uma expansão muito baixa mesmo com a realização de dois descarregamentos, o que indica menor probabilidade de fissuração da camada com possíveis diminuições de carga e, se for feita a compactação na umidade ótima, as características não-newtonianas do fosfogesso puro não devem implicar em prejuízos, já que o primeiro ensaio não foi observado exsudação, além de que em aterros sanitários a camada impermeabilizante não entra em contato com fluidos quando utilizada a geomembrana.

Finalmente, com os resultados do ensaio de cisalhamento apresentado na Figura 1, observam-se resistências de pico máximas moderadas, semelhante a solos pré-adensados. Porém, pela influência do fosfogesso, o qual se assemelha com um material normalmente adensado, não é possível afirmar se os picos são resultados da mistura realmente ser pré-adensada ou se é decorrência da quebra dos grãos devido à geometria em bastão das partículas de fosfogesso. De qualquer forma, esse comportamento frágil caracterizado por pico de tensão se torna um ponto preocupante para utilização da mistura em obras de caráter geotécnico.

Ademais, percebe-se uma resistência residual após a de pico que, juntamente com a detecção de uma expansão do corpo de prova, resulta em comportamento de areias compactas. Isso acontece porque quando o fosfogesso entra em contato com água, flocula-se gerando grãos de maiores dimensões, os quais são mobilizados, fazendo com que a mistura tenha comportamento semelhante a areia até a quebra desses grãos. Nessa exata fase, ocorre uma expansão no material e um pico de tensão. Após a quebra dos grãos de fosfogesso floculados, o solo passa a ter o comportamento de uma argila normalmente adensada, com resistência residual e uma redução na expansão, visualizada para deslocamentos a partir de 4mm e justificada pelo reajuste das partículas de fosfogesso, cujos formatos são lamelares.

Figura 1 - Cisalhamento direto para Tensão x Deslocamento e Deformação x Deslocamento



Fonte: da Autora, 2024.

No geral, a envoltória de tensões mostra que a mistura tem resultado coesivo análogo com areia compacta devido à boa coesão pela cimentação das partículas e comportamento semelhante a silte com a baixa plasticidade. Destaca-se que o fosfogesso diminui a coesão das partículas, pois a floculação prejudica a interação das partículas de menor diâmetro e aumenta a quantidade de água intersticial (MATOS, 2011), além de que as partículas de solo não se misturam com as do fosfogesso pois, como esse elemento se assemelha a silte, não há interação devido à inexistência cargas.

Nesse contexto, essa floculação sucede por ser um fluido não newtoniano, ou seja, o mesmo não retém a água, a qual fica sempre intersticial. Por essa razão, qualquer impacto provocado nele, a água sai pelos poros (bem como é observado em areias), se tornando um parâmetro desfavorável para utilização dessa mistura em camada de base de aterros sanitários.

4 CONCLUSÃO

Os resultados físicos e da permeabilidade mostraram que a mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso, apesar de muito próximos dos requisitos mínimos e do fosfogesso não alterar significativamente a granulometria, a mistura não satisfaz as condições de um solo destinado à camada de base de aterros sanitários.

Também, o adensamento sugere uma atenção ao tempo de consolidação em razão dos recalques que a estrutura da base do aterro irá realizar, já que o tempo para atingir o adensamento secundário aumenta com a quebra das partículas de fosfogesso ainda no adensamento primário. Ainda, o ensaio sugere baixa expansão, fato fundamental para que não se prejudique a permeabilidade da camada. Já para a resistência da mistura, a quebra das partículas de fosfogesso e seu comportamento a areias compactas inviabiliza a utilização nos aterros, já que sugere um desempenho frágil após a aplicação de cargas.

Sugere-se, então, futuros estudos que reduzam uma pequena quantidade de fosfogesso na mistura, já que para 50%, o coeficiente de permeabilidade chegou à ordem de 10^{-8} m/s, valor com pouca diferença do necessário de 10^{-9} m/s. Além disso, o uso de aditivos também pode melhorar a permeabilidade para essa mesma mistura. A energia de compactação também pode ser aumentada caso o estudo do comportamento do fosfogesso não resulte em prejuízos à estrutura do aterro sanitário, além de nova análise que se mostre positiva para os parâmetros de resistência.

AGRADECIMENTOS

A autora expressa sincera gratidão à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) por proporcionar o ambiente e os recursos necessários para a realização deste trabalho, especialmente ao Professor Fernando Henrique Martins Portelinha, que, com generosidade e disposição, esteve sempre pronto a auxiliar nos experimentos necessários, contribuindo de forma decisiva para o sucesso desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419. *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro, 7 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9604. *Solos – Condições exigíveis para abertura de poço de inspeção, de trincheira e para retirada de amostras - Suporte Sondagens e Ensaios Geotécnicos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14545. *Solos – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variavel*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16853. *Solo - Ensaio de adensamento unidimensional*. Rio de Janeiro.

ASTM International (1994). D. 3-9. ASTM 3080. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. Annual book of ASTM standards, v. 4, p. 290-295.

Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. São Paulo, Oficina de Textos, 2008.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/75

Caracterização Física e Química de um Solo Laterítico Estabilizado com Resíduo Grits

Angelo Dotto Ragagnin Prior
Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, angelodrprior@hotmail.com

Patricia Rodrigues Falcão
Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Dêreck Hummel Becher
Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, dereckhbecher@gmail.com

José Leonardo dos Santos
Graduando de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, js6400@hotmail.com

Magnos Baroni
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

RESUMO: O uso recorrente de agentes estabilizadores convencionais em solos, como o cimento Portland, envolve elevados custos energéticos e significativas emissões de CO_2, motivando a busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se o resíduo grits, subproduto da indústria de celulose, caracterizado por seu potencial para o melhoramento dos solos, devido à elevada presença de óxido de cálcio (CaO). O presente trabalho tem por objetivo caracterizar física e quimicamente um solo laterítico do Rio Grande do Sul, o resíduo grits e as misturas solo-grits, com teores de adição de 5, 10 e 15 %. As análises compreenderam distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação, granulometria a laser, limites de Atterberg, massa específica dos sólidos, ensaio de compactação e termogravimetria. Os resultados indicaram grande perda de massa entre 600°C e 800°C no grits, associada à decomposição de carbonato de cálcio. Verificou-se aumento do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima com a incorporação do resíduo para o ensaio de compactação, além de diminuição da fração argilosa e aumento das frações de silte e areia nas análises granulométricas; tais tendências de resultados são análogas às obtidas com a adição de cimento Portland. Com isso, verifica-se que o resíduo pode ser uma alternativa sustentável, além de contribuir para a pegada de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização, Resíduo, Sustentabilidade, Grits, Celulose, Emissão de $C0_2$.

ABSTRACT: The recurrent use of conventional stabilizing agents in soils, such as Portland cement, involves high energy costs and significant CO_2 emissions, motivating the search for more sustainable alternatives. In this context, grits residue stands out, a byproduct of the pulp industry, characterized by its potential for soil improvement due to the presence of calcium oxide (CaO). The present study aims to physically and chemically characterize a natural lateritic soil from Rio Grande do Sul, the grits residue, and soil-grits mixtures with contents of 5, 10, and 15%. The analyses included particle size distribution by sieving and sedimentation, laser particle size analysis, Atterberg limits, specific mass of solids, compaction test, and thermogravimetry. The results indicated a large mass loss between 600°C and 800°C in the grits, associated with the decomposition of calcium carbonate. An increase in the maximum dry apparent specific weight and a reduction in the optimum moisture content were observed with the incorporation of the residue in the compaction test, in addition to a decrease in the clay fraction and an increase in the silt and sand fractions in the granulometric analyses; such trends are analogous to those obtained with the addition of Portland cement. Thus, it is verified that the residue may be a sustainable alternative, in addition to contributing to the carbon footprint.

KEYWORDS: Stabilization, Residue, Sustainable, Grits, Pulp, Emissions of CO_2.

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2023) afirma que, ao passo que são aumentadas as emissões de gases do efeito estufa, tornam-se mais recorrentes eventos climáticos extremos. Exemplo disso, foram as precipitações que o sul do Brasil sofreu em 2024, gerando inúmeros problemas geotécnicos. Segundo Cirolini et al. (2024), apenas entre os dias 01 e 05 de maio de 2024, ocorreram 20 deslizamentos de grande proporção na região Centro-Oeste do Rio Grande do Sul. Diante da recorrência de eventos climáticos extremos, a resistência natural do solo tende a ser reduzida, necessitando a implementação de soluções geotécnicas. Portanto, nota-se a importância de pesquisas que abordam possíveis maneiras de melhoramento de solos para a utilização em obras geotécnicas (FILHO et al., 2022; FRATOLOCCHI et al., 2020; ATTOM et al., 2018; CONSOLI et al., 2013; INDIRAMMA et al., 2019).

De forma convencional, a melhoria das propriedades mecânicas dos solos é realizada por meio da incorporação de estabilizantes cimentantes, tais como cal, cimento e cinza volante (DIAMBRA et al., 2018). Contudo, a fabricação desses insumos demanda alto consumo de energia e está relacionada a significativas emissões de CO_2 (DUXSON et al., 2007). Essas observações têm estimulado o desenvolvimento e a adoção de materiais alternativos, ambientalmente sustentáveis e com menor pegada ecológica (SUJATHA et al., 2021). Nesse contexto, destaca-se o resíduo grits, subproduto sólido do processo Kraft da indústria de celulose, caracterizado por sua composição predominantemente cálcica, o que viabiliza seu potencial uso como agente de estabilização de solos. O grits é um resíduo sólido de coloração acinzentada e granulometria diversificada (MAIA et al., 2014). Em geral, o interesse para utilização de grits em solos se deve aos seus constituintes químicos, em especial o óxido de cálcio (CaO), que demonstra um grande potencial para o melhoramento dos solos (PEREIRA et al., 2006).

O resíduo grits é um subproduto não reutilizável dentro do processo de produção da celulose e, em geral, é alocado em aterros industriais. A disposição em aterros é indesejável, devido aos custos para a implantação e manutenção do maciço (MAEDA et al., 2011; BELLOTE et al., 1998). Nessa perspectiva, o emprego do grits para o melhoramento dos solos mostra-se relevante, visto que pode auxiliar não só no melhoramento mecânico, mas também em perspectivas ambientais e econômicas por parte das empresas geradoras. Conforme postulado por Torres et al. (2020), a cada tonelada de celulose produzida cerca de 5 kg de grits são gerados. O Brasil produziu, aproximadamente, 25 milhões de toneladas de celulose em 2022 (IBÁ, 2023), o que representaria 125 mil toneladas de grits que poderiam ser utilizadas para a estabilização dos solos.

O presente trabalho tem por objetivo caracterizar física e quimicamente um solo laterítico natural do Rio Grande do Sul, o resíduo grits proveniente de uma indústria de celulose do sul do Brasil e as misturas solo-grits com teores de 5, 10 e 15%. Para isso, foram realizadas análises granulométricas a laser, termogravimetria, granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg, massa específica dos sólidos e ensaios de compactação, de tal forma a possibilitar uma relevante caracterização do solo melhorado com este material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo laterítico em estudo é oriundo do município de Cruz Alta, do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica da Universidade de Cruz Alta, no Rio Grande do Sul, no qual foram coletadas amostras deformadas no primeiro metro de profundidade. O resíduo grits é proveniente de uma fábrica de celulose da região sul do Brasil, sendo a coleta realizada pelos próprios colaboradores e encaminhada para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. O grits recebido possuía uma granulometria variada, desde pedregulhos até frações mais finas. Assim, o resíduo foi submetido a um moinho de bolas por 1 hora e passado na peneira de n° 100 (0,15 mm), de modo a apresentar a configuração ilustrada na Figura 1 (c).

A priori, foram realizadas as preparações de cada material para a posterior mistura. O solo foi preparado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2024), sendo este seco previamente ao ar até atingir sua umidade

higroscópica, destorroado e passado na peneira de n° 10 (diâmetro equivalente a 2,00 mm). O grits passante na peneira n° 100 foi armazenado em ambiente seco com temperatura verificada, sendo contida na margem de 20°C ± 3°C. Após a preparação e acondicionamento dos materiais, foram realizadas as adições de grits ao solo laterítico, as quais foram de 5% de grits, 10% de grits e 15% de grits.

2.2 Plano experimental

Em relação às investigações executadas para o subproduto, avaliou-se o tamanho das partículas do material, por meio da análise granulométrica a laser, e as características térmicas do resíduo pelo ensaio de termogravimetria. Já as análises do solo, bem como das misturas solo-grits, compreenderam os limites de Atterberg (ABNT, 2025a; ABNT, 2025b) análise granulométrica (ABNT, 2025c) e massa específica dos sólidos (ABNT, 2025d).

Os ensaios de compactação para a energia normal foram baseados na normativa DNIT 228 (2023), a qual preconiza a compactação em equipamento de pequeno porte. Tal procedimento foi escolhido,pois, quando comparado com as metodologias tradicionais (como exemplo, Proctor Normal), necessita de uma quantidade menor de material para sua realização. A comparação entre as metodologias de compactação para o solo de referência é apresentada por Becher et al. (2024). Para isso, foi utilizado um molde cilíndrico de 50,0 mm de diâmetro e 130,0 mm de altura, soquete de aço leve de 2270,0 g e altura de queda de 30,5 cm. O número de golpes correspondente para solos lateríticos, nesta energia de compactação, é de 10 golpes, sendo estes aplicados metade em cada face. Para cada ponto da curva de compactação foi separada uma quantidade de 190,0 g de solo, com umidade de 20% ± 1 e passante na peneira n° 10. Com o solo nesta condição, foram adicionadas as porcentagens de grits supracitadas, mantendo as misturas dentro de sacos plásticos por 1 hora, a fim de garantir sua homogeneização. Posteriormente, adicionava-se a água ou não a depender do ponto da curva em análise e realizava-se a compactação do material. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do molde, pesado e anotadas suas dimensões, como também foram retiradas parcelas do seu interior para a aferição da umidade correspondente.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização do grits

A Figura 1 (a) apresenta a análise granulométrica a laser do resíduo, após sua moagem no moinho de bolas. A partir desta, atenta-se para a distribuição de partículas finas (<1000 µm) que compõem o material. Além disso, foi possível identificar o diâmetro equivalente médio das partículas, de 176,83 µm. Os diâmetros equivalentes a 10, 50 e 90% de distribuição foram de 45,91, 133,87 e 364,81 µm, respectivamente.

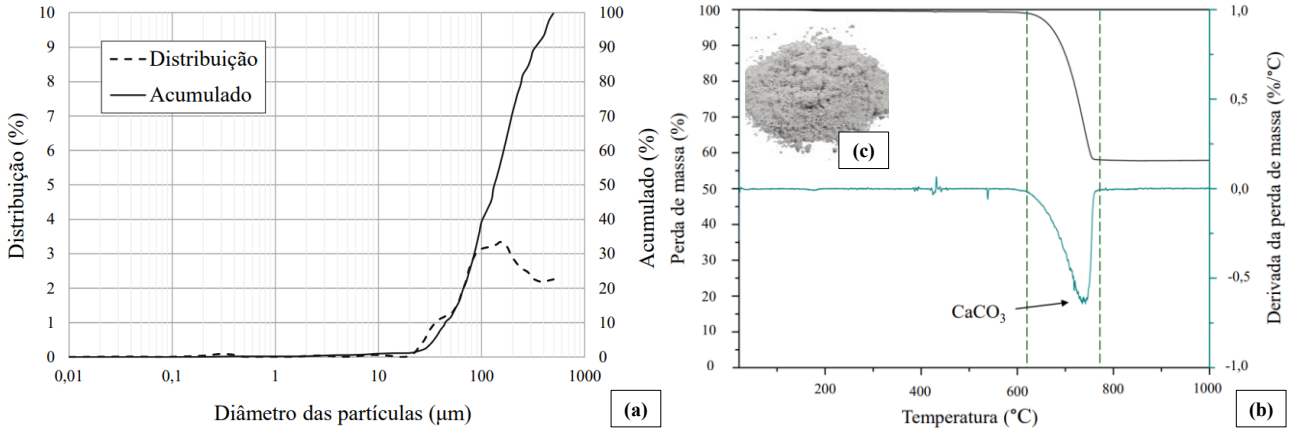


Figura 1. (a) Análise granulométrica a laser; (b) Termogravimetria; (c) Resíduo grits.

A Figura 1 (b) apresenta os resultados da análise termogravimétrica do resíduo grits. A partir desta é possível observar uma perda de massa de, aproximadamente, 93,2% nas temperaturas entre 600°C e 800°C. Esta significativa redução de massa está atrelada, principalmente, à decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), visto que grande parte da composição do resíduo grits é oriunda do CaO, conforme postulado por Oliveira (2024) e Torres et al. (2020). Essas características evidenciam o potencial do resíduo para estabilização de solos argilosos, devido à sua capacidade de troca catiônica e formação de compostos cimentantes.

3.2 Caracterização do solo e das misturas

As análises granulométricas das misturas são demonstradas na Figura 2 (a). As curvas granulométricas foram realizadas com defloculante (CD) e sem defloculante (SD), sendo usado como agente dispersor o hexametafosfato de sódio. Diante disso, é possível verificar que o solo se trata de uma argila areno-siltosa, a qual possui um alto teor de partículas finas, com 65% de argila e 16% de silte, corroborando o índice de plasticidade elevado de 16% (Tabela 1). Os solos lateríticos são formados por processos de lixiviação, que resultam na concentração de materiais cimentantes, como óxidos e hidróxidos hidratados de ferro e alumínio (PAIGEGREEN et al., 2015; FALCÃO et al., 2023). Estes elementos contribuem para a formação de agregações entre as partículas. Dessa forma, pode-se visualizar que, em todos os casos, a utilização de hexametafosfato de sódio auxiliou na dispersão destas agregações, visto que aumentou significativamente a porcentagem de argila nas misturas.

Ressalta-se que, além das cimentações naturais oriundas do processo de formação do solo laterítico, as adições atuaram como um agente cimentante. Esses materiais, ao se hidratarem, formam compostos que preenchem os vazios e conectam as partículas do solo. Maia et al. (2014) realizaram análises granulométricas de um solo com incorporações de grits de 5, 10 e 20%, os autores registraram uma diminuição da quantidade passante na peneira de n° 200 à medida que foi elevada a porcentagem. Para a presente pesquisa, ocorreu um mecanismo semelhante, porém, não para a peneira n° 200, mas sim para diâmetros menores que 0,002 mm (argila).

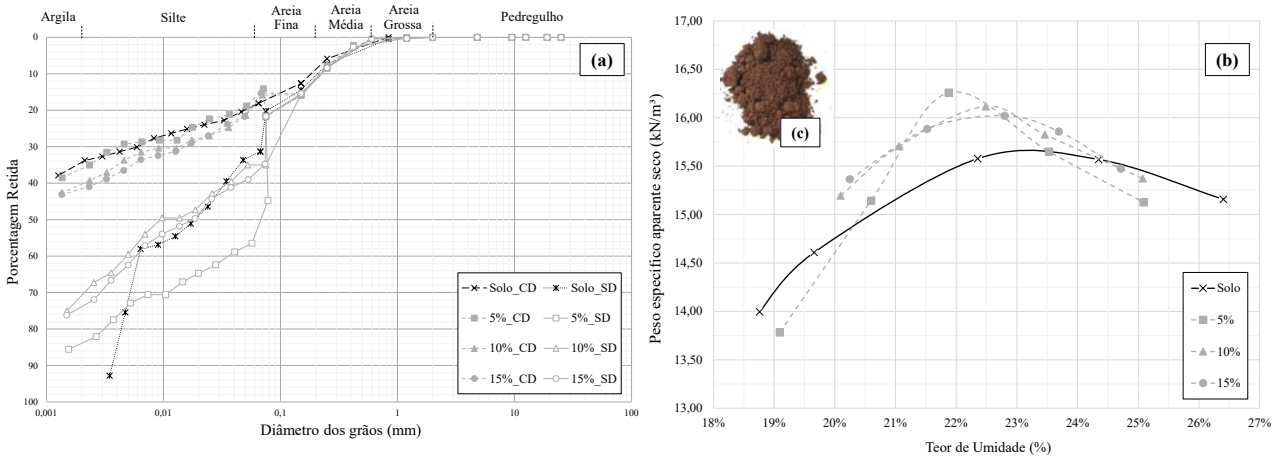


Figura 2. (a) Análise granulométrica; (b) Curvas de compactação; (c) Solo laterítico analisado sem adições.

A Figura 2 (b) contém os resultados dos ensaios de compactação. Diante do exposto, é possível inferir que em todas as misturas existiu um aumento do peso específico aparente seco máximo (γ_d) e uma diminuição da umidade ótima ($W_{ót}$) em relação ao solo, sem adições. Tal comportamento é também evidenciado por Machado et al. (2003) ao incorporarem 10% de grits com diferentes tratamentos térmicos em um solo. Os autores observaram, em todos os casos, um aumento do γ_d e uma diminuição da $W_{ót}$. Além disso, Machado et al. (2007) usaram adição de 24% de grits para dois tipos de solo, um com textura argilosa e outro arenosa, para as energias de compactação intermediária e modificada. No caso do solo argiloso, para os dois tipos de energia de compactação, o γ_d aumentou e a $W_{ót}$ diminuiu em relação ao solo natural, bem como demonstrado no presente estudo.

Cabe mencionar que, ao aumentar o teor de resíduo de celulose de 5%, para 10% e 15%, o $W_{ót}$ aumentou de 21,9%, para 22,1% e 22,5%, respectivamente. Em contraste, o peso específico aparente seco máximo diminuiu de 16,30, para 16,25 e 16,20 kN/m³, respectivamente. Nesse contexto, conforme obtido no ensaio de termogravimetria, o resíduo usado apresenta um percentual de 93,2% de $CaCO_3$, o que faz com que seus resultados sejam comparáveis aos da cal, que também contém uma quantidade significativa desse componente. Tang et al. (2023) verificaram que o aumento da dosagem de cal hidratada resulta em um aumento no teor ótimo de umidade e uma leve diminuição no γ_d, assim como identificado na Figura 2 (b). Esses resultados são consistentes com os encontrados por Osinubi (1998) e Millogo et al. (2012), que observaram tendências semelhantes na relação entre a adição de estabilizantes com alto percentual de $CaCO_3$ e as propriedades do solo.

A Tabela 1 evidencia os resultados dos limites de consistência. Ao adicionar 10% e 15% de resíduo, o limite de plasticidade (LP) diminuiu, em termos totais, 17,8% e 20,4%, com relação ao incremento de 5% de grits, respectivamente. Já quando ponderado o limite de liquidez (LL), estes mesmos decréscimos foram de 24,7% e 25,2%. Pereira (2005) avaliou os limites de consistência para dois solos com incrementos de grits, no caso do solo com textura mais argilosa, para porcentagens de grits entre 4 e 28%, o LP manteve-se constante, sem grandes variações, corroborando os resultados apresentados na Tabela 1, na qual a adição de grits resultou em um desvio padrão de 8,5. Considerando o estudo supracitado, quando mencionado o LL, existiu um decréscimo com relação à amostra de referência (solo) e posteriormente, uma estabilização nos valores de LL. Para o presente estudo, a estabilização do LL também ocorreu após uma certa quantidade de resíduo, entretanto, ao invés de um decréscimo com relação ao solo, para a porcentagem de 5%, ocorreu um acréscimo.

Tabela 1. Limites de consistência e peso específico real dos grãos.

Material	Limite de plasticidade (%)	Limite de liquidez (%)	Índice de plasticidade (%)	Peso específico real dos grãos (kN/m³)
Solo	30,0	46,0	16,0	27,32
5%	30,9	58,7	27,8	25,47
10%	25,4	44,2	18,9	25,59
15%	24,6	43,9	19,3	25,69

A Tabela 1 também apresenta os resultados de peso específico real dos grãos (γ_s). O peso específico real dos grãos de 27,32 kN/m³ para o solo justifica-se em virtude da presença de óxidos de ferro, os quais tendem a elevar a massa específica dos sólidos. Somada a isso, a classificação visual de um latossolo vermelho-escuro com textura argilosa (Figura 2 (c)), corrobora com materiais oriundos do intemperismo de rochas basálticas e com as características descritas ao longo do artigo. Nessa perspectiva, observa-se que o incremento de grits tende a reduzir o γ_s em relação ao solo isolado. A amostra com 5% de grits apresenta um γ_s de 25,47 kN/m³, representando uma redução de, aproximadamente, 6,8%, em relação ao valor de 27,32 kN/m³ do solo de referência. Quando a quantidade de grits aumenta para 15%, o γ_s é de 25,69 kN/m³, resultando em uma redução de 6,0%, em comparação ao solo original. Pereira (2005) afirmou que essa queda no valor do γ_s é esperada, uma vez que o resíduo apresenta um baixo valor para esse índice.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo caracterizar física e quimicamente um solo laterítico, o resíduo grits e as misturas solo-grits com teores de 5%, 10% e 15%, visando avaliar o potencial do resíduo como agente estabilizante. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização granulométrica, termogravimetria, limites de Atterberg, massa específica dos sólidos e ensaios de compactação.

Os resultados indicaram que o grits apresenta predominância de partículas finas e composição majoritariamente associada ao $CaCO_3$, evidenciada pela significativa perda de massa observada na análise termogravimétrica entre 600°C e 800°C. Esse comportamento confirma a natureza predominantemente cálcica do resíduo e reforça seu potencial de atuação como agente modificador das propriedades físico-químicas do solo.

A incorporação do resíduo promoveu alterações na distribuição granulométrica das misturas, com redução da fração argilosa e aumento relativo das frações de silte e areia, além de evidenciar efeitos associados à agregação e à cimentação entre partículas, especialmente quando analisadas as curvas com e sem defloculante.

Nos ensaios de compactação, verificou-se que a adição de grits resultou em aumento do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima em relação ao solo de referência. Entretanto, com o aumento progressivo do teor de grits, observou-se elevação da umidade ótima e pequena redução do peso específico seco máximo, comportamento compatível com materiais ricos em cálcio.

Quanto aos limites de consistência, a incorporação de grits promoveu alterações tanto no limite de liquidez quanto no limite de plasticidade, evidenciando redução progressiva desses parâmetros para teores mais elevados do resíduo, com tendência de estabilização dos valores nas maiores dosagens avaliadas. Além disso, observou-se diminuição do peso específico real dos grãos com o aumento do teor de grits, comportamento esperado em função da menor massa específica do resíduo em comparação ao solo laterítico.

De modo geral, os resultados demonstram que o resíduo grits possui potencial técnico para aplicação na estabilização de solos lateríticos, contribuindo simultaneamente para o aproveitamento de um subproduto industrial e para a mitigação de impactos ambientais associados à sua disposição em aterros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo à pesquisa e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo o apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025a). NBR 6459. Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025b). NBR 7180. Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025c). NBR 7181. Solo - Análise Granulométrica. Rio de janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025d). NBR 17212. Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0mm. Rio de Janeiro.

Attom, M. F., El-Emam, M. M., Khan, Z. H., Vandanapu, R. (2018) Reducing the collapsibility of clay using a cement-polymeric fibre admixture. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 171, p. 38-48.

Becher, D. H., Falcão, P., Pascoal, P. T., Baroni, M., Cirolini, M., Nascimento, L. A., Prior, A. D. R. (2024) Diferentes metodologias de compactação em dois solos do Rio Grande do Sul, Brasil: análise no impacto de parâmetros. Revista Caderno Pedagógico, 21(7).

Bellote, A. F. J., Silva, H. D., Ferreira, C. A., Andrade, G. C. (1998) Resíduos da indústria da celulose em plantios florestais. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 37, p. 99-106.

Cirolini, M. F., Pascoal, P. T., Becher, D. H., Baroni, M. (2024) Resiliência climática sob ponto de vista da Geotecnia de infraestrutura rodoviária. *Revista Estradas*.

Consoli, N. C., Festugato, L., Rocha, C. G., Cruz, R. C. (2013) Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: Influence of types of portland cement. *Construction and Building Materials*, 49, p. 591-597.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023). DNIT 228–ME. Solos - Ensaios de compactação em equipamento miniatura - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

Diambra, A., Festugato, L., Ibraim, E., Peccin da Silva, A., Consoli, N. C. (2018) Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. *Soils and Foundations*, 58(1), p. 199-211.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., van Deventer, J. S. J. (2007) Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), p. 2917-2933.

Falcão, P., Baroni, M., Masutti, G. C., Pinheiro, R. J. B., Fagundes, D. F. (2023) Assessment of the impact of inundation on the strength of lateritic and collapsible soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, p. 4761-4773.

Filho, H. C. S., Miguel, G. D., Consoli, N. C. (2022) Durability response of a cemented clayey sand over a wide range of porosities and cement contents. *Cleaner Materials*, 5, p. 100-117.

Fratalocchi, E., Sante, M., Mazzieri, F., Pasqualini, E. (2020) Prediction of shear strength parameters in soil–lime mixture design - part 2: hydrated lime. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 3, p. 159-169.

Indiramma, P., Sudharani, C., Needhidasan, S. (2020) Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment – An experimental study. *Materialstoday: Proceedings*, 22, p. 694-700.

Industria Brasileira de Árvores - IBÁ. (2023) *Relatório Anual IBÁ, 2023*. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatórios>. Acesso em: setembro. 2024.

Machado, C. C., Pereira, R. S., Pires, J. M.M. (2003) Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. *Revista Árvore*, 27(4).

Machado, C. C., Pereira, R. S. P., Lima, D. C., Carvalho, C. A. B., Pires, D. M. (2007) Caracterização tecnológica de mistura solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas. *Revista Árvore*, 31(3), p. 487-494.

Maeda, S., Silva, H. D., Costa, E. R. O., Bognola, I. (2011) Aplicação de lodo celulósico em plantio de pínus. *Colombo: Embrapa Florestas*.

Maia, E. S., Souza, M. M., Aguiar, M. F. P., Oliveira, F. H. L. (2014) Estudo do melhoramento de solo com utilização de resíduo de indústria de celulose. *Revista Tecnologia, Fortaleza*, 35(2), p. 78–88.

Millogo, Y., Morel, J., Traoré, K., Ouedraogo, R. (2012) Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials*, 26(1), p. 663-669.

Paigegreen, P., Pinard, M., Netterberg, F. (2015) A review of specifications for lateritic materials for low volume roads. *Transportation Geotechnics*, 5, p. 86-98.

Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática. (2023) *Mudança do Clima, 2023*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-omcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf>. Acesso em: outubro. 2025.

Pereira, R.S. (2005) *Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais*. Universidade Federal de Viçosa / UFV.

Pereira, R. S., Machado, C. C., Lima, D. C. (2006) Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica. *Revista Árvore*, 30(3), p. 421-427.

Oliveira, Y. S., Costa, E. B. C., Motta, L. A. (2024) Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: caracterização e resistência mecânica. *Ambiente Construído*, 24.

Osinubi, K. J. (1998) Permeability of lime-treated lateritic soil. *Journal of Transportation Engineering*, 124(5).

Sujatha, E. R., Atchaya, S., Sivasaran, A., Keerdthe, R. S. (2021) Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—an eco-friendly alternative to traditional stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, p. 1157-1167.

Tang, K., Zeng, F., Shi, L., Zhu, L., Chen, Z., Zhang, F. (2023) Mechanical behavior of hydrated-lime-liquid-stabilizer-treated granular lateritic soils. *Sustainability*, 15(10).

Torres, C. M., Silva, C.M., Pedroti, L.G., Fernandes, W. E. H., Ballotin, F. C., Zanuncio, A. J. V. (2020) Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, p. 851-861.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/76

Colapso de Solos em Ambientes Cársticos: Avaliação Geotécnica e Ambiental de Lapão (BA)

Aline Rodrigues de Cerqueira
Engenheira Civil, Barra do Mendes, Bahia, Brasil, alinetec10@hotmail.com

Eduardo Antonio Maia Lins
Professor Adjunto, IFPE, Recife, Brasil, eduardomaialins@gmail.com

RESUMO: O presente estudo analisa o colapso de solos na cidade de Lapão, Bahia, fenômeno associado à exploração intensiva e irregular de águas subterrâneas destinadas à irrigação agrícola. Inserida sobre o aquífero Bambuí, a região apresenta ambiente cárstico composto por rochas calcárias suscetíveis à dissolução e instabilidade estrutural. A perfuração indiscriminada de poços, somada à redução pluviométrica regional e à ausência de controle técnico, promoveu rebaixamento significativo do nível freático, reduzindo a sustentação hidráulica das cavidades subterrâneas e desencadeando dolinas de colapso, fissuras no terreno e danos em edificações urbanas. A investigação integrou métodos de geotecnia ambiental, incluindo levantamentos de eletrorresistividade e sondagens rotativas executadas pelo Serviço Geológico do Brasil e pela Consominas Engenharia. As análises geofísicas identificaram zonas de baixa resistividade (<500 Ω·m), associadas a calcários alterados e fraturados, enquanto os ensaios geotécnicos indicaram elevada condutividade hidráulica, fraturamento intenso e evidências de carstificação ativa. Fatores antrópicos adicionais, como infiltração de esgotos, ausência de saneamento e sobrecarga construtiva, intensificam a subsidência do terreno. O fenômeno é interpretado como colapso de solos metaestáveis decorrente da perda de poropressão e do rearranjo estrutural do maciço. Recomenda-se controle de captação subterrânea, implantação de saneamento, investigações geotécnicas prévias e zoneamento de risco. O caso evidencia a necessidade de gestão integrada dos recursos hídricos e do planejamento urbano em áreas cársticas.

PALAVRAS-CHAVE: Colapso de solos; Carste; Dolinas; Águas subterrâneas; Geotecnia ambiental.

ABSTRACT: This study investigates soil collapse in the municipality of Lapão, Bahia, Brazil, a phenomenon associated with intensive and irregular groundwater extraction for agricultural irrigation. The area is located over the Bambuí aquifer and is characterized by a karstic geological setting predominantly composed of limestone rocks, which are highly susceptible to dissolution and structural instability. The uncontrolled drilling of wells, combined with reduced rainfall and lack of technical management, caused a significant groundwater table drawdown, leading to loss of hydraulic support of underground cavities and triggering sinkholes, ground fissures, and structural damage to urban buildings. The investigation integrated environmental geotechnical approaches, including electrical resistivity surveys and rotary drilling. Geophysical results identified low-resistivity zones (<500 Ω·m) associated with weathered and fractured limestone, while borehole data indicated high hydraulic conductivity, intense fracturing, and active karstification processes. Additional anthropogenic factors, such as sewage infiltration, absence of sanitation systems, and structural overloading, further intensified ground subsidence. From a geotechnical perspective, the process is interpreted as the collapse of metastable soils caused by pore-pressure reduction and structural rearrangement of the rock mass. Recommended measures include groundwater abstraction control, sanitation implementation, mandatory geotechnical investigations, and land-use zoning. The case highlights the need for integrated groundwater management and preventive urban planning in karst environments.

KEYWORDS: Soil collapse; Karst; Sinkholes; Groundwater; Environmental geotechnics.

1. INTRODUÇÃO

Terrenos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas figuram entre os ambientes geotécnicos mais complexos e desafiadores para a ocupação humana, em virtude da elevada heterogeneidade estrutural,

anisotropia hidráulica e intensa variabilidade espacial das propriedades mecânicas do maciço. A dissolução química do calcário, controlada pela interação entre água, dióxido de carbono e fraturas estruturais, promove a formação progressiva de vazios subterrâneos, condutos preferenciais de fluxo, cavernas e dolinas, configurando o relevo cárstico. Esse processo resulta em significativa redução da continuidade do meio rochoso, comprometendo sua capacidade de suporte e favorecendo a ocorrência de subsidências diferenciais e colapsos abruptos da superfície (Ford; Williams, 1989; White, 1988).

Sob a ótica hidrogeológica, aquíferos cársticos distinguem-se por apresentar elevada condutividade hidráulica, regime de escoamento predominantemente turbulento em condutos e forte sensibilidade às variações do nível freático. Pequenas alterações no balanço hídrico podem desencadear respostas rápidas no sistema, modificando o estado de tensões efetivas e a estabilidade das cavidades subterrâneas (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). O bombeamento excessivo de água subterrânea, prática recorrente em regiões agrícolas, promove o rebaixamento piezométrico, reduz a poropressão e elimina o suporte hidráulico que auxilia na sustentação do teto das cavidades, favorecendo processos de ruptura progressiva e subsidência do terreno. Assim, intervenções antrópicas passam a atuar como gatilhos que aceleram mecanismos geomorfológicos originalmente graduais.

Do ponto de vista geotécnico, o comportamento de solos e maciços metaestáveis em ambientes cársticos pode ser interpretado à luz do conceito de colapso estrutural. Solos colapsíveis são aqueles que, em condição parcialmente saturada, mantêm estrutura aparente estável, mas, quando submetidos à molhagem ou a mudanças no estado de tensões, sofrem rearranjo abrupto das partículas, ocasionando redução volumétrica expressiva e recalques súbitos (Teixeira, 1993). Em substratos calcários fraturados, esse fenômeno é potencializado pela presença de vazios, zonas dissolvidas, perda de cimentação carbonática e elevada permeabilidade, o que facilita a infiltração de água e a progressão do intemperismo químico. Consequentemente, fundações superficiais e obras lineares tornam-se particularmente vulneráveis a deformações diferenciais, trincas estruturais e falhas localizadas.

No Brasil, formações carbonáticas do Grupo Bambuí, amplamente distribuídas no Nordeste e Centro-Oeste, apresentam histórico de instabilidades geotécnicas relacionadas à carstificação ativa e à exploração intensiva de águas subterrâneas. A combinação entre clima semiárido, baixa recarga natural e uso agrícola irrigado favorece a superexploração hídrica, resultando em rebaixamento contínuo do lençol freático e agravamento dos processos de subsidência. Além disso, a expansão urbana frequentemente ocorre sem zoneamento geotécnico adequado, incorporando áreas suscetíveis a colapsos, infiltração de efluentes domésticos e sobrecarga construtiva, fatores que intensificam a dissolução calcária e a instabilidade do maciço (Kohler, 1995; Christofoletti, 1980).

Esse quadro é particularmente evidente no município de Lapão, Bahia, inserido sobre o aquífero Bambuí e caracterizado por economia fortemente dependente da agricultura irrigada. Nas últimas décadas, a redução dos índices pluviométricos, associada à perfuração indiscriminada de poços tubulares profundos, promoveu regime de superexploração hídrica e acentuado rebaixamento piezométrico regional. Como consequência, têm sido registrados episódios recorrentes de fissuras no pavimento, recalques diferenciais, danos em edificações e formação de dolinas de colapso tanto em áreas rurais quanto no perímetro urbano. Investigações geofísicas e sondagens diretas evidenciam maciços calcários intensamente fraturados, zonas de baixa resistividade elétrica associadas a rochas alteradas e elevada condutividade hidráulica, confirmando a elevada suscetibilidade do terreno a processos de instabilidade estrutural.

Nesse contexto, a compreensão integrada entre geologia, hidrogeologia e mecânica dos solos torna-se fundamental para o diagnóstico e a mitigação de riscos. Abordagens de geotecnia ambiental, associando métodos indiretos - como eletrorresistividade - a investigações diretas por sondagens rotativas, permitem caracterizar a distribuição espacial de vazios, zonas alteradas e descontinuidades estruturais, subsidiando o zoneamento de risco e o planejamento territorial. Assim, o presente trabalho tem por objetivo analisar, sob enfoque geotécnico e hidrogeotécnico, os mecanismos responsáveis pelo colapso de solos em Lapão, propondo diretrizes técnicas para a gestão sustentável do uso da água subterrânea e para a ocupação segura de terrenos cársticos, contribuindo para a prevenção de danos estruturais e para a resiliência urbana..

2. METODOLOGIA

2.1 Delineamento metodológico e estratégia de investigação

O estudo foi desenvolvido segundo abordagem integrada de geotecnia ambiental, estruturado como estudo de caso aplicado, com caráter exploratório, descritivo e explicativo, visando compreender os mecanismos físico-mecânicos e hidrogeológicos responsáveis pelo colapso do terreno em ambiente cárstico urbano. Terrenos carbonáticos apresentam elevada heterogeneidade estrutural, anisotropia hidráulica e presença de vazios dissolvidos, o que inviabiliza a caracterização confiável por métodos isolados. Assim, recomenda-se a integração de técnicas indiretas e diretas para reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade do diagnóstico geotécnico (Ford; Williams, 1989).

Nesse contexto, adotou-se estratégia multiproxy, combinando levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, sondagens rotativas com ensaios hidráulicos e análise hidrogeológica regional, permitindo correlacionar propriedades elétricas, parâmetros geomecânicos e comportamento do aquífero. Tal integração metodológica é amplamente indicada em investigações de risco geotécnico em meios cársticos, dada a forte variabilidade espacial das propriedades do maciço (White, 1988).

2.2 Levantamento de dados secundários e reconhecimento geotécnico de campo

A primeira etapa consistiu na compilação de dados secundários referentes à pluviometria histórica, cadastro de poços tubulares, registros de níveis d'água, relatórios técnicos, laudos estruturais e mapeamentos prévios de ocorrências de subsidência. Esses dados subsidiaram a análise do balanço hídrico regional e a identificação de tendências de superexploração do aquífero.

Paralelamente, realizou-se reconhecimento geológico-geotécnico de campo, com inspeções sistemáticas para registro de fissuras no pavimento, recalques diferenciais, danos em edificações, surgimento de dolinas e pontos de infiltração de efluentes. Esse procedimento permitiu selecionar áreas críticas para investigação detalhada e estabelecer correlações preliminares entre uso do solo, cargas antrópicas e manifestações de instabilidade, prática recomendada em avaliações de risco geotécnico urbano.

2.3 Investigação geofísica por eletrorresistividade

A caracterização indireta do subsolo foi conduzida por meio do método da eletrorresistividade, técnica amplamente empregada em estudos geotécnicos e ambientais por sua sensibilidade a variações de saturação, porosidade, fraturamento e grau de alteração mineralógica (Ward, 1990; Telford *et al.* 1990). O método baseia-se na injeção de corrente elétrica no terreno e na medição das diferenças de potencial geradas, permitindo estimar a resistividade aparente dos materiais.

Foram executados perfis utilizando arranjo dipolo–dipolo, cuja geometria proporciona elevada resolução lateral e é particularmente eficaz na identificação de feições cársticas, tais como vazios, condutos dissolvidos e zonas fraturadas. Os dados coletados foram submetidos a inversão bidimensional para obtenção de seções geoelétricas, possibilitando distinguir:

- baixas resistividades (< 500 Ω·m), associadas a calcários alterados, fraturados ou saturados;
- resistividades intermediárias, relacionadas a rochas parcialmente competentes;
- valores elevados, compatíveis com maciços preservados ou cavidades secas.

Essa etapa permitiu mapear descontinuidades estruturais e orientar a locação das sondagens diretas.

2.4 Sondagens rotativas e caracterização geomecânica do maciço

Com vistas à validação das anomalias geofísicas, executaram-se sondagens rotativas com recuperação contínua de testemunhos, método consagrado para descrição litológica e avaliação da qualidade do maciço rochoso. A integridade estrutural foi quantificada por meio do índice Rock Quality Designation (RQD), parâmetro proposto por Deere (1964) para mensurar o grau de fraturamento e amplamente empregado na classificação geomeânica de rochas.

Durante a perfuração foram registrados grau de alteração, espaçamento de fraturas, zonas de perda de recuperação, ocorrência de vazios e preenchimentos argilosos, indicadores típicos de carstificação ativa. Ensaios de perda d'água sob pressão foram realizados para estimativa da condutividade hidráulica, conforme procedimentos descritos por Hoek; Bray (1981), permitindo avaliar a permeabilidade do maciço e sua suscetibilidade à percolação e dissolução progressiva.

Esses parâmetros forneceram base objetiva para caracterização do comportamento mecânico e hidráulico do substrato carbonático.

2.5 Análise hidrogeológica e fundamentação mecânica

A interpretação hidrogeológica baseou-se na correlação entre dados de captação, níveis estáticos e precipitação regional, permitindo inferir tendências de rebaixamento piezométrico associadas ao bombeamento intensivo. O comportamento do sistema foi analisado à luz dos princípios clássicos do fluxo subterrâneo e da teoria das tensões efetivas, segundo a qual:

$$\sigma' = \sigma - u \tag{1}$$

onde σ' representa a tensão efetiva, σ a tensão total e u a poropressão. A redução da pressão neutra decorrente do bombeamento implica aumento das tensões transmitidas ao arcabouço sólido, favorecendo instabilidades estruturais (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). Em meios cársticos, essa condição promove perda de sustentação hidráulica das cavidades e pode deflagrar subsidências e colapsos localizados.

2.6 Integração espacial e modelo conceitual de instabilidade

Os resultados geofísicos, geotécnicos e hidrogeológicos foram integrados em ambiente georreferenciado, permitindo sobreposição espacial de zonas de baixa resistividade, maciços fraturados, setores de alta condutividade hidráulica e locais de ocorrência de danos estruturais. Essa integração possibilitou elaborar modelo conceitual de evolução do colapso, no qual a carstificação natural é intensificada por rebaixamento do nível freático, infiltração de efluentes e sobrecarga construtiva.

Tal abordagem permitiu delimitar áreas de maior suscetibilidade geotécnica e fundamentar tecnicamente recomendações de zoneamento de risco e planejamento urbano.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Contexto hidroclimático e intensificação da exploração subterrânea

A análise histórica dos dados pluviométricos e de uso hídrico indica tendência consistente de redução das precipitações anuais associada ao aumento progressivo da dependência de captações subterrâneas para irrigação agrícola. Esse desequilíbrio entre recarga natural e extração antrópica caracteriza regime de superexploração do aquífero, promovendo rebaixamento contínuo do nível freático.

Do ponto de vista hidrogeológico, essa condição implica redução da poropressão e aumento das tensões efetivas transmitidas ao arcabouço sólido do maciço (Freeze; Cherry, 1979). Em aquíferos cársticos, onde a sustentação parcial de cavidades depende da pressão hidráulica interna, o rebaixamento piezométrico favorece instabilidade estrutural e colapso progressivo de vazios (Ford; Wolliams, 1989). Assim, o cenário identificado no município de Lapão constitui importante fator predisponente à subsidência.

3.2 Resposta geofísica do substrato carbonático

Os levantamentos de eletrorresistividade executados pelo Serviço Geológico do Brasil revelaram forte variabilidade lateral das propriedades elétricas do subsolo, evidenciando a heterogeneidade típica de terrenos cársticos. As seções geoelétricas apresentaram extensas zonas de baixa resistividade (< 500 Ω·m), interpretadas como calcários alterados, saturados e intensamente fraturados, além de anomalias circulares compatíveis com vazios ou cavidades.

Conforme descrito por Telford *et al.* (1990), reduções significativas de resistividade em rochas carbonáticas geralmente refletem aumento de porosidade, saturação e conectividade hidráulica, características associadas a processos de dissolução ativa. A presença dessas anomalias, coincidente com áreas onde foram registrados danos estruturais, sugere relação direta entre alteração do maciço e manifestações superficiais de instabilidade.

Adicionalmente, feições arqueadas e descontinuidades verticais observadas nas seções indicam deformações internas e subsidência progressiva, compatíveis com abatimento do teto de cavidades. Esses padrões corroboram a interpretação de carstificação ativa intensificada por intervenções antrópicas.

3.3 Caracterização geotécnica do maciço por sondagens rotativas

As sondagens rotativas realizadas pela Consominas Engenharia confirmaram as interpretações geofísicas, evidenciando maciços predominantemente calcários com elevado grau de fraturamento, zonas de alteração intensa, perdas frequentes de recuperação de testemunhos e ocorrência de vazios preenchidos por materiais argilosos.

Os valores de RQD mostraram grande variabilidade espacial, com trechos classificados como maciços de baixa qualidade geomecânica, indicando descontinuidades frequentes e reduzida integridade estrutural (Deere, 1964). Ensaios de perda d'água sob pressão revelaram condutividades hidráulicas médias a muito altas, evidenciando elevada permeabilidade e conectividade entre fraturas, condição que favorece percolação de água e intensificação do intemperismo químico.

Do ponto de vista mecânico, tais características implicam redução da rigidez e da capacidade de suporte do terreno, aumentando a suscetibilidade a recalques diferenciais sob cargas superficiais. Esse comportamento é coerente com o conceito de maciços metaestáveis, cuja resistência depende parcialmente da pressão neutra e da cimentação carbonática, ambas reduzidas pela exploração hídrica.

3.4 Integração hidrogeotécnica e mecanismo de colapso

A integração dos resultados evidencia forte correlação espacial entre:
(i) zonas de baixa resistividade elétrica;
(ii) maciços altamente fraturados e permeáveis;
(iii) áreas com grande concentração de poços tubulares;
(iv) locais de ocorrência de subsidências e danos estruturais.

Essa convergência de evidências sustenta modelo conceitual no qual o bombeamento excessivo promove rebaixamento piezométrico, elevando as tensões efetivas ($\sigma' = \sigma - u$) e reduzindo a sustentação hidráulica das cavidades. O enfraquecimento progressivo do teto rochoso culmina em ruptura localizada, propagando-se para a superfície sob a forma de dolinas de colapso ou recalques diferenciais.

O processo é agravado por fatores urbanos adicionais, como infiltração de efluentes domésticos, que aumenta a agressividade química da água percolante, e sobrecarga de edificações, que eleva as tensões aplicadas. Esse comportamento está em consonância com descrições clássicas de subsidência induzida em terrenos cársticos (White, 1988; Fetter, 2001).

3.5 Implicações geotécnicas e discussão crítica

Os resultados demonstram que o colapso observado não decorre exclusivamente da evolução natural do carste, mas de processo induzido por ação antrópica, no qual a superexploração hídrica atua como principal gatilho de instabilidade. A presença de maciços intensamente fraturados, elevada permeabilidade e vazios dissolvidos configura condição crítica para implantação de fundações superficiais sem investigação prévia.

Do ponto de vista prático, a área deve ser classificada como de alta suscetibilidade geotécnica, demandando investigações obrigatórias, restrições de carga, controle de captação subterrânea e implantação de saneamento. A adoção dessas medidas é fundamental para mitigar riscos estruturais e garantir segurança urbana.

Assim, o caso de Lapão constitui exemplo representativo da interação entre processos geológicos naturais e pressões antrópicas, reforçando a necessidade de gestão integrada de recursos hídricos e planejamento territorial preventivo em ambientes cársticos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu caracterizar, de forma integrada, os mecanismos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos associados aos processos de colapso do terreno observados no município de Lapão, evidenciando que as subsidências registradas resultam da interação entre a fragilidade natural do sistema cárstico e a intensificação de pressões antrópicas sobre o aquífero subterrâneo. A ocorrência de rochas carbonáticas intensamente fraturadas, associadas a condutos dissolvidos e elevada permeabilidade, confere ao maciço comportamento estrutural heterogêneo e suscetível à perda de suporte, constituindo condição predisponente a recalques diferenciais e colapsos localizados.

Os levantamentos de eletrorresistividade realizados pelo Serviço Geológico do Brasil demonstraram a presença de extensas zonas de baixa resistividade elétrica, compatíveis com calcários alterados e fraturados, enquanto as sondagens rotativas executadas pela Consominas Engenharia confirmaram maciços de baixa qualidade geomecânica, com elevado grau de descontinuidades e condutividade hidráulica significativa. A concordância entre os métodos indiretos e diretos reforça a confiabilidade do diagnóstico, indicando que a carstificação ativa e a intensa conectividade hidráulica do substrato favorecem a evolução de vazios subterrâneos e a consequente instabilidade da superfície.

Sob o ponto de vista hidrogeológico, a redução progressiva da recarga natural, combinada ao bombeamento intensivo de poços para irrigação agrícola, promove rebaixamento do nível freático e diminuição da poropressão, aumentando as tensões efetivas atuantes no maciço rochoso. Esse processo compromete a sustentação hidráulica das cavidades calcárias e atua como gatilho para a ruptura do teto das estruturas subterrâneas, deflagrando subsidências e dolinas de colapso. Fatores urbanos adicionais, como infiltração de esgotos domésticos e sobrecarga construtiva, intensificam a dissolução química do carbonato e aceleram a degradação estrutural do terreno.

Os resultados obtidos indicam que o fenômeno observado não deve ser interpretado exclusivamente como evolução natural do carste, mas sim como processo induzido e amplificado por ações antrópicas, evidenciando a necessidade de gestão integrada entre recursos hídricos, planejamento urbano e geotecnia preventiva. Nesse contexto, a ocupação de áreas sobre substrato carbonático sem investigação prévia configura risco elevado, especialmente para edificações com fundações rasas ou cargas concentradas.

Do ponto de vista prático, recomenda-se a implantação de sistema público de esgotamento sanitário, o controle e regularização das captações subterrâneas, o fechamento de poços em áreas urbanas sensíveis, a realização obrigatória de investigações geotécnicas prévias em novas construções e o estabelecimento de zoneamento de suscetibilidade geotécnica. Tais medidas são essenciais para reduzir a exposição a danos estruturais e aumentar a segurança da população.

Por fim, o caso de Lapão constitui referência relevante para estudos de geotecnia ambiental em terrenos cársticos no semiárido brasileiro, demonstrando a importância da integração entre métodos geofísicos, sondagens diretas e análise hidrogeológica na avaliação de riscos. A abordagem adotada mostrou-se eficaz para o diagnóstico de áreas instáveis e pode ser replicada em municípios com contexto geológico semelhante, contribuindo para políticas públicas de monitoramento hidrogeotécnico e ocupação territorial sustentável..

REFERÊNCIAS

Albrecht, K. J. (1996) Avaliação dos problemas geológico-geotécnicos em terrenos cársticos: base para o mapeamento geotécnico. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

Christofoletti, A. (1980) Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher.

Consominas Engenharia. (2018) Relatório de sondagens rotativas e caracterização geotécnica – Lapão (BA). Salvador: Consominas Engenharia.

Deere, D. U. (1964) Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology, London, v. 1, n. 1, p. 16–22.

Fetter, C. W. (2001) Applied hydrogeology. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Ford, D.; Williams, P. (1989) Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman.

Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979) Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Hoek, E.; Bray, J. (1981) Rock slope engineering. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2013) Relatório técnico de investigação geofísica e hidrogeológica – município de Lapão (BA). Salvador: CPRM.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. (1990) Applied geophysics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Teixeira, W. (1993) Solos colapsíveis: mecanismos e implicações geotécnicas. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (org.). Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, p. 137–162.

Ward, S. H. (1990) Geotechnical and environmental geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.

White, W. B. (1988) Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York: Oxford University Press.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/77

Comparação da Eficiência de Diferentes Soluções Eletrolíticas na Remediação Eletrocinética de Solo Contaminado por Cobre

Danilo Brito da Costa
Doutorando, UFCG, Campina Grande, Brasil, danilo.brito@ufcg.edu.br

Rivaildo da Silva Ramos Filho
Doutorando, UFCG, Campina Grande, Brasil, rivaildo.silva@estudante.ufcg.edu.br

Daniela Lima Machado da Silva
Professora Adjunta, UFC, Russas, Brasil, danielalms@ufc.br

Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk
Professora Associada, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, anaghislane@eng.uerj.br

Gustavo Ferreira Simões
Professor Titular, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, gustavo@desa.ufmg.br

Márcio Camargo de Melo
Professor Associado, UFCG, Campina Grande, Brasi, marcio.camargo@professor.ufcg.edu.br

Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
Professora Titular, UFCG, Campina Grande, Brasil, veruschka.escariao@professor.ufcg.edu.br

RESUMO: A contaminação de solos por metais constitui um passivo ambiental relevante em áreas de disposição de resíduos. O uso da eletrocinética tem se destacado por ser uma alternativa promissora de remediação, promovendo a migração de contaminantes sob a aplicação de um campo elétrico. Este trabalho tem como objetivo comparar a eficiência de diferentes soluções eletrolíticas na aplicação da remediação eletrocinética *ex-situ* em solo contaminado por Cobre. O solo é proveniente de um aterro sanitário localizado na região do semiárido paraibano, sendo previamente caracterizado quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A contaminação artificial foi realizada em laboratório mediante adição de solução de Cu^{2+} ($1 g.L^{-1}$), preparada por dissolução de $CuCl_2$ em água destilada. O solo foi inserido em célula eletrolítica com grau de compactação mínimo de 95%. As soluções eletrolíticas avaliadas foram água de torneira, água destilada e ácido acético ($0{,}1\ mol \cdot L^{-1}$). Os três experimentos foram realizados a 20 ± 2 °C, com campo elétrico de $1{,}0\ V \cdot cm^{-1}$, por meio de eletrodos de aço inox, e monitoramento do pH nos reservatórios anódico e catódico. Após 72h, o solo foi seccionado em três regiões (anódica, central e catódica) para extração do cobre na fração ácido-solúvel. Os resultados indicaram que, dentre as soluções utilizadas, a melhor migração de Cu^{+2} no solo foi verificada para o ensaio conduzido com ácido acético. A maior taxa de remoção foi de 81% para o solo da região do ânodo no ensaio realizado com uso do ácido acético.

PALAVRAS-CHAVE: contaminação de solos, contaminantes, metais, remediação eletrocinética, solução eletrolítica.

ABSTRACT: Soil contamination by metals constitutes a significant environmental liability in waste disposal areas. The use of electrokinetics has stood out as a promising remediation alternative, promoting the migration of contaminants under the application of an electric field. This work aims to compare the efficiency of different electrolytic solutions in the application of ex-situ electrokinetic remediation in soil contaminated by copper. The soil comes from a sanitary landfill located in the semi-arid region of Paraíba, and was previously characterized in terms of its physical, chemical, and mineralogical properties. Artificial contamination was carried out in the laboratory by adding a Cu^{2+} solution ($1 g.L^{-1}$), prepared by dissolving $CuCl_2$ in distilled water. The soil was inserted into an electrolytic cell with a minimum degree of compaction of 95%. The electrolytic solutions evaluated were tap water, distilled water, and acetic acid ($0.1\ mol \cdot L^{-1}$). The three experiments were

conducted at 20 ± 2 °C, with an electric field of 1.0 V·cm^{-1}, using stainless steel electrodes, and monitoring the pH in the anodic and cathodic reservoirs. After 72 hours, the soil was sectioned into three regions (anodic, central, and cathodic) for copper extraction in the acid-soluble fraction. The results indicated that, among the solutions used, the best Cu^{+2} migration in the soil was observed for the test conducted with acetic acid. The highest removal rate was 81% for the soil in the anodic region in the test performed using acetic acid.

KEYWORDS: contaminants, electrokinetic remediation, electrolytic solution, metals, soil contamination.

1 INTRODUÇÃO

A eletrocinética tem se mostrado uma técnica promissora para a remediação de solos contaminados por metais pesados. Sua aplicação tem sido estudada em diferentes tipo de solos, com taxas de remoção de metais alcançando valores de 80 a 90%, a depender da configuração técnica adotada (Bokde *et al*., 2025; Yuan *et al*., 2016; Wang *et al*., 2024).

Dentre as vantagens da eletrocinética está a sua capacidade de separação dos cátions metálicos para uma região específica do solo. Para tanto, um campo elétrico é aplicado através de dois eletrodos, denominados de cátodo e ânodo, com auxílio de uma solução eletrolítica condutora para facilitar a migração dos íons no solo. O processo envolve a transformação da energia elétrica em energia química a partir da eletrólise da água nos dois eletrodos, liberando íons H^+ no ânodo e OH^- no cátodo. Dessa maneira, os cátions são atraídos para o cátodo, enquanto os ânions se deslocam em direção ao ânodo, em um um fenômeno conhecido como eletromigração. Em paralelo, ocorre o processo de eletroosmose, caracterizado pelo movimento do fluido induzido pela migração iônica, geralmente no sentido do cátodo. Quando esse deslocamento envolve as partículas coloidais eletricamente carregadas em direção ao eletrodo de carga oposta, o processo é denominado eletroforese (Virkutyte *et al*., 2002).

Estudos recentes têm explorado diversas estratégias para aprimorar a eficiência da remediação eletrocinética em solos contaminados. Entre elas, destacam-se o uso de agentes químicos para controle do pH e aumento da solubilidade dos metais, a inversão periódica da polaridade dos eletrodos (Wang *et al*., 2024), a injeção de corrente elétrica em regime pulsado (Sun; Ottosen, 2012) e a recirculação dos fluidos no compartimento dos eletrodos (Beyrami, 2021). Além disso, observa-se a integração dessa técnica com outras abordagens de remediação, como biorremediação, fitorremediação e barreiras reativas permeáveis, ampliando seu potencial de aplicação (Taneja; Karaca; Haritash, 2024; Bokde *et al*., 2025; Hamdi *et al*., 2025).

O estudo inicial da eletrocinética em escala de laboratório é essencial para a aplicação em escala real, pois permite compreender as variáveis envolvidas e otimizar o desempenho do processo (Sun *et al*., 2023). Variáveis como a carga do contaminante, campo elétrico, tempo de remediação, estado de compactação do solo, solução eletrolítica e o tipo de material dos eletrodos costumam ser testados para definir a condição mais adequada para promover máxima remoção de contaminantes no solo (Hamdi *et al*., 2025; Taneja; Karaca; Haritash, 2024). Dessa forma, os estudos devem buscar uma alternativa ambientalmente sustentável, baseada no equilíbrio entre a eficiência de remoção de contaminantes e o custo energético requerido pelo processo.

Dentre as variáveis intervenientes na remediação eletrocinética, a escolha da solução eletrolítica é uma etapa fundamental para garantir uma boa condutividade para a migração de íons, diminuindo a resistência inicial do solo. Esse meio condutivo irá determinar o comportamento da corrente elétrica e sua intensidade, que sofrerá variações devido às alterações químicas do solo ao longo do processo. Considerando que este trabalho faz parte de uma pesquisa mais ampla e em andamento abordando essa temática, tem-se como objetivo a comparação do uso de diferentes soluções eletrolíticas – água destilada, água de torneira e ácido acético (0,1M) – na remediação eletrocinética de um solo contaminando com Cu^{2+}, no intuito de determinar a melhor condição de remediação.

2 METODOLOGIA

2.1 Solo de Estudo

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente do Aterro Sanitário situado no município de Campina Grande-PB, que está localizado no semiárido brasileiro (Figura 1). As amostras de solo analisadas foram

coletadas de uma jazida cujo material é utilizado como camada de assentamento da geomembrana, integrante da camada de base do aterro.

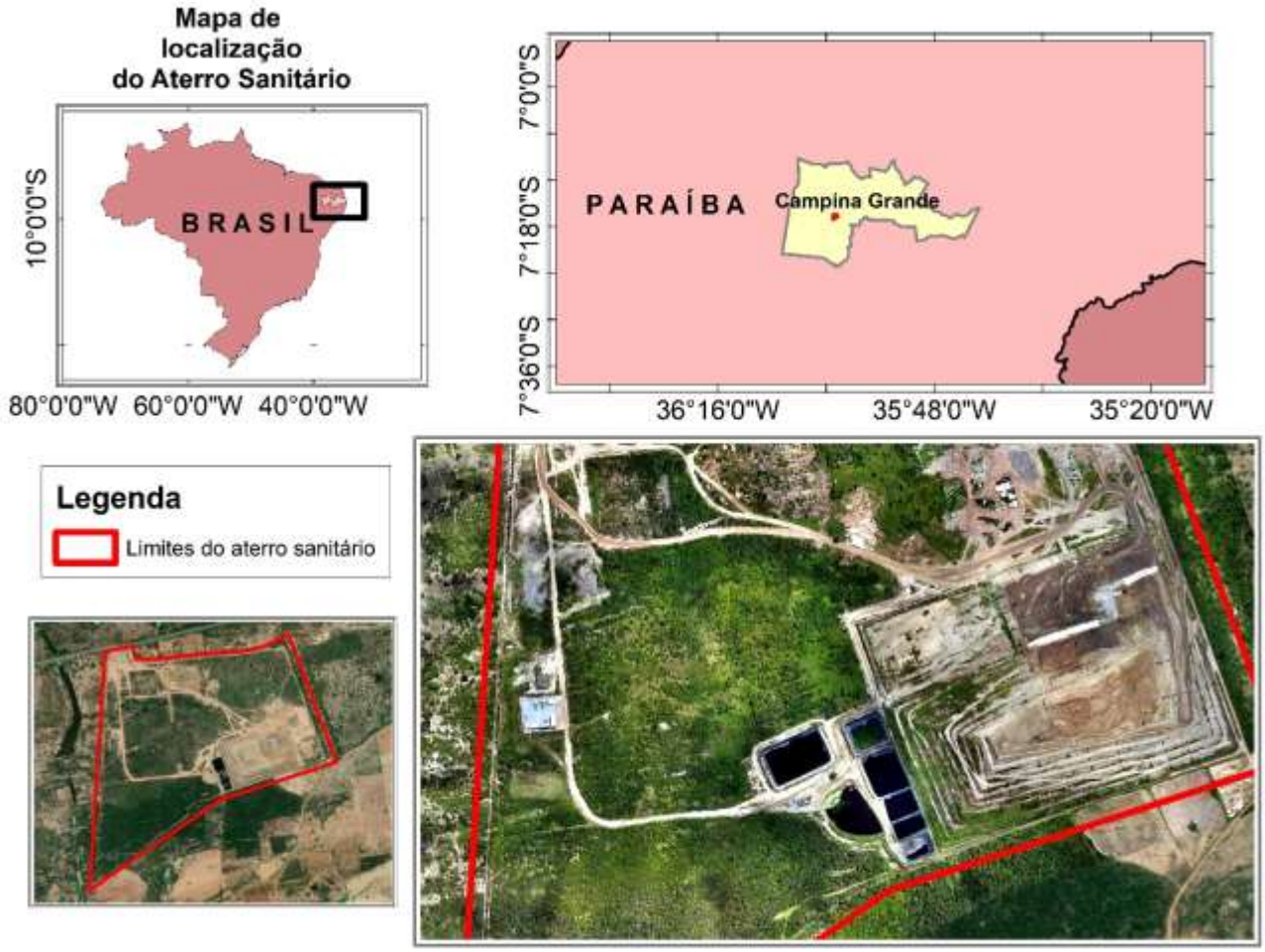


Figura 1. Localização do aterro sanitário

A Tabela 1 apresenta um resumo da caracterização física do solo, com destaque para a densidade real dos grãos pela NBR 6458 (ABNT, 2016), a granulometria pela NBR 7181 (ABNT, 2025), os parâmetros de compactação obtidos com energia de Proctor normal (massa específica seca máxima – $\rho_{d,máx}$; e umidade ótima - w_{ot}), conforme NBR 7182 (ABNT, 2025), e demais atributos fisico-químicos como pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e teores de matéria orgância (MO) e carbono (C), segundo Teixeira *et al*. (2017).

Tabela 1. Caracterização física do solo e demais atributos fisico-químicos.

Densidade	---- Faixa granulométrica (%) ----				Compactação		------ Atributos físico-químicos ------				
(g.cm³)	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	$\rho_{d,máx}$ g.cm^{-3}	w_{ot} %	$pH_{água}$ (1:2,5)	pH_{KCl} (1:2,5)	CTC cmol$_c$.kg^{-1}	MO g.kg^{-1}	C g.kg^{-1}
2,68	26,20	48,00	5,76	20,04	1,86	9,00	6,44	5,78	4,28	7,60	4,41

O solo foi classificado como areia siltosa mal graduada, conforme o SUCS. Dada a concentração considerável de partículas grossas (pedregulho+areia), aliado com a ausência dos limites de consistência e um valor considerado baixo para a CTC, pode-se esperar que a sorção de íons Cu^{+2} não seja tão atuante no solo, de modo que a eletromigração seja facilitada.

2.2 Contaminação do Solo

O solo foi submetido à contaminação em laboratório com uma solução de 1g.L^{-1} de Cu^{2+}, preparada a partir do cloreto de cobre ($CuCl_2.2H_2O$). A escolha do metal deve-se a sua elevada toxicidade ao meio ambiente e malefícios causados à saúde pública quando em concentrações elevadas, além de apresentar boa solubilidade em ampla faixa de pH ácido (Jaishankar *et al*., 2014). No processo de contaminação, o solo foi disperso em uma bandeja plástica e o contaminante foi introduzido por meio de um pulverizador por sucessivas vezes, intercalado com a homogeneização manual do solo.

A quantidade da solução contaminante inserida no solo foi definida com base na umidade ótima resultante do ensaio de compactação, adicionando 2% de umidade ao valor obtido, como forma de compensar eventuais perdas de umidade durante o processo. Uma vez contaminado, o solo foi reservado para ser submetido após 72 horas ao ensaio de remediação eletrocinética, possibilitando uma melhor interação dos contaminantes metálicos com as partículas de solo.

Após a contaminação do solo, três amostras com aproximadamente 20 g cada foram retiradas para a determinação da umidade em estufa. Essas amostras também foram utilizadas para a análise do quantitativo de Cu^{+2} disponível na fração solúvel/trocável do solo, fazendo uso de solução extratora de cloreto de magnésio hexahidratado ($MgCl_2.6H_2O$), conforme metodologia descrita por Tessier *et al*. (1979). A concentração dos íons de Cu^{+2} disponíveis na fração líquida do extrato foi determinada em espectômetro de absorção atômica modelo AA 240 da *Agilent* e teve como resultado uma concentração inicial média de Cu^{2+} igual a 20 mg.kg^{-1}.

2.3 Ensaios de Remediação Eletrocinética

Os ensaios de eletrorremediação foram conduzidos em células eletrolíticas em acrílico com espessura de 2mm, dotada de divisórias perfuradas com papel filtro acoplado, permitindo a passagem da solução eletrolítica entre os reservatórios laterais e o solo. Uma fonte geradora de corrente contínua foi responsável por aplicar um campo elétrico na célula, com magnitude de 1 V.cm^{-1}, a partir de eletrodos em aço inox 304, que foram fixados por meio de canaletas e espaçados 14 cm entre si. A Figura 2 apresenta a operação das três células eletrolíticas montadas para a pesquisa.

No compartimento central da célula, o solo foi compactado estaticamente com auxílio de uma prensa manual, ocupando um volume de aproximadamente 760 cm^3. O objetivo foi alcançar um grau de compactação de no mínimo 95%, que corresponde ao menor valor exigido para a camada de suporte da geomembrana em uma camada de base de aterro sanitário.

A presente pesquisa propôs a realização de três ensaios de remediação eletrocinética com o solo contaminado por Cu^{2+}, cada qual fazendo uso das seguintes soluções eletrolíticas, respectivamente: ácido acético (0,1M), água destilada e água de torneira. Essas soluções foram adotadas considerando a disponibilidade e o custo acessível de aquisição, de modo que soluções mais custosas sejam analisadas posteriormente em novos ensaios. Os ensaios foram monitorados durante 72 horas em laboratório com temperatura ambiente controlada de 20±2°C.



Figura 2. Montagem dos ensaios de remediação eletrocinética.

Durante o monitoramento dos ensaios, os valores de pH das soluções nos reservatórios do ânodo e do cátodo foram registrados nos instantes inicial, após 24 horas e ao fim dos ensaios. A corrente elétrica também foi monitorada nos respectivos intervalos de tempo. Com o término dos ensaios, foram extraídas amostras da porção central do solo e das regiões próximas ao ânodo e ao cátodo. Essas amostras foram analisadas em triplicata quanto à fração de Cu^{+2} facilmente disponível/trocável no solo, conforme Tessier *et al*. (1979), seguido da quantificação da concentração do metal na fração líquida (cw) por espectrometria de absorção atômica. A concentração de Cu^{+2} na amostra de solo (cs), em termo de $mg.kg^{-1}$, foi determinada a partir da Equação 1, que considera a massa seca do solo (m) e o volume da solução extratora (V) definidos pela metodologia empregada.

$$c_s = c_w . \frac{V}{m} \quad (1)$$

A eficiência do tratamento eletrocinético aplicado ao solo foi mensurado a partir da taxa de remoção (TR), que relaciona a concentração inicial (c_o) do metal inserida no solo e concentração final (c_f) obtida após o processo de extração, conforme representado pela Equação 2.

$$TR = \left(\frac{c_o - c_f}{c_o}\right) . 100\% \quad (2)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o monitoramento dos ensaios, o solo não apresentou expansão ou formação de fissuras em nenhuma das células, possivelmente em razão do tempo total ser relativamente curto. A coloração dos reservatórios do cátodo manteve-se a mesma durante as 72 horas, com destaque para um aspecto mais translúcido na célula 1, em razão de uma pequena passagem de solo em frestas existentes entre a divisória de acrílico. Nos reservatórios do ânodo, a coloração foi mudando até adquirir uma tonalidade amarelada, sendo mais notório nas células 1 e 3. Essa característica é comum em eletrodos de aço inox em virtude da oxidação no ânodo e consequente liberação de partículas de Fe^{+2} à solução (Li *et al*., 2014). A intensidade da oxidação não levou à corrosão nítida nos eletrodos, dado que o tempo total de contato pode ter sido insuficiente.

A Tabela 2 apresenta os resultados de concentração de Cu^{+2} determinados após o processo de remediação eletrocinética para as três regiões do solo (central e próximas ao ânodo e ao cátodo), assim como os valores de pH monitorados durante e após o encerramento dos ensaios.

Tabela 2. Dados obtidos com o monitoramento dos ensaios de remediação eletrocinética.

Célula	Solução eletrolítica	Concentração de Cu^{+2} nos solos após os ensaios ($mg.kg^{-1}$)			pH			
					24 h de ensaio		72 h de ensaio	
		Próximo ao ânodo	Porção central	Próximo ao cátodo	Ânodo	Cátodo	Ânodo	Cátodo
01	Ácido acético	3,72	16,39	65,32	2,19	4,58	2,13	11,67
02	Água destilada	36,90	26,42	10,71	2,48	11,44	2,24	11,30
03	Água de torneira	27,74	16,83	3,60	3,56	11,48	2,33	11,74

Na célula 1, verifica-se que a maior concentração de Cu^{+2} no solo foi encontrada na região próxima ao cátodo, seguido das porções central e próxima ao ânodo, respectivamente. Esse resultado sugere que a migração dos íons Cu^{+2} se deu, de fato, em direção ao cátodo, resultando em uma taxa de remoção do metal de 81% no solo próximo ao ânodo. Na porção central, há o acúmulo de íons que foram migrados da região anódica, de modo que a taxa de remoção de Cu^{+2} foi reduzida para 16%. O deslocamento de íons em direção ao cátodo implica na elevada concentração do metal na região catódica do solo, em valor superior à concentração inicial do solo contaminado. Esse comportamento pode ser reflexo do entupimento dos poros do

solo na região próxima ao cátodo em função da formação de precipitados pelo pH alcalino, conforme observado em ensaios desenvolvidos por Hu, Cheng e Wen (2023), o que pode constituir depósitos concentrados de Cu^{+2} em zonas específicas. Contudo, a ocorrência de contaminação paralela ou a falta de representatividade da amostra no processo de extração também devem ser considerados, dado que é possível existir heterogeneidade na concentração do metal no interior de cada uma das três regiões de solo.

Nas células 2 e 3, observa-se que houve um aumento da concentração de Cu^{+2} em direção ao ânodo, ao contrário do que foi constatado na célula 1. Ao analisar a taxa de remoção de Cu^{+2} na região do solo próxima ao cátodo nessas células, obtem-se valores aproximados de 50 e 82%, respectivamente. Por outro lado, as concentrações do metal nas demais porções do solo foram próximas ou superiores do valor de referência do solo inicialmente contaminado. As variações nas concentrações de Cu^{+2} no solo apresentam forte contribuição da alteração de pH durante o ensaio, uma vez que este parâmetro define a capacidade de solubilização do metal ou sua tendência de precipitação no meio (Merrikhpour; Mobarakpour; Azimi, 2022).

A elevação do pH no reservatório do cátodo indica maior geração de íons OH^-, que migram em direção ao eletrodo do ânodo, promovendo a formação de uma frente básica que avança no solo. Esse deslocamento eleva o pH da solução intersticial, favorecendo a precipitação de íons Cu^{+2}. Como consequência, a formação de precipitados pode obstruir os poros do solo, aumentando sua resistência e dificultando, ou até impedindo, a migração do Cu^{+2} em direção ao cátodo (Hamdi *et al.*, 2025).

Observa-se que esse fenômeno foi mais pronunciado nas células 2 e 3, nas quais o pH do reservatório catódico atingiu valores superiores a 11 nas primeiras 24 horas, enquanto na célula 1 permaneceu em faixa ácida (pH = 4,58) no mesmo período. Nessas condições, a remoção do metal nas regiões próximas ao cátodo, nas células 2 e 3, parece estar mais associada à precipitação do que à migração eletrocinética, uma vez que não houve redução significativa nas concentrações próximas ao ânodo. Por outro lado, na célula 1, a frente básica mostrou-se mais limitada, com influência predominante na região próxima ao cátodo. O acúmulo de Cu^{+2} nessa zona pode estar relacionado ao bloqueio de poros causado pela precipitação na interface com o reservatório catódico, resultando em áreas com elevadas concentrações do metal (Hu; Cheng; Wen, 2023).

Nos reservatórios anódicos, os baixos valores de pH observados em todas as células, desde as primeiras 24 horas até o final dos ensaios, indicaram elevada geração de íons H^+. Esse processo promove a formação de uma frente ácida que avança no solo, favorecendo a migração desses íons em direção ao cátodo quando não há controle de pH (Bokde *et al*., 2025). Em meio ácido, há maior solubilização dos íons metálicos, além da possível dissolução de constituintes do solo, o que melhora a conectividade dos poros e favorece a migração do Cu^{+2}. Destaca-se que, na célula 1, que utilizou ácido acético como eletrólito, os valores de pH no reservatório anódico foram mais baixos ao longo de todo o ensaio em comparação às células 2 e 3. Assim, a região de solo próxima ao ânodo nessa célula foi mais influenciada pela frente ácida, favorecendo a solubilização do Cu^{+2} e seu deslocamento em direção ao cátodo, resultando em melhor desempenho em relação às demais condições testadas.

Os valores de corrente elétrica registrados ao longo dos ensaios também contribuem para a compreensão do processo de eletromigração do Cu^{+2} no solo. Conforme apresentado na Tabela 3, a maior corrente inicial (20,1 mA) foi observada na célula 3, que utilizou água de torneira, o que é esperado devido à maior presença de íons e, consequentemente, maior condutividade elétrica. Por outro lado, a menor corrente inicial (1,2 mA) foi registrada na célula 2, com uso da água destilada, praticamente isenta de íons.

Tabela 3. Valores de corrente elétrica, em mA, nos instantes inicial, 24h e 72h de ensaios.

--------- Célula 01 ---------			--------- Célula 02 ---------			--------- Célula 03 --------		
Início	24h	72h	Início	24h	72h	Início	24h	72h
17,3	24,1	9,3	1,2	9,4	6,6	20,1	6,8	5,8

Ao longo do tempo, os processos físico-químicos promoveram variações na corrente elétrica, com tendência de redução associada ao aumento da resistência do solo, frequentemente relacionado à formação de precipitados que obstruem os poros (Beyrami, 2021). Em todas as células, observou-se diminuição da corrente elétrica entre as primeiras 24 horas e o final dos ensaios, sendo a maior corrente final registrada na célula 1, indicando menor resistência do solo nessa condição. Esse comportamento corrobora com o melhor

desempenho da eletrorremediação nessa célula. Ressalta-se, ainda, que os valores obtidos neste estudo são inferiores aos reportados na literatura, possivelmente em função do maior grau de compactação do solo, que aumenta a tortuosidade dos caminhos de migração iônica (Yin *et al*., 2022).

4 CONCLUSÕES

As diferentes soluções utilizadas – água destilada, água de torneira e ácido acético (0,1 M) – resultaram em comportamentos distintos quanto à migração dos íons Cu^{+2} em cada célula eletrolítica. O ensaio conduzido com o ácido acético indicou melhores resultados na eletromigração do Cu^{+2}, com aumento da concentração do metal em direção ao cátodo, alcançando taxas de remoção do metal de 81 e 16% nas regiões próxima ao ânodo e central do compartimento de solo, respectivamente.

O desempenho superior da eletrorremediação na célula 1, que utilizou ácido acético, foi confirmado pelos valores de corrente elétrica, os quais indicaram menor resistência do solo ao final do ensaio em comparação às demais condições. O uso desse eletrólito mostrou-se adequado e compatível com o eletrodo de aço inox, não havendo evidências de corrosão no período avaliado. Ainda assim, recomenda-se a investigação de outras soluções eletrolíticas, visando mitigar a elevação do pH no reservatório catódico.

O grau de compactação mínimo de 95% aplicado ao solo nas três células é um fator que pode ter contribuído para dificultar a migração do Cu^{+2}, dado que a aproximação dos grãos diminui a interconexão dos poros. Em face disso, sugere-se que os novos ensaios sejam conduzidos com um tempo maior de duração e maior magnitude de campo elétrico. Um outro aspecto a ser modificado é a metodologia de coleta das amostras de solo ao fim dos ensaios com o objetivo de garantir melhor representatividade da região de solo considerada.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq pelo apoio, incentivo e fomento à pesquisa científica; ao Parque Tecnológico da Paraíba, pela celebração dos acordos de parceria que viabilizaram a pesquisa; e ao Grupo de Geotecncia Ambiental da UFCG, pelo desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo: Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solo: Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Beyrami, H. (2021). Effect of different treatments on electrokinetic remediation of Zn, Pb and Cd from a contaminated calcareous soil. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *38*, 255–265. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.011

Bokde, A. A., Subash, A., Gholap, V., & Kandasubramanian, B. (2025). Electrokinetic Soil-Water Remediation: A Comprehensive Exploration. In *Separation and Purification Reviews*. Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/15422119.2025.2537073

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. In *Interdisciplinary Toxicology* (Vol. 7, Issue 2, pp. 60–72). Slovak Toxicology Society. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

Hamdi, F. M., Ganbat, N., Altaee, A., Samal, A. K., Ibrar, I., Zhou, J. L., & Sharif, A. O. (2025). Hybrid and enhanced electrokinetic system for soil remediation from heavy metals and organic matter. In *Journal of Environmental Sciences (China)* (Vol. 147, pp. 424–450). Chinese Academy of Sciences. https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.11.005

Hu, W., Cheng, W. C., & Wen, S. (2023). Investigating the effect of degree of compaction, initial water content, and electric field intensity on electrokinetic remediation of an artificially Cu- and Pb-contaminated loess. *Acta Geotechnica*, *18*(2), 937–949. https://doi.org/10.1007/s11440-022-01602-9

Li, D., Tan, X. Y., Wu, X. da, Pan, C., & Xu, P. (2014). Effects of electrolyte characteristics on soil conductivity and current in electrokinetic remediation of lead-contaminated soil. *Separation and Purification Technology*, *135*, 14–21. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.048

Merrikhpour, H., Mobarakpour, S., & Azimi, S. B. (2022). Adsorption of Cd2+, Cu2+, and Ni2+ onto surfactant modified bentonite. *Desalination and Water Treatment*, *271*, 157–165. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28768

Sun, T. R., & Ottosen, L. M. (2012). Effects of pulse current on energy consumption and removal of heavy metals during electrodialytic soil remediation. *Electrochimica Acta*, *86*, 28–35. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.04.033

Sun, Z., Zhao, M., Chen, L., Gong, Z., Hu, J., & Ma, D. (2023). Electrokinetic remediation for the removal of heavy metals in soil: Limitations, solutions and prospection. In *Science of the Total Environment* (Vol. 903). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165970

Taneja, S., Karaca, O., & Haritash, A. K. (2024). Electrokinetic remediation: Past experiences and future roadmap for sustainable remediation of metal-contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, *259*. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107437

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

Tessier, A., Campbell, P. G. C., & Bisson, M. (1979). Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. In *ANALYTICAL CHEMISTRY* (Vol. 51, Issue 7).

Virkutyte, J., Sillanpaa, M., & Latostenmaa, P. (2002). Electrokinetic soil remediation critical overview. In *The Science of the Total Environment* (Vol. 289).

Wang, Y., Han, Z., Li, A., & Cui, C. (2021). Enhanced electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil by biodegradable complexing agents. *Environmental Pollution*, *283*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117111

Yin, C., Jiang, L., Sun, K., Sun, W., & Liang, B. (2022). Influence of degree of compaction on electrokinetic remediation of unsaturated soil. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *39*(4), 963–972. https://doi.org/10.1007/s11814-021-0999-6

Yuan, L., Li, H., Xu, X., Zhang, J., Wang, N., & Yu, H. (2016). Electrokinetic remediation of heavy metals contaminated kaolin by a CNT-covered polyethylene terephthalate yarn cathode. *Electrochimica Acta*, *213*, 140–147. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.081

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/78

Comparação do Fator de Retardo Obtido por Ensaios de Sorção do Tipo *Batch* e Ensaio de Coluna

Yago Isaias da Silva Borges
Professor Assistente, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, Brasil, yagoborges@unifei.edu.br

Maria Eugênia Gimenez Boscov
Professora Titular, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil, meboscov@usp.br

RESUMO: Este estudo compara o fator de retardo (R_d) do íon brometo em um solo laterítico argiloso, obtido por dois métodos: ensaios de sorção do tipo *batch* e retroanálise de ensaios de coluna. Nos ensaios de sorção, foram utilizadas soluções de brometo de potássio (KBr) com concentrações de brometo entre 5 mg/L e 200 mg/L, razão sólido:líquido de 1:4 e tempo de contato de 48 horas. Os resultados foram ajustados aos modelos isotérmicos linear, de Freundlich e de Langmuir. Para o ensaio de coluna utilizou-se o mesmo solo compactado na condição ótima, com solução de KBr a 100 mg/L e gradiente hidráulico constante de 17. A curva de eluição foi analisada pelo software Hydrus-1D, considerando fluxo advectivo-dispersivo em meio poroso contínuo. Para uma porosidade igual à da coluna, o R_d calculado pelos parâmetros das isotermas foi de 1,6, enquanto o R_d obtido pela retroanálise dos dados de coluna foi de 1,0. A diferença é atribuída à menor disponibilidade de sítios de sorção e à menor razão sólido:líquido no ensaio de coluna em relação ao *batch*. Conclui-se que o R_d obtido por ensaios de sorção é superestimado, sendo preferível utilizar parâmetros de transporte derivados de ensaios de coluna nos estudos de contaminação de solos estruturados .

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de Contaminantes, Fator de Retardo, Sorção.

ABSTRACT: This study compares the retardation factor (R_d) of the bromide ion in a clayey lateritic soil, determined using two methods: batch sorption tests and back-analysis of column tests. In the batch tests, potassium bromide (KBr) solutions with bromide concentrations ranging from 5 mg/L to 200 mg/L were used, applying a solid-to-liquid ratio of 1:4 and a contact time of 48 hours. The results were fitted to normal linear, Freundlich and Langmuir isotherm models. The same soil was used in the column test, compacted at optimum conditions, with a KBr solution at 100 mg/L and a constant hydraulic gradient of 17. The breakthrough curve was analyzed using Hydrus-1D software, assuming advective-dispersive flow in a continuous porous medium. For a porosity equal to that of the column, the R_d calculated from the isotherm parameters was 1.6, whereas the R_d obtained from the column data inverse analysis was 1.0. This discrepancy is attributed to a lower availability of sorption sites and a smaller solid-to-liquid ratio in the column test compared to the batch test. It is concluded that batch sorption tests tend to overestimate R_d, making column-derived transport parameters more reliable for studies of contamination of structured soils.

KEYWORDS: Contaminant Transport, Retardation Factor, Sorption.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório anual sobre a qualidade dos solos do mundo, divulgado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (Smith et al., 2024), cerca de um terço dos solos do planeta se encontram de moderada a altamente degradados, por processos como erosão, desertificação, compactação e contaminação. Entre as fontes de contaminação estão as geogênicas, causadas por contaminantes naturalmente presentes no ecossistema, e as antropogênicas, resultantes da atividade industrial, agricultura, mineração e da disposição inadequada de resíduos, dentre outras.

A modelagem matemática do avanço de plumas de contaminação em solos e rochas desempenha um papel importante nas estratégias de remediação e monitoramento de áreas contaminadas, bem como nos projetos de estruturas geotécnicas destinadas à retenção de poluentes. Estas estruturas são comumente

compostas por camadas de solo compactadas, quase sempre associadas a geomembranas. Nessas camadas, a concentração (C) de contaminante, ao longo do tempo (t), na direção x pode ser representada pela Eq. 1, que descreve um fluxo advectivo-dispersivo, onde v_x é a velocidade real de percolação, D_h é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e R_d é o fator de retardo:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

O fator de retardo expressa a razão entre a velocidade do fluido e a velocidade do soluto transportado (Freeze & Cherry, 1979; Shackelford, 1993). Assim, em uma condição de transporte conservativo, em que o soluto não é sorvido pelo meio poroso, R_d é igual a 1, indicando que soluto e solvente se movem na mesma velocidade. Já um R_d igual a 2, por exemplo, indica que o fluido se move duas vezes mais rápido que o soluto em consideração. Esse parâmetro pode ser obtido de forma direta ou indireta, dependendo do método utilizado.

Na forma direta, R_d é calculado a partir da retroanálise de dados obtidos em ensaios realizados em colunas de solo. Neste caso, uma solução com concentração inicial (C_0) conhecida é injetada em uma extremidade de uma coluna de solo, medindo-se a concentração C na outra extremidade, ao longo do tempo, até que C/C_0 seja igual a 1 ou atinja outra razão de interesse. Aplicadas as devidas condições de contorno para o problema, e conhecidas a geometria do sistema e as características do solo, pode-se ajustar a curva experimental à solução da Eq. 1, tomando-se R_d como variável independente. Quando a amostra de solo é bem preparada e representativa, o R_d assim obtido é mais condizente com as interações solo-contaminante que ocorrem no meio poroso modelado, sendo estas interações influenciadas pelo arranjo de poros, pela disponibilidade de sítios de sorção e pela razão entre a solução contaminante e a massa de solo (Van Genuchten & Wierenga, 1976; Borges, 2024).

Ensaios de coluna, no entanto, nem sempre são de fácil execução, especialmente em amostras de solos argilosos compactados, uma vez que a baixa permeabilidade e a reatividade desses meios implicam em tempos longos de ensaio. Assim, é comum que o R_d seja calculado de forma indireta, a partir de coeficientes de partição obtidos em ensaios de sorção como os do tipo *batch*. Essa metodologia é relativamente simples, e consiste em colocar uma amostra de solo desagregada em contato com a solução contaminante de interesse, em diferentes concentrações, por tempo suficiente para que ocorra o equilíbrio de soluto entre a fase líquida e a sólida. A relação entre a concentração de soluto na fase líquida e o grau de sorção verificado (massa de soluto adsorvida por massa de solo seca) pode ser expressa matematicamente por meio de curvas (isotermas) como as descritas pelas equações 2, 3 e 4, a partir das quais se obtém os coeficientes de partição e os demais parâmetros usados nos cálculos de R_d, tal qual expresso pelas equações 5, 6 e 7.

Se a microestrutura exerce um papel na interação solo-contaminante, seria, então, coerente utilizar valores de R_d obtidos indiretamente, a partir de ensaios do tipo *batch*, na modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados, como camadas indeformadas ou compactadas de solo? O objetivo deste artigo é responder à essa pergunta, comparando valores de R_d do íon brometo em um latossolo, obtidos segundo as duas metodologias citadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os ensaios foram realizados com um solo residual coletado em Campinas – SP, resultante do intemperismo de rochas diabásicas encontradas na formação geológica da Serra Geral. É composto, principalmente, por caulinita, quartzo, gibsita e óxidos de ferro (Hemsi, 2001; Gabas, 2005). Cerca de 49% de seus grãos são classificados como argila (< 0,002 mm), 30% como silte (0,002 mm – 0,06 mm) e 21% como areia (> 0,06 mm). A massa específica dos grãos é 2,87 g/cm³, o limite de liquidez é 45%, o limite de plasticidade é 30% e o índice de plasticidade é 15%, sendo classificado como um silte inorgânico de alta plasticidade (MH) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2017) e como um

latossolo vermelho, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (IBGE, 2007). Os ensaios foram realizados com amostras passantes na peneira de abertura 2,0 mm.

Soluções aquosas de brometo de potássio (KBr), com concentrações do íon brometo (Br^-) variando entre 5 mg/L e 200 mg/L foram utilizadas no ensaios do tipo *batch*, e uma solução com concentração de 100 mg/L foi utilizada no ensaio em coluna.

2.2 Ensaios do tipo *batch*

Nesses ensaios, 20 g de solo (massa seca) foram colocados em contato com 80 mL de uma solução de KBr (razão sólido:líquido de 1:4), com concentração de Br^- igual a 215 mg/L, em um frasco de polipropileno, por 48h, tempo previamente definido por Borges (2024). Os ensaios foram realizados com amostras em triplicatas, acrescidas de um frasco para controle (branco), contendo apenas a solução de KBr. Durante o tempo de contato, os frascos foram mantidos sob agitação mecânica, em uma sala com temperatura controlada, a 20 ± 0,5 ° C. Após 48h, as suspensões foram filtradas em papel filtro quantitativo com porosidade de 2 µm, e o líquido filtrado foi armazenado sob refrigeração para determinação da concentração de Br^-. Esses mesmos procedimentos foram replicados para soluções de KBr contendo 100 mg/L, 50 mg/L, 25 mg/L e 5 mg/L de Br^-. A concentração de Br^- foi analisada por meio de cromatografia de íons.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos descritos pela isortema linear (Eq.3) e pelas isortemas não lineares de Langmuir (Eq. 3) e Freundlich (Eq. 4).

$$S = k_d C_e \tag{2}$$

$$S = \left(\frac{k_l C_e}{1+k_l C_e}\right) b \tag{3}$$

$$S = k_f C_e^{\,N} \tag{4}$$

Em que:
S é o grau de sorção (massa de soluto adsorvida por massa de solo seco);
C_e é a concentração de equilíbrio na fase líquida;
k_d, k_l e k_f são os coeficientes de partição Linear, de Langmuir e Freundlich, respectivamente;
b é a capacidade de adsorção máxima, da isoterma de Langmuir;
N é o expoente da equação de Freundlich.

A partir dos parâmetros fornecidos pelas equações 2, 3 e 4, R_d pôde ser calculado segundo as equações 5, 6 e 7, respectivamente, considerando-se a massa específica aparente seca (ρ_d) e a porosidade (n) da coluna de solo, conforme apresentado no item 2.3.

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} k_d \tag{5}$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} \frac{k_l b}{1+k_l C_e} \tag{6}$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} k_f (C_e)^{N-1} \tag{7}$$

2.3 Ensaio de coluna

A Tabela 1 apresenta as características do corpo de prova (CP) utilizado no ensaio de coluna. O CP foi compactado estaticamente, objetivando reproduzir as condições ótimas de compactação na energia Proctor normal descritas por Vega (2016).

Tabela 1. Características do corpo-de-prova utilizado no ensaio de coluna.

Altura (cm)	7,14
Diâmetro (cm)	7,00
Teor de umidade (%)	26,2
Massa específica seca, ρ_d (g/cm³)	1,56
Porosidade, n	0,46
Grau de saturação, s (%)	90

O ensaio de coluna foi realizado em um permeâmetro de parede flexível com carga constante, conforme apresentado na Figura 1. Uma tensão confinante de 50 kPa foi aplicada ao CP, em condição drenada, apenas para garantir a aderência da membrana. Todas as etapas do ensaio foram realizadas com gradiente hidráulico igual a 17.

Inicialmente, o CP foi saturado com água, por livre percolação, até que um regime de fluxo estacionário foi atingido, com um coeficiente de condutividade hidráulica igual a $2{,}2 \times 10^{-9}$ m/s. Após a fase de saturação, uma solução de KBr com concentração de Br^- igual a 100 mg/L foi injetada no topo da amostra, sendo o efluente periodicamente coletado na outra extremidade do CP, filtrado e armazenado para posterior análise da concentração de Br^- por meio de cromatografia de íons. O coeficiente de condutividade hidráulica durante o período de injeção da solução de KBr foi de $1{,}1 \times 10^{-9}$ m/s.



Figura 1. Sistema utilizado para realização do ensaio de coluna (Borges, 2024). Usado com permissão.

Aplicando-se as condições de contorno descritas pelas equações 8, 9 e 10 (Ogata & Banks, 1961) pode-se solucionar a Eq. 1 para o ensaio em consideração e, em seguida, ajustar os dados da curva de C/C_0 (x, t) a essa solução. Os ajustes foram feitos usando o módulo de modelagem inversa do *software* Hydrus-1D (Rassam *et al.,* 2018), que resolve numericamente a Eq. 1.

$$C(0,t) = C_0;\ t \geq 0 \quad (8)$$

$$C(x,0) = 0;\ x \geq 0 \quad (9)$$

$$C(\infty,t) = 0;\ t \geq 0 \quad (10)$$

As análises foram realizadas considerando-se o valor do coeficiente de difusão efetivo do Br^- no solo igual a $3{,}5x10^{-10}$ m^2/s. Esse valor foi obtido em ensaios de difusão pura realizados por Borges (2024). A sala em que o experimento foi realizado foi mantida sob temperatura controlada, a 20 ± 0,5 °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de sorção do Br^- e as isotermas ajustadas à curva experimental.

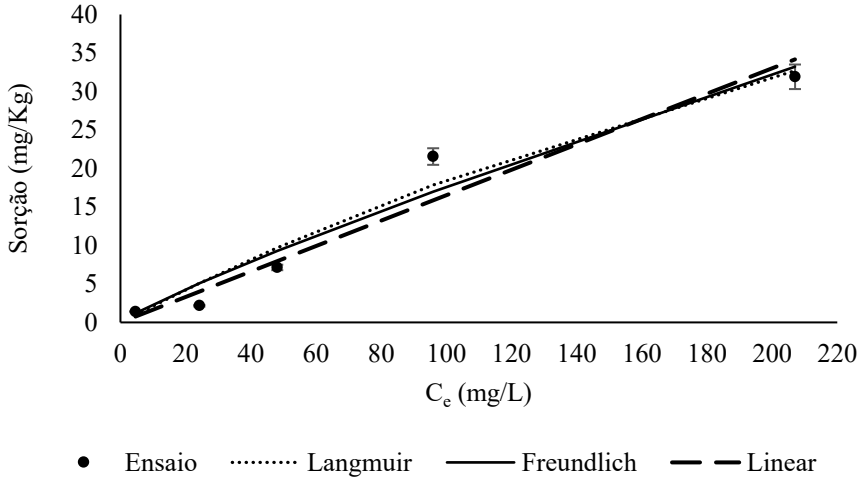


Figura 2. Isotermas de sorção do brometo

Os parâmetros das isotermans obtidos na retroanálise, os coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes e os R_d calculados a partir desses parâmetros são apresentados na Tabela 2. Os cálculos de R_d a partir das isotermas de Langmuir e Freundlich foram efetuados considerando-se C_e igual a 95,6 mg/L, que é a concentração de equilíbrio na fase líquida para a solução de KBr com concentração de Br^- igual a 100 mg/L, a mesma usada no ensaio de coluna.

Tabela 2. Parâmetros das isotermas, R^2 e R_d.

Isoterma	R^2	Parâmetros da isoterma		R_d
Linear (Eq. 2)	0,94	k_d (L/Kg)		1,6
		0,165		
Langmuir (Eq. 3)	0,96	k_l (L/Kg)	b (mg/Kg)	1,6
		0,0019	115,75	
Freundlich (Eq. 4)	0,96	k_f (L/Kg)	*N*	1,6
		0,313	0,874	

Observa-se que o R_d obtido indiretamente, a partir dos parâmetros das três isotermas analisadas, foi igual a 1,6, demonstrando que o solo sorveu Br^-. Utilizando-se esse valor na retroanálise dos dados do ensaio de coluna, obtém-se o ajuste apresentado na Figura 3. Nesse caso, a única variável retroanalisada foi a dispersividade longitudinal (δ).

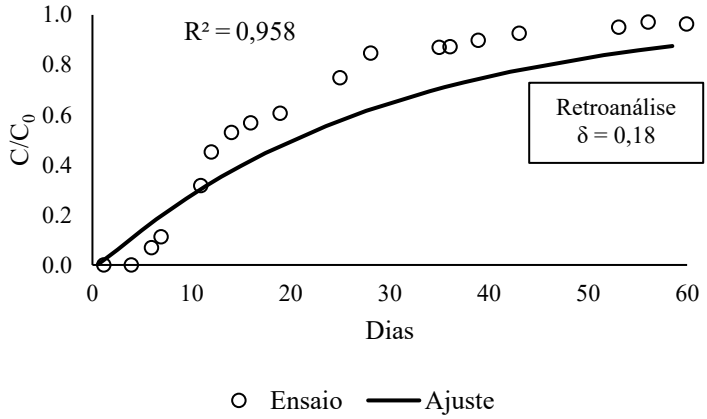


Figura 3. Dados do ensaio de coluna ajustado a Equação 1, para R_d = 1,6.

A Figura 4 apresenta os mesmos dados, porém com o ajuste otimizando os valores de R_d e δ. Neste cenário, em que o ajuste foi consideravelmente melhor (R^2 = 0,992) do que no apresentado na Figura 3 (R^2 = 0,958), o valor de R_d foi igual a 1,0, demonstrando uma situação de transporte conservativo, em que o solo não teria sorvido Br^-.

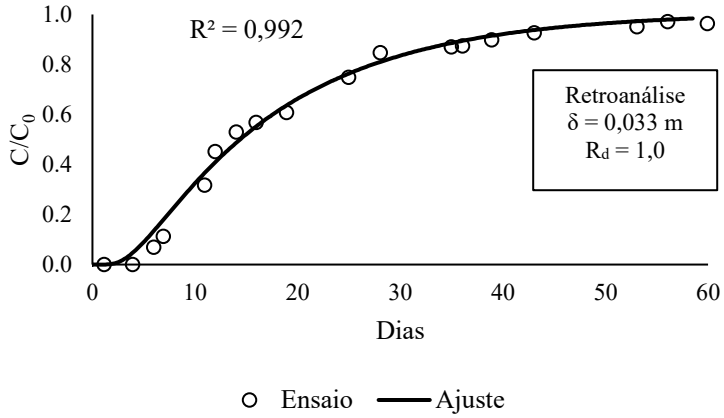


Figura 4. Dados do ensaio de coluna ajustados à Eq. 1, com R_d obtido por retroanálise.

Verifica-se, assim, que o valor de R_d obtido por meio dos ensaios de sorção (1,6) é maior do que o valor obtido por meio do ensaio de coluna (1,0). Borges (2024) chegou à mesma constatação com simulações para modelos matemáticos de dupla porosidade, em que apenas parte da rede de poros estava sujeita ao fluxo advectivo. Logo, uma modelagem do transporte de solutos em meios porosos que utilize valores de R_d calculados a partir de ensaios do tipo *batch* tenderá a ser irrealista, submestimando os tempos de chegada e de avanço das plumas de contaminação.

Van Genuchten e Wierenga (1976) afirmam que a sorção em solos estruturados é geralmente menor do que em solos não estruturados, pois apenas uma parcela dos sítios de sorção estaria disponível para sorver os íons da solução. Deve-se considerar ainda que, nos ensaios de sorção, o solo se encontra desagregado, e os grãos permanecem completamente imersos na solução e sob agitação mecânica. Há, portanto, muito mais área superficial de contato do que na amostra compactada utilizada na coluna.

Embora ensaios de coluna sejam mais demorados e exijam uma estrutura laboratorial mais complexa, eles são mais indicados para a obtenção de parâmetros a serem utilizados na modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados, como camadas indeformadas ou compactadas de solos. Além disso, ensaios de sorção são suscetíveis a uma gama de variáveis, como temperatura, pH e força iônica da

solução, razão sólido:líquido, método de separação de fases e de agitação (Roy et al, 1992), além do tempo de contato (Vega, 2016; Borges, 2024).

4 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram que o fator de retardo calculado a partir de dados obtidos em ensaios de sorção do tipo *batch* é superestimado em relação a valores obtidos em ensaios de coluna. Assim, quando se deseja obter parâmetros para a modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados é recomendável a realização de ensaios de coluna.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001 e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) – processo 310978/2025-4. Os autores agradecem ao Grupo de Estudos em Química Atmosférica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo e do Laboratório de Reciclagem, tratamento de resíduos e extração (LAREX) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo apoio nas análises cromatográficas utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2017). ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.

Borges, Y. I. S. (2024) *Microestrutura de um latossolo compactado e o transporte de solutos em não-equilíbrio físico*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 107 p.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Gabas, S. G. (2005). *Avaliação da adsorção de cádmio e chumbo em solo laterítico compactado por meio de extração sequencial*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Hemsi, P. S. 2001. *Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo paulista considerando a carga variável e o ponto de carga*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2007). *Manual Técnico de Pedologia*. IBGE. Rio de Janeiro, 316 p.

Ogata, A.; Banks, R. B. (1961) A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *Fluid movement in earth materials*, USGS: 13, 1961.

Roy, W. R., Krapac, I. G., Chou, S. F. J., Griffin, R. A. (1992). *Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals*. Technical Resource Document. EPA/530/SW-87/006-F. Champaign, Illinois, 116 p.

Shackelford, C. (1993) Contaminant transport. *In*: *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Daniel, D. E (org.). Springer-Science + Business Media: 686.

Smith P., Poch, R. M., Lobb, D. A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G. D., Anjos, L. H. C.; Castellano, M., Ndzana, G. M., Chenu, C., Naidu, R., Vijayanathan, J., Muscolo, A. M.,

Studdert, G. A.; Eugenio, N. R., Calzolari, M. C., Amuri, N., Hallett, P. (2024) *Status of the World's Soils*. Annu. Rev. Env. Resour. 49: 73-104.

Van Genuchten, M. T.; Wierenga, P. J. (1976). Mass-Transfer Studies In Sorbing Porous-Media .1. Analytical Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 40(4): 473-480, 1976.

Vega, B. J. J. *Cinética de adsorção de Pb e Cd em um solo laterítico* (2016). Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/79

Composição Química de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados por meio de Abordagem Semi-Quantitativa de Ensaios de Fluorescência de Raios X

Mateus Porto Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Érica Fernanda da Silva Tirelli
Coordenadora e pesquisadora de Laboratório, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil; erica.tirelli@maua.br

Eder Carlos Guedes dos Santos
Professor, Escola de Engenharia de São Carlos (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil, edersantos@ufg.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) são conhecidos por sua significativa variabilidade decorrende dos materiais que lhe dão origem. Recentemente, uma das técnicas que ganharam evidência para avaliar a composição química dos RCD-R é o ensaio de fluorescência de Raios X (FRX). Contudo, este ensaio ainda é incipiente no cenário nacional, requisitando maiores investigações. Neste contexto, este artigo objetiva determinar a composição química de amostras de RCD-R. Distintos métodos de preparação de amostra foram avaliados para a determinação da melhor granulometria e método de preparo. Para tanto, amostras de RCD-R foram coletadas após 500 dias em diferentes condições de temperatura e ensaiadas por FRX. Quanto ao método de preparação de amostras, notou-se que os resultados mais representativos foram obtidos com amostras trituradas, peneiradas em malha de 0,60 mm e submetidas à termogravimetria antes do ensaio de FRX. As oito amostras ensaiadas segundo este processo revelaram pequena variabilidade e composição química semelhante à relatada na literatura, com predominância dos principais compostos que compõem o cimento e as partículas de solo. Assim, este estudo demonstra o potencial do FRX na caracterização química de RCD-R e evidencia a importância da preparação das amostras.

PALAVRAS-CHAVE: Composição Química, Agregados Reciclados, Preparação de Amostras, Fluorescência de Raios X.

ABSTRACT: Recycled construction and demolition waste (CDW-R) is known for its significant variability due to the diversity of source materials. Recently, X-ray fluorescence (XRF) has emerged as a promising technique for assessing the chemical composition of CDW-R. However, its application remains limited in Brazil, requiring further investigation. In this context, this study aimed to determine the chemical composition of CDW-R samples and evaluate different sample preparation methods to identify the most suitable particle size and preparation procedure for XRF analysis. For this purpose, CDW-R samples were collected after 500 days under different temperature conditions and analyzed by XRF. The most representative results were obtained from samples that were crushed, sieved through a 0.60 mm mesh, and subjected to thermogravimetric analysis prior to XRF testing. The eight samples analyzed using this procedure exhibited low variability and a chemical composition consistent with values reported in the literature, with predominance of the main compounds associated with cementitious materials and soil particles. The results demonstrate the potential of XRF for the chemical characterization of CDW-R and highlight the importance of proper sample preparation.

KEYWORDS: Chemical Composition, Recycled Aggregates, Sample Preparation, X-Ray Fluorescence.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) vêm sendo tratados nas últimas décadas como possíveis substitutos de agregados naturais na construção civil. Essa abordagem colabora para diminuir os impactos causados pela geração abundante e má gestão dos resíduos de construção. Neste sentido, diversos estudos foram conduzidos nas últimas décadas buscando avaliar a aplicabilidade desse "novo" material de construção em distintas obras geotécnicas.

Embora a sua aplicação já tenha sido obtidos resultados positivos em termos técnicos, ambientais (Banias et al., 2010; Blengini et al., 2010) e econômicos (Coelho e De Brito 2012a; 2012b), é necessário avaliar ~~com~~ características específicas que possam ser decorrentes da heterogeneidade do material a ser adotado. No cenário internacional, alguns países já utilizam agregados reciclados em diversos tipos de obra, uma vez que as usinas de beneficiamento fornecem produtos mais padronizados, ou seja, produtos que tenham em sua composição mais de 90%, em massa, de seu material constituído de concreto (ARC) ou resíduo de material asfáltico (RAP). No cenário nacional, o fornecimento desse tipo material é ainda incipiente, pois requer maior controle na sua triagem dentro dos canteiros de obra, no tratamento e separação dos resíduos ao serem recebidos nas usinas de beneficiamento, e no processo de britagem e posterior peneiramento.

Nesse cenário, o mercado de agregados reciclados brasileiro ainda necessita lidar com uma significativa heterogeneidade dos materiais constituíntes e variabilidade de suas propriedades. Portanto, para viabilizar o uso desses materiais, esses devem ser analisados juntamente com os outros materiais constituintes da obra. Diante disso, é crucial avaliar a composição química do agregado reciclado.

Dentre as técnicas que ganharam destaque nos últimos anos, está a fluorescência de Raios X (FRX), que é uma técnica analítica multi-elementar não destrutiva que, por dispersão de energia, é capaz de identificar elementos químicos constituintes da amostra testada.

No entanto, tendo em vista distribuição granulométrica dos agregados reciclados, faz-se necessária a redução do tamanho das partículas para a realização do ensaio. Sánchez-Cotte et al. (2020) realizaram a britagem de partículas graúdas e peneiramento para obtenção de partículas inferiores a 0,075 mm para a realização dos ensaios de FRX. Já Nedeljkovic et al. (2021) realizaram a moagem manual de agregados reciclados e ensaiaram partículas menores que 0,01mm.

Moreno-Pérez et al. (2018) verificaram que os resultados obtidos pela análise semi-quantitativa de ensaios de FRX apresentaram boa concordância com ensaios mais específicos, como difração de Raios X (DRX) e microanálise química. Limbachiya et al. (2007) investigaram a parte fina de um agregado reciclado de concreto (ARC) e constataram a presença de calcita, portlandita e picos menores de muscovita/ilita nos agregados reciclados, embora tenham sido diretamente proporcionais à sua composição original. Angulo et al. (2009) e Sánchez-Cotte et al. (2020) também reportaram significativa presença de calcita. Diferentemente dos estudos anteriores, Meizhu et al. (2011) avaliaram os resultados de FRX em termos da composição elementar dos componentes químicos.

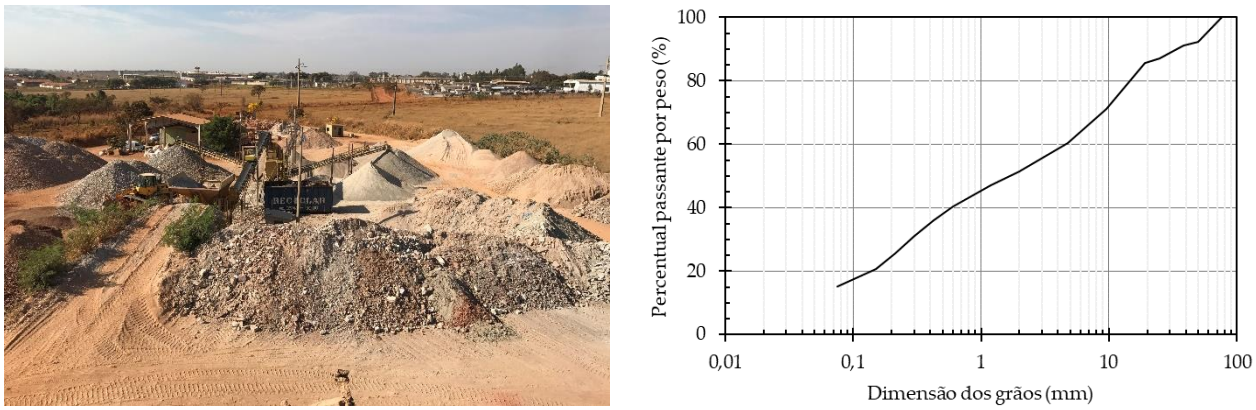
Limbachiya et al. (2007) salientam que as análises de FRX, apesar de já se encontrarem consolidadas, ainda precisam ser exploradas para caracterização de resíduos. Neste sentido, este artigo objetiva caracterizar resíduos de contrução e demolição reciclados e avaliar os distintos métodos de preparação de amostras para a realização dos ensaios de FRX.

2 METODOLOGIA

Deve-se salientar que os dados apresentados neste artigo fazem parte de um amplo estudo que engloba a durabilidade de geossintéticos, mais especificamente relacionada a danos e degradações de geossintéticos causadas por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Assim, o escopo deste artigo não engloba a análise dos geossintéticos, mas sim as características químicas do RCD-R investigado.

2.1 Resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R)

O resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) adotado neste estudo foi fornecido por uma usina de beneficiamento de resíduos localizada em Aparecida de Goiânia-GO (Figura 1a). Essa usina adota



(a) (b)

Figura 1. Resíduo de construção e demolição utilizado neste estudo: a) usina de beneficiamento, b) curva de distribuição granulométrica.

um processo duplo de britagem com britadores de mandíbula. O material processado é separado por um conjunto de peneiras, e seis agregados reciclados (de diferentes granulometrias) são fornecidos ao mercado. A distribuição granulométrica do material utilizado neste estudo está apresentada na Figura 1b.

2.2 Condição das amostras de RCD-R ensaiadas

O RCD-R investigado não foi ensaiado em sua condição natural, ou seja, após sua coleta na usina de beneficiamento. Neste caso, o RCD-R foi acondicionado em tanques de aço inoxidável junto à camadas de geossintéticos (geogrelhas ou geotêxteis) e o conjunto foi inundado com água destilada. A Figura 2 apresenta uma ilustração de um dos tanques e a forma de disposição dos geossintéticos e das camadas de RCD-R em seu interior.

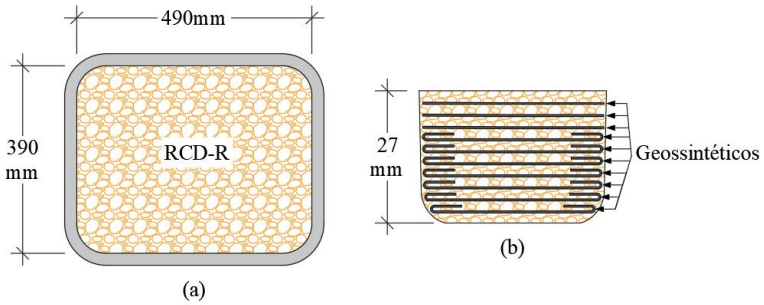
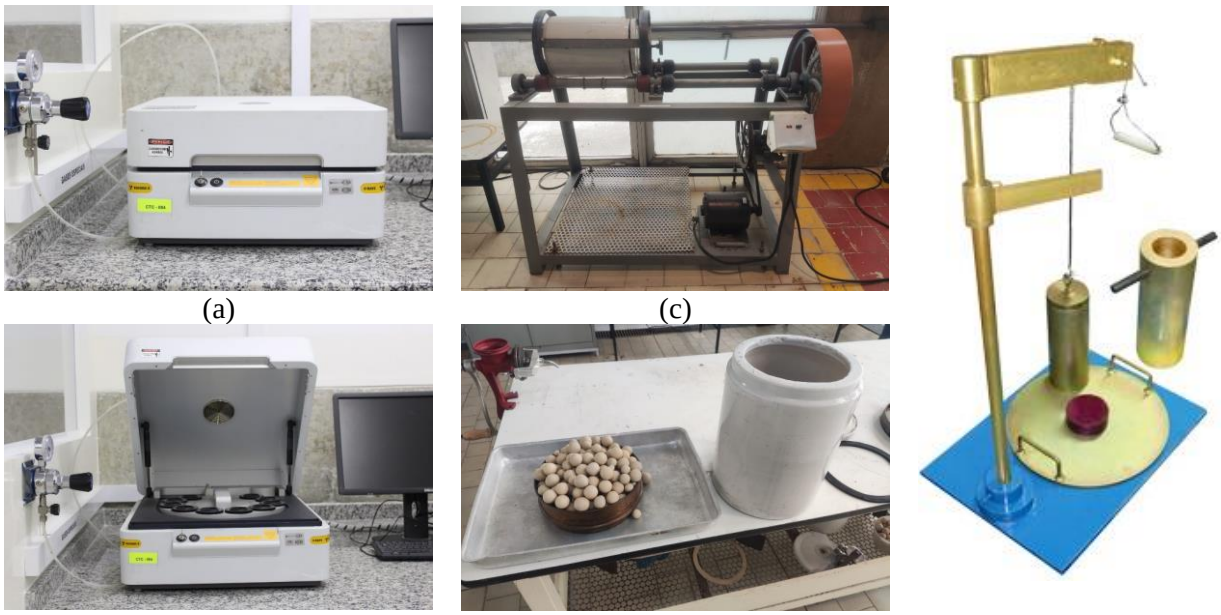


Figura 2. Tanque de degradação estanques em aço inoxidável: a) vista em planta e b) seção transversal típica dos tanques.

O RCD-R foi acondicionado oito tanques durante um período de 500 dias, onde quatro desses foram mantidos em temperatura ambiente e os outros quatro em temperatura de 50° ± 3°C. Após esse período, os geossintéticos foram exumados e amostras de RCD-R coletadas de cada tanque para realização do ensaio de FRX.

2.3 Ensaios de fluorescência de Raios X (FRX)

Os ensaios de FRX foram realizados no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), no equipamento da marca Malvern Panalytical, conforme apresentado na Figura 3a. Tendo em vista que o equipamento não é dimensionado para a realização de ensaios em solos, ou mesmo resíduos de construção, fez-se necessário preparar as amostras antes de realizar os ensaios. Distintos métodos de preparação foram adotados até determinar o método de preparo ideal das amostras. A Tabela 1 descreve os métodos de preparo adotados.



(a) (c) (b) (d) (e)

Figura 3. Equipamentos utilizados no estudo: (a) e (b), para a realização do ensaio de FRX; (c) e (d) trituração com moinho de bolas, e (e) trituração com a queda livre de peso.

Tabela 1. Descrição dos métodos de preparo adotados.

Método de preparo	Descrição
M1	Peneiramento do material em malha de abertura de 2,00 mm [1]
M2	Peneiramento do material em malha de abertura de 1,18 mm [1]
M3	Peneiramento do material em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M4	Fase líquida do sistema RCD-R/água [2]
M5	Trituração do material com moinho de bolas durante 24 h (Figura 3b), seguido de peneiramento em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M6	Trituração do material com equipamento a queda livre de peso (Figura 3e), seguido de peneiramento em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M7	Realização de ensaio de termogravimetria, seguido dos métodos adotados em 'M5'.
M8	Realização de ensaio de termogravimetria, seguido dos métodos adotados em 'M6'.

Nota: [1] Utilizou-se as partículas passante na peneira indicada para a realização do ensaio.
[2] Amostra obtida pela coleta da fase líquida sobrenadante presente nos recipientes após 500 dias de exposição do RCD-R em água destilada.

Após a realização dos ensaios, o equipamento fornece os percentuais de material inorgânico na composição da amostra por meio de uma análise semi-quantitativa. Essa análise semi-quantitativa consiste em quantificar as amostras através de padrões feitos de materiais puros utilizando o módulo Omnian do equipamento. Esse módulo é a combinação de amostras de software e configuração permitindo realizar ajustes finos do software Omnian e do espectrômetro, enquanto incorpora recursos de elementos espectrais que superam as limitações semiquantitativas dando resultados precisos e confiáveis. Cabe resaltar que o equipa mento abrange elementos de F a U, apresentando limitações de identificação de alguns componentes químicos mais leves, tais como: Na e Mg.

Os métodos de preparação de amostras foram avaliados de forma sequencial. Inicialmente, os métodos M1 e M2 foram investigados para verificar a influência do tamanho das partículas. Após a constatação de que as partículas ainda apresentavam dimensões inadequadas para análise por FRX, adotou-se o método M3. Em seguida, foram avaliadas a fase líquida (M4) e duas técnicas de trituração (M5 e M6). Por fim, em função dos

resultados obtidos pelos métodos anteriores, foram desenvolvidos os métodos M7 e M8, que incorporaram informações provenientes de ensaios de termogravimetria.

Os ensaios de análise termogravimétrica (TG) foram realizados de acordo com a ASTM E1131. Utilizou-se um analisador termogravimétrico TA Instruments Q50, capaz de realizar medidas contínuas de massa com resolução de 0,1 μg. Amostras com massa entre 10 e 15 mg foram aquecidas sob atmosfera inerte de nitrogênio (50 mL/min) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 560°C. Após atingir essa temperatura, a amostra permaneceu isotermicamente por 10 minutos, até estabilização da massa. A perda de massa observada durante o ensaio foi utilizada para estimar a fração de compostos voláteis e demais constituintes não incorporados à fração inorgânica considerada na análise por FRX., enquanto a massa residual foi considerada representativa da fração inorgânica da amostra.

O percentual de material inorgânico obtido nos ensaios de TG foi posteriormente utilizado como dado de entrada no módulo Omnian do equipamento de fluorescência de Raios X (FRX). Dessa forma, a quantificação semi-quantitativa dos compostos químicos foi realizada considerando apenas a fração inorgânica da amostra, permitindo melhorar o fechamento composicional dos resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Investigação dos métodos de preparação das amostras

Os dois métodos inicialmente utilizados de preparação de amostra (M1 e M2) forneceram partículas ainda muito grandes para a realização dos ensaios. Já a preparação M3, resultou em amostras com dimensões factíveis para realização do ensaio, revelando, assim, a necessidade de peneiramento do material em malha com 0,60 mm de abertura.

Os resultados dos métodos de preparação M3 a M6 estão apresentados na Tabela 2. Neste caso, os resultados obtidos foram em função dos elementos químicos. Primeiramente, cabe ressaltar os resultados com o método de preparo M4 (fase líquida do sistema RCD-R/água). Notou-se que esses foram muito pouco representativos, elucidando que a composição química da fase líquida do sistema RCD-R/água diverge daquelas obtidas de seu material sólido.

Tabela 2. Composição (elementos químicos) do RCD-R adotando diferentes métodos de preparação de amostra.

Elemento	Em composição em função do método de preparação das amostras			
	M3 (%)	M4	M5 (%)	M6 (%)
Ca	19,80	0,11%	16,92	15,38
Si	8,48	71,6 ppm	9,97	12,97
Fe	8,16		8,05	6,41
Al	3,38	102,6 ppm	3,05	3,04
K	1,23	210,7 ppm	1,79	1,81
Ti	1,05		0,90	0,73
S	0,35		0,33	0,34
Mg	0,29		0,33	0,32
Sr	0,12		0,10	0,10
Total	42,26		41,42	41,10

Já no caso dos métodos de preparo M3, M5 e M6, notou-se que não se obteve um quantitativo total representativo da amostra, ou seja, com a análise em termos dos elementos químicos, o equipamento somente conseguiu fornecer um valor próximo de 42% dos materiais constituintes do RCD-R analisado. Esse comportamento sugere limitação do balanço de massa adotado pelo software, possivelmente associada à ausência de informação prévia sobre a fração orgânica e/ou componentes leves não detectados adequadamente

pelo equipamento.

Deste modo, optou-se por realizar ensaios de termogravimetria (TG) para avaliar a presença ou não de matéria orgânica em sua composição. Os resultados do ensaio de TG revelaram ínfima fração de compostos voláteis e material não inorgânico. Este dado foi atribuído como dado de entrada antes do tratamento dos dados nas amostras preparadas com os métodos M7 e M8. Os resultados, apresentados em termos dos compostos químicos na Tabela 3, mostraram-se mais condizentes, ou seja, estimaram mais de 98% da composição do RCD-R. Assim, a incorporação dos resultados de TG permitiu restringir a fração não inorgânica da amostra, elevando o fechamento do balanço composicional para valores superiores a 98%. Ademais, os métodos adotados para trituração das amostras pouco influenciaram os resultados encontrados. Tendo em vista que a trituração com a queda livre do peso não requer o uso de equipamento por um período 24 horas, o método de preparação de amostra M8 (Tabela 1) foi utilizado nas demais amostras.

Tabela 3. Composição (composto químico) do RCD-R adotando os métodos de preparação M7 e M8.

Composto	Composição em função do método de preparação das amostras (%)	
	M7	M8
SiO_2	52,67	44,25
CaO	20,31	24,76
Al_2O_3	13,83	14,66
Fe_2O_3	6,48	9,10
K_2O	2,35	2,55
SO_3	1,18	1,26
MgO	1,86	1,95
TiO_2	0,92	1,25
BaO	0,13	-
Outros[1]	0,27	0,22

Nota: [1] Pode conter Rb_2O, ZnO, Nb_2O_5, Y_2O_3, PbO, Cr_2O_3, ZrO_2, SnO_2, HgO, Cl, NiO, MnO, CuO, e Ga_2O_3 com concentrações inferiores a 1000 ppm.

3.2 Composição química das amostras de RCD-R coletadas nos tanques

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de fluorescência de Raios X realizados nas amostras coletadas dos tanques sob condição de temperatura ambiente (T1 a T4) e também sob temperatura de 50 ± 3°C (T5 a T8). O primeiro aspecto a ser enaltecido dos resultados encontrados está relacionado à variabilidade. Nota-se que independente do composto analisado, o coeficiente de variação é inferior a 11%. Ao analisar os

Tabela 4. Composição RCD-R coletados dos tanques estanques após 500 dias de exposição.

Composto	Percentual do composto (%)								Média	COV
	Temperatura ambiente				Temperatura de 50° ± 3°C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8		
SiO_2	41.75	40.87	43.02	39.12	40.60	41.95	40.67	42.64	41.33	3,06
CaO	28.63	29.01	29.21	32.59	24.92	27.07	31.54	29.47	29.05	8,23
Al_2O_3	13.53	13.76	12.39	11.65	13.92	14.30	12.23	11.83	12.95	8,01
Fe_2O_3	8.42	8.73	7.99	8.64	8.87	8.97	8.49	8.51	8.58	3,54
K_2O	2.41	2.25	2.16	2.07	2.48	2.46	1.95	2.11	2.23	8,76
SO_3	1.84	2.01	1.74	1.87	1.63	1.76	1.38	1.71	1.74	10,74
MgO	1.72	1.83	1.86	2.01	1.74	1.53	2.06	2.13	1.86	10,76
TiO_2	1.17	1.27	1.11	1.43	1.28	1.40	1.14	1.10	1.24	10,20
BaO	0.15	0.00	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.14	5,56
SrO	0.12	0.11	0.10	0.13	0.00	0.11	0.12	0.11	0.11	8,42
Outros [1]	0.27	0.18	0.27	0.35	4,42	0.32	0.29	0.26	0.76	3,06

Nota:[1] Pode conter Rb_2O, ZnO, Nb_2O_5, Y_2O_3, PbO, Cr_2O_3, ZrO_2, SnO_2, HgO, Cl, NiO, MnO, CuO, e Ga_2O_3 com concentrações inferiores a 1000 ppm.

compostos de maior predominância na composição química do resíduo, nota-se que essa variação foi inferior a 8 %. Deste modo, por se tratar de o mesmo RCD-R de origem, porém acondicionado em diferentes tanques, nota-se pouca variação na composição química do resíduo, o que pode ser visto positivamente para o estudo tendo em vista que os geossintéticos estiveram em contato com materiais reciclados de composição química semelhante.

Contudo, mais importante do que a análise dos resultados em seus valores absolutos é avaliar se as composições encontradas estão de acordo com o material ensaiado. A composição química obtida por FRX (Tabela 4) enquadra-se nas faixas tipicamente reportadas para RCD-R misto e RCA: SiO_2 39–70%, CaO 10–36%, Al_2O_3 5–20%, Fe_2O_3 0,5–14% e SO_3 usualmente < 3,9% (Kou et al., 2005; Barbudo et al., 2012; Ulsen et al., 2010). O SiO_2 decorre primariamente de quartzo e silicatos provenientes de agregados naturais, areia e materiais cerâmicos. O CaO reflete argamassa aderida, pasta de cimento hidratada e calcita remanescentes, sendo o enriquecimento cálcico a principal diferença química entre agregados reciclados e naturais (Kou et al., 2005; Angulo, 2005; Moreno-Pérez et al., 2020). Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão associados a cerâmicas vermelhas, argilominerais, feldspatos e, em menor grau, fases do clínquer e solos ferruginosos (Angulo, 2005; Barbudo et al., 2012). A presença de SO_3 (1,74%) indica fases sulfatadas (gesso, etitringita) oriundas de componentes cimentícios e argamassas (Sánchez-Cotte et al., 2020).

Do ponto de vista geotécnico, o elevado CaO sinaliza maior teor de pasta aderida, o que correlaciona-se com maior absorção de água, menor massa específica aparente e comportamento mecânico mais variável (Angulo, 2005; Kou et al., 2005). Geoambientalmente, a dissolução de fases cálcicas gera lixiviados com pH frequentemente superior a 10 e alcalinidade expressiva, enquanto o SO_3 pode contribuir para liberação de sulfatos; ambos os fenômenos são atenuados pela carbonatação progressiva do material (Gupta et al., 2018; Nunes et al., 2020). Em aplicações com geossintéticos, a alcalinidade do RCD-R pode acelerar hidrólise em polímeros suscetíveis, requerendo avaliação de compatibilidade (Fleury, 2024).

3 CONCLUSÃO

A heterogeneidade dos resíduos de construção e demolição de reciclados (RCD-R) é uma característica marcante desse material. Este artigo investigou distintos métodos de preparação de corpos de prova para caracterizçaão química via FRX, determinou a metodologia mais adequada e, posteriormente, caracterizou oito amostras de RCD-R. De posse dos resultados encontrados, destacam-se as seguintes conclusões.

- O procedimento composto por trituração mecânica por queda livre de peso, peneiramento em malha de 0,60 mm, ensaio de termogravimetria e posterior análise por FRX mostrou-se o método mais adequado para caracterização química semiquantitativa do RCD-R investigado;
- Embora seja necessária a trituração das amostras e a realização de ensaios em amostras menores que 0,60 mm, os diversos métodos de trituração investigados não apresentaram influência significativa nos resultados encontrados;
- A realização de ensaios de termogravimentria nas amostras antes da execução do ensaio de fluorescência de Raios X (FRX) mostrou-se valiosa por permitir restringir a fração não inorgânica considerada no balanço composicional inserida como in-put no tratamento dos resultados de FRX. Assim, os resultados decorrentes deste último ensaios se tornaram mais precisos;
- Os ensaios de FRX realizados nas amostras de RCD-R revelaram pequena variabilidade na composição química do material. Destacam-se a presença de dióxido de sílica e óxido de cálcio que são provenientes ~~de~~ dos principais compostos do cimento e do própio solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angulo, S.C. (2005). *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. Tese de Doutorado, EP-USP.

Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M., Kahn, H., Cincotto, M.A. (2009). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*. 29(2), p. 721-730.

Banias, G., Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Tarsenis, S. (2010). Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. *Build Environ.* 45(10), p. 2317–2326.

Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F. (2012). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from construction and demolition concrete. *Waste Management*, 32(11), 2200–2208.

Barbudo, A., Galvín, A.P., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Manag*. 32(6), p. 1229–1235.

Blengini, G.A., Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *J Clean Prod.* 18(10–11), p. 1021–1030.

Coelho, A., De Brito, J. (2012b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: Economic sensitivity analysis. *J Clean Prod.*, 39, p. 329–337.

Coelho, A., De Brito, J. (2012b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Location, materials, technology and economic analysis. *J Clean Prod.*, 39, 338–352.

Fleury, M.P. (2024). *Durability of geosynthetics in reinforced structures using recycled construction and demolition waste as backfill material: in-isolation and successive effects*. Tese de Doutorado, EESC-USP.

Kou, S.C., Poon, C.S., Etxeberria, M. (2005). Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled aggregates and natural aggregates in concrete. *Waste Management*, 27(4), 555–562.

Limbachiya, M.C.; Marrocchino, E.; Koulouris, A. (2007). Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*. 27(2), p. 201-208.

Moreno-Pérez, E., et al. (2020). The chemical-mineralogical characterization of recycled concrete aggregates from different sources and their potential reactions in asphalt mixtures. *Materials*, 13(24), 5633.

Moreno-Pérez, Emiliano; Hernández-Ávila, Juan; Rangel-Martínez, Yamile; Cerecedo-Sáenz, Eduardo; Arenas-Flores, Alberto; Reyes-Valderrama, Ma.; Salinas-Rodríguez, Eleazar. (2018). Chemical and Mineralogical Characterization of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste from Mexico City. *Minerals*. 8(6), p. 237.

Nedeljković, Marija; Visser, Jeanette; Nijland, Timo G.; Valcke, Siska; Schlangen, Erik (2021). Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: a comparative study. *Construction And Building Materials*. 270, p. 121475

Nunes, F.F., et al. (2020). Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. Journal of Cleaner Production, 277, 124227.

Sánchez-Cotte, E.H.; Pacheco-Bustos, C.A.; Fonseca, A.; Triana, Y.P.; Mercado, R.; Yepes-Martínez, J.; Lagares Espinoza, R.G. (2020). The Chemical-Mineralogical Characterization of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources and Their Potential Reactions in Asphalt Mixtures. *Materials*. 13(24), p. 5592.

Gupta, G., Kluge, M., Chadik, P.A., Townsend, T.G. (2018). Recycled concrete aggregate as road base: leaching constituents and neutralization in the environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 04017308.

Ulsen, C., Kahn, H., Angulo, S.C., John, V.M. (2010). Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggreagtes from the state of São Paulo. *Rev Esc Minas*. 63(2), p. 339–346.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/80

Conductividad hidráulica en campo y laboratorio: ensayos en Libertad Clay-Uruguay

Marcos Musso 1
Prof.Adjunto, Dto. Ing. Geotécnica - Fac. De Ingeniería - UdelaR, Montevideo, Uruguay, mmusso@fing.edu.uy

RESUMEN:
Existen diferencias entre los valores de conductividad hidráulica determinadas en laboratorio y en campo. En laboratorio las condiciones de están controladas: volumen de la muestra a ensayar, agua destilada, temperatura controlada. En cambio en campo existen variables como suelo no saturado, mayor volumen ensayado, condiciones de clima no controladas (temperatura, lluvia). En los 80´s y 90´s Keller et al. (1989), Fortin et al. (1991), Klint (2009) determinan que existen diferencias de conductividades hidráulicas cuando se mide en campo y laboratorio. Plantean los conceptos de conductividad hidráulica Matricial (KM) y conductividad hidráulica Total (KT), mostrando que esa diferencia puede ser explicada por macroporos como grietas de desecación, hueco de raíces, cuevas de animales, entre otros. En Uruguay, desde 2016 se investigan las propiedades hidráulicas de Libertad Clay considerada como "impermeable" y está compuesta por suelos limo arcillosos y arcillosos generados durante el Cuaternario con aportes de loess y de ceniza volcánica. Los ensayos de laboratorio confirmaron las características composicionales similares a los antecedentes, así como la baja conductividad hidráulica medida en laboratorio (< 10^{-9} m/s). Sin embargo mediante ensayos de infiltración en pozo se determinaron valores 100 a 1000 veces mayores.

PALAVRAS-CHAVE: Conductividad hidráulica matricial KM, Conductividad hidráulica total KT, Libertad Clay-Uruguay

ABSTRACT:
There are differences between hydraulic conductivity measure in laboratory and field. In laboratory, it is knowed sample volume, water and temperature. However in field test soil has large volume and it is unsatured, and unconrolled weather condition as rain and temperature. In 80's and 90´some researches show values differensces between field and laboratory hydraulic conductivity test and they propuse intergranular and yielded hydraulic conductivity, KM and KT respectivility (Keller et al. 1989; Fortin et al. 1991; Klint 2009). This differences are generating by fissures, macropores, among others. In Uruguay since 2016 Libertad Clay hydraulic properties are researched. This quaternary soil is "impermeable" compouse by silty clayey and clay with loess and volcanic ash. Laboratory test value show low hydraulic conductivity (< 10^{-9} m/s) but field tests show 100 to 1000 higher values than laboratory test.

KEYWORDS: Intergranular hydraulic conductivity KM, yielded hydraulic conductivity KT. Libertad Clay, Uruguay.

1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades hidráulicos de los suelos son generalmente evaluadas en condiciones de laboratorio, em muestras indeformadas o compacadas. En el caso de los suelos finos es común usar los parámetros de compactación obtenidos em el ensayo proctor (energía normal o modificada). Considerando suelos finos conteniendo más de 25 % de arcilla, la conductividad hidráulica que se mide generalmente es menor a 10^{-9} m/s, valores exigidos por muchas legislaciones ambientales para barrera de arcilla de fondo de rellenos sanitarios, laguna de tratamiento de efluentes, represas de residuos de minería.

En cambio cuando se mide en campo hay varios métodos que evalúan en diferentes profundidades "*in situ*". El sistema de doble anillo mide de forma superficial la infiltración para determinar la permeabilidad.

El método que usa el sistema de frasco de Mariotte (conocido como ensayo Guelph) evalúa la infiltración en varias profundidades, tanto en condición no saturada como saturada. En ambos casos se realiza desde la superfície y sólo necesita medirse volumen de agua infiltrado y tiempo transcurrido. El ensayo de infiltración en pozo como el propuesto por Zangar (1953) permite medir tanto en condición no saturada como saturada, pero en el caso de la condición no saturada es necesario conocer profundidad del nivel freático así como cumplir com algunos requisitos de geometria del ensayo que involucra: diámetro del pozo, distancia del fondo del pozo al nivel freático, longitud del pozo, área filtrante.

Desde hace varias décadas que se observa la diferencia entre los valores de conductividad hidráulica de laboratorio y de campo, por lo cual se considera que se están midiendo "conductividades hidráulicas diferentes". En el caso de los ensayos de laboratorio se mide conductividad hidráulica matricial (KM) y em los ensayos de campo conductividad hidráulica total KT (Keller et al. 1989). Usando estos conceptos vários investigadores encontraron que los valores de KT son 100 a 1000 veces mayor que los valores de KM.

En este trabajo se investigan y analizan los valores de KT y KM de Libertad Clay, un suelo arcilloso que es usado como barrera impermeable em obras de protección ambiental.

2 ANTECEDENTES

Libertad Clay son sedimentos cuaternarios que cubre el acuífero Raigón (sedimentario) en el departamento de San José, extrayéndose agua para actividades agrícolas y abastecimiento de poblaciones. La componen limos arcillosos y arcillas, con niveles decimétricos de loess, de color marrón rojizo y presenta concreciones de carbonato de calcio. El espesor es variable, alcanzado 30 m de espesor (Preciozzi et al. 1985). Tiene pequeña a nula importancia como acuífero por su baja permeabilidad (Heinzen et al. 1986), considerado prácticamente impermeable Carta Geotécnica (1997), sin embargo ensayos de campo de infiltración muestran que pueden existir variaciones y valores mayores a las referencias citadas (Musso et al. 2012, Rodríguez et al. 2017).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos de Libertad Clay fueron colectados mediante excavación en pozos con profundidades de 3 m (Figura 1), realizando el muestro cada 0,5 m para caracterización en laboratorio mediante clasificación de suelos (ASTM 1988). Las muestras fueron registradas por el número de pozo (P1, P2, etc.) y por la profundidad (1 = 0,5 m; 2 = 1,0 m, etc..), identificándose P1-1, P1-2, etc.. Se extrajeron muestras indisturbadas a 1,0 m y 2,0 m de profundidad para determinar peso específico. El pozo se dejó preparado para hacer los ensayos de infiltración a posteriori.

Los suelos caracterizados (clasificación de suelos y capacidad de intercambio catiónico) usando las normas ASTM (1988) y el método de azul de metileno. Las propiedades hidráulicas en campo se determinaron mediante ensayos de infiltración a carga constante (Azevedo & J. Alburquerque 2013) en el pozo donde se extrajeron las muestras para clasificación. En laboratorio la conductividad hidráulica se determinó a carga constante (ASTM 1988), compactando el suelo en las condiciones de peso específico determinado en las muestras indisturbadas.

4 RESULTADOS

Los suelos analizados están compuestos por arcilla y limo, los cuales sumados representan porcentaje superiores al 85%, el contenido de arena es bajo a veces menor a 5% (Figura 2). Los suelos presentan alta compresibilidad, las arcillas identificadas mediante la capacidad de intercambio catiónico son del grupo de la emectitas o mezclas esmectita-illita (Tabla 1).

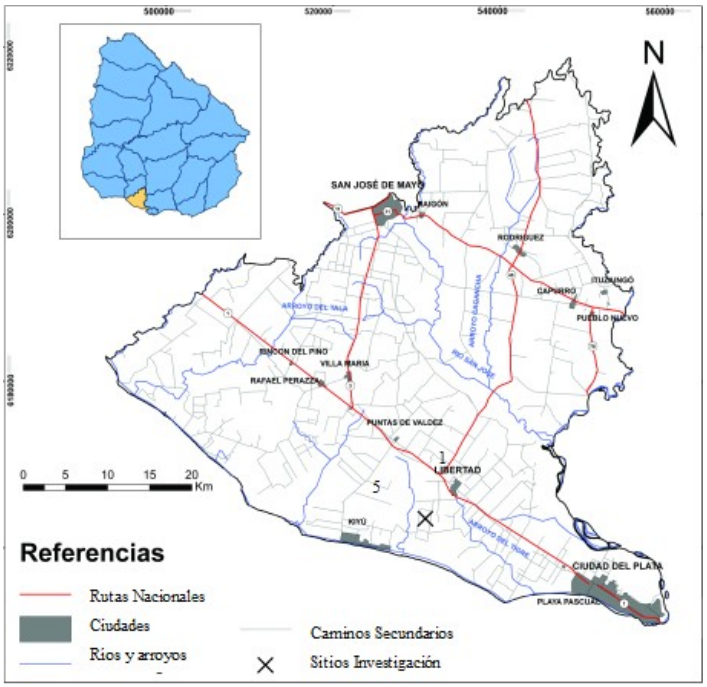


Figura 1. Localización de los Pozos 1 y 5 de investigación.

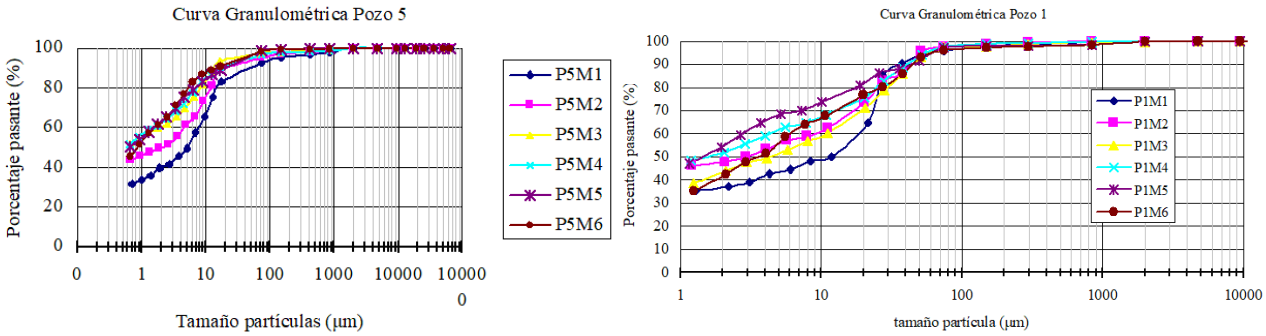


Figura 2 Curvas Granulométricas

Tabla 1. Caracterización de los suelos

Muestra	CIC suelo	Pasante #200	Arcilla	LL	IP	Clasificación
	ph7 (cmol/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	SUCS
P1-1	30	98	36	45	21	CL
P1-2	36	99	48	54	28	CH
P1-4	30	99	51	65	39	CH
P1-6	34	97	42	58	27	MH
P5-1	sd	95	40	44	22	CL
P5-2	21,8	96	50	53	29	CH
P5-3	sd	98	60	56	35	CH
P5-4	26,8	97	62	69	41	CH
P5-5	sd	99	63	73	39	MH
P5-6	33,2	99	62	45	21	CL

En los valores de los ensayos de conductividad hidráulica en laboratorio se observan bajos valores, menores a 10-9 m/s (Figura 3), verificándose lo identificado por outros investigadores para los suelos de

Libertad Clay.

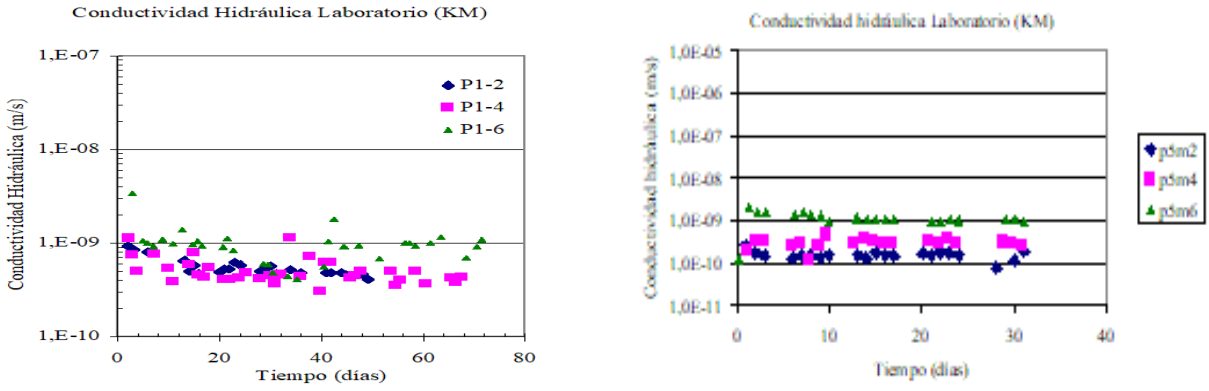


Figura 3 Conductividad hidráulica en laboratorio - KM

En cambio los valores de los ensayos de infiltración en pozo son 100 a 1000 veces mayores que los obtenidos en labortorio.

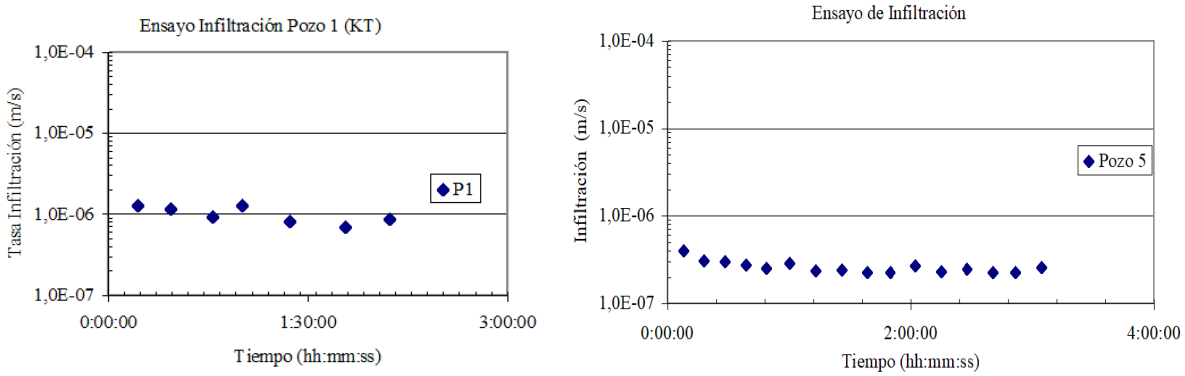


Figura 4 Conductividad hidráulica en campo - KT

En los ensayos realizados se verifica que los suelos estudiados tiene compartamiento similares a los estudiados por Keller et al. (1989) y otros investigadores en acuitardos. La diferencia entre los ensayos de laboratorio muestra la necesidad de considerar 2 clases de conductividades hidráulicas (matricial en laboratorio, total en campo). El alto contenido de arcilla en los suelos finos, mayor a 35%, no garantiza que en campo, en condiciones naturales, se puedan obtener bajos valores de conductividad hidráulica.

5 CONCLUSIONES

Libertad Clay esta constituida por suelos finos, conteniendo más de 35 % de arcilla., fundamentalmente esmectita. Los valores de KM están dentro del rango esperado de baja permeabilidad para suelos finos compactados. Sin embargo los valores obtenidos enm campo son valores 100 a 1000 veces mayores.Esta diferencia puede atribuirse a caminos preferenciales como grietas, macroporos que no se tiene em muestras d elaboratorio compactadas.
Para proyecto de ingeniería donde la estanquiedad es necesaria suelos arcillos “in situ” pueden no presentar las condiciones de muy baja permeabilidad exigidas. Ensayos de campo deben ser realizados para verificar comportamiento hidráulico.

AGRADECIMIENTOS

A los dueños de los predios por permitir el acceso y soporte para los ensayos de infiltración, A la ANII por financiar la investigación con el Fondo María Viñas **FMV-2014-104174-ANII-Uruguay**.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Azevedo & J. Alburquerque (Ed) *Ensaio de Permeabilidade em Solos - Orientações para sua execução no campo.* ABGE , Sao Pablo-SP-2013

ASTM (1988) *Standart methods*. *Annual Book of Standards* – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, V.04.08, ASTM Publication, Philadelphia, USA.

Fortin et al. (1991) *Hydrogeology and hydrochemistry of an aquifer-aquitard system within glacial deposits,Saskatchewan, Canada.* Journal of Hydrology, 126 (1991) 265-292.

Heinzen, W; Velozo, C.; Carrión, R.; Cardozo, L.; Mandracho, H.; Massa, E. (1986) *Mapa Hidrogeológico del Uruguay escala 1:2000000.* DINAMIGE. Montevideo, Imp. Polo, 70 p

Keller, K.; Garth Van Der Kamp & John A. Cherry (1989) *A multiscale study of the permeability of a thick clayey till***.** Water Resources Research. **Volume 25, Issue 11,** pages 2299–2317, November 1989.

Klint (2009) *The Interpretation and Characterisation of Fractures in Till.* Symposium on Aquitard University of S k t h. Hydrogeology Saskatchewan June 4-5 2009

Musso, M.; Pereira, S.; Fajardo, L. 2012 *Conductividad hidráulica de suelos cultivados con caña de azúcar previo aplicación de vinaza.* In: JORNADAS DEL CENOZOICO, Uruguay. CD-Rom.

Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. & Rossi, P. 1985. *Carta Geológica del Uruguay a Escala 1.500.000*. DINAMIGE, Montevideo, Imp. Polo, 90 p

Rodriguez Carrión, R.; Bango, G.; Flaquer, A.; Musso, M. 2017 *Propiedades Hidráulicas de la Fm Libertad: Ensayos de Campo y Laboratorio*. IN: XX CONGRESO ARGENTINO DE GEOLOGÍA. TUCUMÁN. ARGENTINA

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/81

Desempenho não drenado de argila pura e reforçada com fibras de açaí em ensaios inundados de Direct Simple Shear (DSS)

Augusto Barbosa Silva, Msc.
Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, augusto.silva@ifro.edu.br

Lídia Bruna Teles Gonzaga, Msc.
Professora, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, lidia.bruna@ifro.edu.br

José Wilson dos Santos Ferreira, Dsc.
Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande, Dsc.
Professora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: Este estudo avaliou o comportamento mecânico de uma argila tropical reforçada com 1% de fibras de açaí por meio de ensaios de Cisalhamento Simples Direto (DSS). Os experimentos foram conduzidos em condição consolidada-não drenada e inundada, sob tensões de 200, 400 e 800 kPa, visando preencher lacunas na literatura sobre o uso deste reforço sob controle de volume. Os resultados finais demonstraram benefícios consistentes do reforço de açaí: houve um incremento de 4,34° no ângulo de atrito efetivo, enquanto a análise das trajetórias de tensão revelou que a inclusão de fibras mitigou a geração de poropressão positiva, preservando a tensão normal efetiva de forma mais eficiente que o solo puro. Quanto à rigidez, observou-se aumento no módulo de cisalhamento secante (G), embora a degradação da rigidez tenha seguido padrões similares. O reforço com fibras de açaí se mostra uma estratégia eficaz para melhorar a estabilidade e a ductilidade de solos argilosos saturados, consolidando-se como uma alternativa sustentável para a engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: DSS, Fibras de açaí, Argila tropical, Resistência não drenada.

ABSTRACT: This study evaluated the mechanical behavior of a tropical clay reinforced with 1% açaí fibers through Direct Simple Shear (DSS) tests. The experiments were conducted under consolidated-undrained and inundated conditions, at vertical stresses of 200, 400, and 800 kPa, aiming to address gaps in the literature regarding the use of this reinforcement under volume-controlled conditions. The results demonstrated consistent benefits from the açaí reinforcement: there was a 4.34° increase in the effective friction angle, while the analysis of stress paths revealed that the inclusion of fibers mitigated the generation of positive pore water pressure, preserving the effective normal stress more efficiently than the pure soil. Regarding stiffness, an increase in the secant shear modulus (G) was observed, although stiffness degradation followed similar patterns. Reinforcement with açaí fibers proves to be an effective strategy for improving the stability and ductility of saturated clayey soils, establishing itself as a sustainable alternative for geotechnical engineering.

KEYWORDS: DSS; Açaí fibers; Tropical clay; Undrained shear strength.

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o uso de fibras naturais como alternativa aos métodos tradicionais de estabilização de solos, que frequentemente

demandam alto consumo energético e elevada emissão de CO_2. Nesse contexto, o reforço com fibras vegetais atua na mobilização de tensões de tração, além do aumento da resistência ao cisalhamento através do intertravamento entre as fibras e a matriz do solo.

Estudos anteriores com fibras de sisal e coco indicam ganhos significativos em ductilidade e resistência, embora a eficiência do sistema dependa da interface solo-fibra e de tratamentos específicos (Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022). Nesse cenário, a fibra de açaí (*Euterpe oleracea*) surge como um material promissor, dado o grande volume de resíduos gerado na região Norte do Brasil.

Pesquisas preliminares utilizando fibras de açaí como reforço de solo indicaram, por meio de ensaios de compressão simples, que teores de até 2% dessa fibra elevam a resistência de pico em argilas (Santos et al., 2026). Contudo, a literatura ainda carece de dados sobre o comportamento desse compósito sob condições de cisalhamento, que melhor representam as solicitações de campo em solos finos. Neste aspecto, o ensaio de Cisalhamento Simples Direto (DSS) é fundamental na caracterização mecânica de solos finos, permitindo a rotação de tensões principais de forma mais fidedigna que o cisalhamento direto convencional (Kalumba et al., 2025).

Embora o DSS tenha sido utilizado para avaliar solos reforçados com microfibras de vidro e basalto (ex.: Calaunan, 2022; Seyyedrezaie et al., 2024), não há registros de sua aplicação em argilas reforçadas com fibras de açaí. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento mecânico de uma argila reforçada com fibras de açaí por meio de ensaios DSS. A análise foca na resistência ao cisalhamento e na rigidez do material sob condição inundada e não drenada, visando preencher a lacuna existente sobre o desempenho desse resíduo agroindustrial em solicitações complexas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo consistem nas fibras de açaí (Figura 1a) e em um solo argiloso tropical (Figura 1b), coletado no campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da Universidade de Brasília.



a) b)

Figura 1. a) Fibras de açaí b) Solo argiloso típico de Brasília.

As fibras naturais de açaí são extraídas do caroço e, neste estudo, foram incorporadas ao solo para investigação de melhoria geomecânica. Este subproduto, derivado do processamento industrial da polpa do fruto do açaí, foi adquirido de uma empresa que comercializa biomassa em Belém–PA.

As especificações física e geométrica desse material (Tabela 1), que abrangem densidade e morfologia das fibras, baseiam-se em caracterizações prévias reportadas por Silva et al. (2024).

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas das fibras de açaí.

Densidade (g·cm^{-3})	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0.89 ± 0.03	9.432 ± 2.83	0.136 ± 0.04

O teor de reforço utilizado foi de 1% em massa de solo seco, disperso aleatoriamente para a obtenção dos compósitos solo-fibra. Essa dosagem reflete os resultados ótimos de resistência obtidos por Silva et al. (2024), que validaram o potencial geomecânico dessa proporção específica através de ensaios experimentais prévios.

A matriz de solo utilizada nesta pesquisa provém de horizontes superficiais (1,0 a 3,0 m), coletada na forma de amostra deformada. Ensaios prévios de caracterização revelaram um material com densidade real dos grãos de 2,67 g/cm³ (determinada via picnometria a gás) e uma composição granulométrica mista (Figura 2), composta por 44% de areia, 21% de silte e 35% de argila.

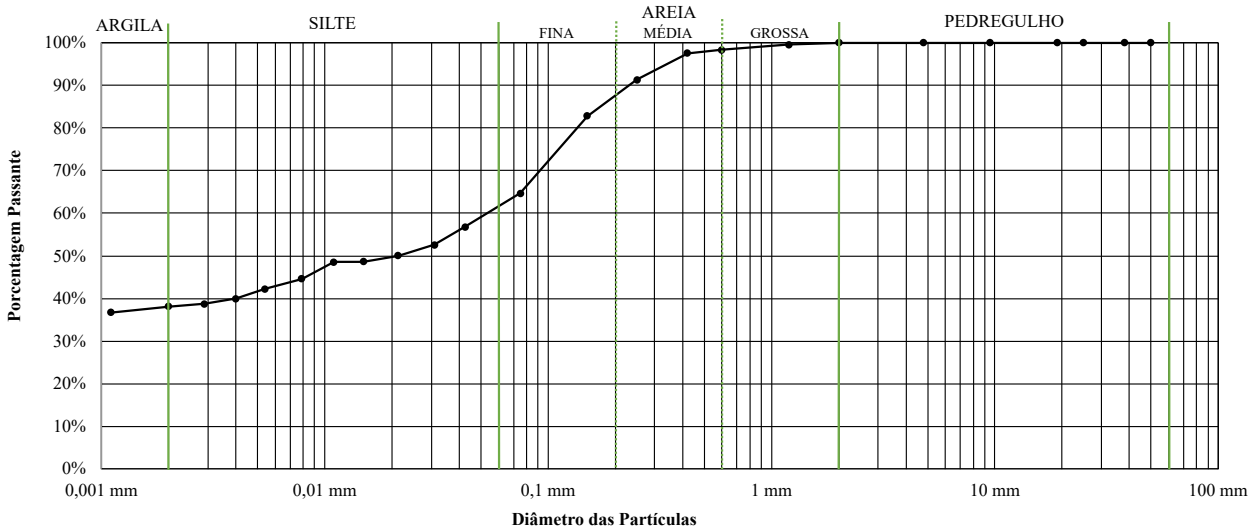


Figura 2. Curva granulométrica do solo.

Complementarmente, foi empregado o método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que forneceu parâmetros intrínsecos ao comportamento tropical do solo, com coeficientes c' de 2,24 mm e d' de 43,48 kg/m³, resultando em um índice e' de 0,99 e uma perda por imersão de 51,12%. Todas essas propriedades fundamentaram o enquadramento do solo nos principais sistemas de classificação apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo das classificações geotécnicas do solo.

Sistema de classificação	Índice/Grupo	Designação técnica
MCT (DNIT 259/2023)	LG’	Solo laterítico argiloso
AASHTO (M145-91)	A-6 (6)	Solo argiloso
SUCS (ASTM D2487)	ML	Silte de baixa compressibilidade

As curvas de compactação do solo e do compósito solo-fibra são ilustradas na Figura 3, juntamente com as curvas de saturação, relacionando os teores de umidade às respectivas massas específicas secas. Elas foram geradas a partir de resultados do ensaio de compactação do tipo Proctor, realizado sob energia normal, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7182 (ABNT, 2025). Por meio delas, são observados picos bem definidos, associados à condição de máxima densificação do arranjo das partículas.

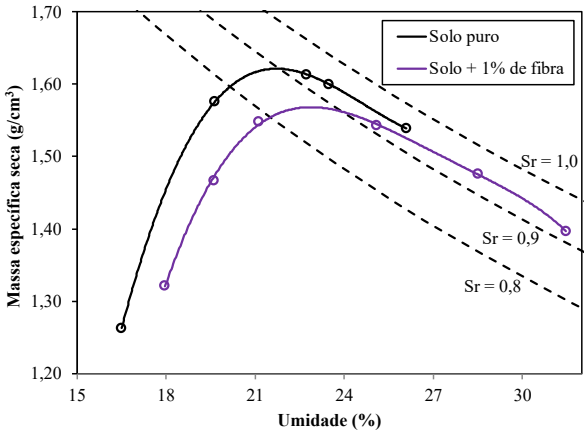


Figura 3. Curvas de compactação do solo e do compósito solo-fibra.

As propriedades de compactação da matriz pura e do compósito foram utilizadas para estabelecer as condições de moldagem dos corpos de prova. A adição do reforço vegetal promove, neste caso, um ligeiro incremento na umidade ótima e uma redução na densidade seca máxima.

2.2 Métodos

O escopo experimental consistiu na avaliação do comportamento geomecânico da matriz argilosa e do compósito com fibras aleatoriamente distribuídas, por meio de ensaios de Cisalhamento Simples Direto (DSS) em condição inundada. O foco residiu na determinação dos parâmetros de resistência sob carregamento monotônico, seguindo as diretrizes normativas vigentes.

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando a fração passante na peneira de 4,75 mm, com teores de umidade e densidade baseados nos parâmetros ótimos da energia Proctor Normal. O protocolo de preparação seguiu as seguintes etapas: i) umidificação: adição de água destilada até a umidade ótima, seguida de homogeneização dos materiais e armazenamento em câmara úmida por 12 horas; ii) compactação: o material foi compactado nos moldes cilíndricos do ensaio Proctor Normal, garantindo um grau de compactação mínimo de 98%; e iii) extração e talhagem: a partir dos blocos compactados, procedeu-se à talhagem cuidadosa das amostras para as dimensões finais de 63,5 mm de diâmetro e 25,4 mm de altura, preservando a integridade estrutural e a orientação das partículas.

Os ensaios foram executados no sistema automatizado ShearTrac Direct Simple Shear (Geocomp), em conformidade com a norma ASTM D6528 (ASTM, 2024). O experimento (Figura 4) contemplou a execução de seis ensaios, divididos igualmente entre o solo puro e o solo reforçado (1% de fibra), sob tensões de consolidação efetiva de 200, 400 e 800 kPa, que foram conduzidos na condição não drenada com controle de volume constante. A taxa de deslocamento cisalhante calculada foi de 0,021 mm/min, definida conforme os critérios de tempo de consolidação da referida norma, permitindo uma análise precisa da mobilização da resistência na interface solo-fibra.

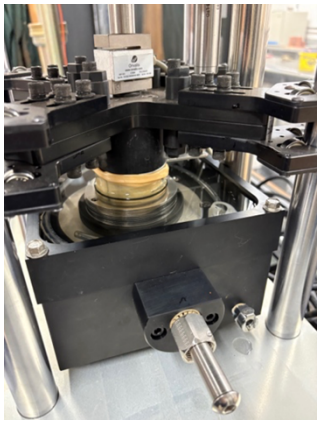


Figura 4. Disposição de amostra em execução no equipamento de DSS.

Nos ensaios DSS com controle de volume, a poropressão não foi medida diretamente por transdutor. Em vez disso, adotou-se a premissa clássica de que, para amostras cisalhadas em condição não drenada com altura constante, a variação da tensão vertical total durante o cisalhamento corresponde à geração de poropressão equivalente (Dyvik et al., 1987). Dessa forma, a tensão normal efetiva (σ′) foi calculada a partir da tensão total consolidada e da poropressão inferida, permitindo a apresentação das trajetórias de tensões efetivas (τ×σ′) e dos parâmetros efetivos de Mohr-Coulomb.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas de tensão versus deformação cisalhante (Figura 5) evidenciam, tanto para o solo puro quanto para o compósito, um comportamento de endurecimento progressivo (strain hardening) sem um pico de resistência claramente definido. Em todos os casos, a estabilização da tensão ocorreu apenas em níveis elevados de deformação (15–20%), caracterizando um padrão de ductilidade análogo ao reportado por Calaunan (2022) em ensaios DSS com argilas bentoníticas.

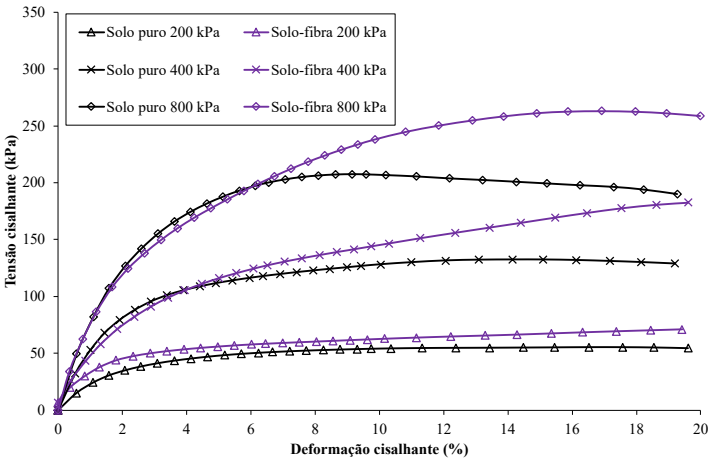


Figura 5. Curvas tensão cisalhante *versus* distorção angular.

Complementarmente, a Figura 6 apresenta as trajetórias de tensões efetivas, nas quais se observa uma intensa geração de poropressão positiva durante o cisalhamento. Como o ensaio DSS é realizado a volume constante, essa poropressão manifesta-se indiretamente pela queda da tensão normal efetiva, refletindo a transferência de carga da matriz mineral para a água nos poros.

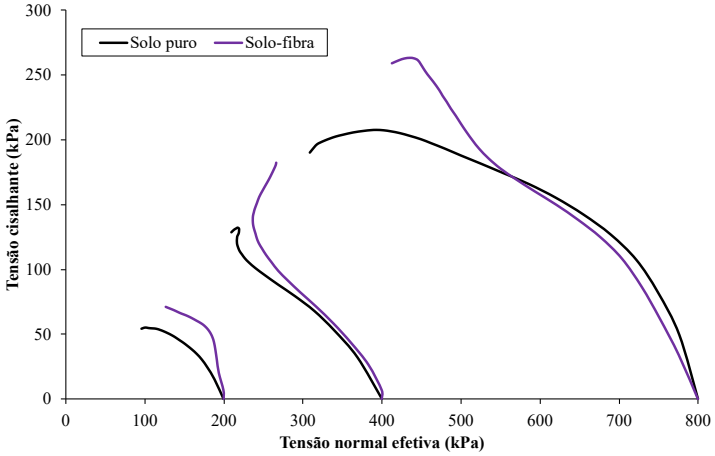


Figura 6. Curvas de tensões efetivas em solo e solo-fibra.

Diferentemente do solo puro, que exibiu queda proeminente na tensão efetiva, o solo-fibra demonstrou menor geração de poropressão em todos os estágios de carga. Esse comportamento corrobora os achados de Kong et al. (2025), sugerindo que o reforço cria uma estrutura tridimensional que limita a contração da matriz e o acúmulo de pressão neutra. A menor geração de poropressão no solo-fibra sob condição inundada representa uma vantagem crítica para aplicações em zonas saturadas ou sujeitas à variação do nível d'água pois, ao preencher vazios e densificar a estrutura, as fibras retardam a transferência de carga para a água dos poros (Kong et al., 2025; Robinson et al., 2019).

A envoltória de ruptura (Figura 6) revelou uma troca característica entre coesão e atrito promovida pelo reforço. Enquanto a coesão efetiva (c') reduziu-se de 9,99 kPa para 4,29 kPa, o ângulo de atrito efetivo (ϕ') aumentou de 27,16° para 31,50°. Essa tendência, também descrita por Calaunan (2022) e Consoli, Prietto & Ulbrich (1998), ocorre porque a presença física das fibras pode reduzir os contatos argila-argila (base da coesão), mas amplia o intertravamento e a mobilização de forças de tração interfacial. Conforme Sun et al. (2023), a rugosidade superficial da fibra natural permite que ela cruze planos de falha e distribua tensões, o que macroscopicamente eleva o ângulo de atrito.

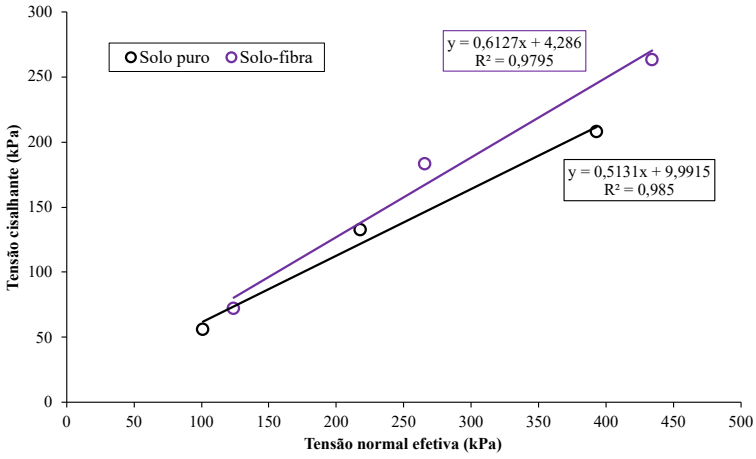


Figura 6. Envoltórias Mohr–Coulomb.

A análise comparativa do módulo de cisalhamento secante (G) entre o solo puro e o solo reforçado revela que a inclusão de 1% de fibras de açaí eleva a rigidez inicial da matriz, de forma sutil, em todos os níveis de tensão. Em ambos os materiais, o módulo de cisalhamento secante

apresentou redução marcante com o avanço das deformações (Figura 7), comportamento universal em solos e geomateriais.

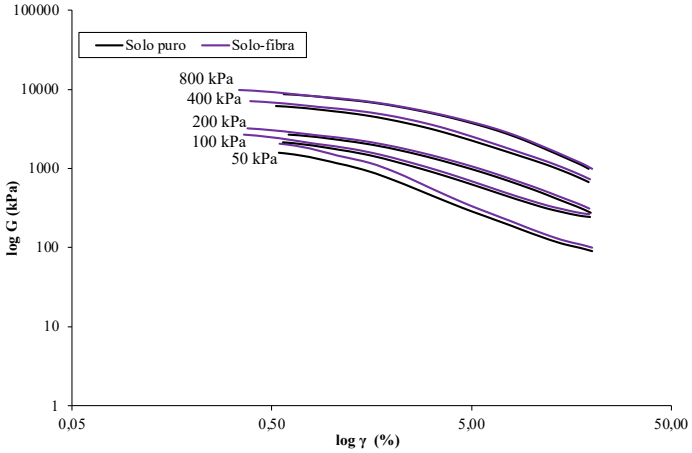


Figura 7. Curvas de rigidez do solo: relação logarítmica entre G e γ.

Observa-se que as curvas de degradação do solo puro e do solo-fibra são praticamente sobrepostas em todos os níveis de tensão. Isso indica que a adição de fibras não altera o padrão intrínseco de degradação da rigidez: ambos os materiais perdem rigidez de forma proporcional ao mesmo ritmo. A contribuição das fibras é, portanto, elevar o nível de G em toda a curva de forma aproximadamente proporcional, e não retardar ou modificar a trajetória de degradação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa investigou o comportamento geomecânico de uma argila tropical reforçada com fibras de açaí por meio de ensaios DSS. Os resultados obtidos permitem concluir que a incorporação de 1% de fibras atua como um mecanismo eficiente de melhoria das propriedades de resistência e rigidez. A adição das fibras promoveu um incremento significativo no ângulo de atrito efetivo, que se elevou de 27,16° para 31,50°, além de gerar sistematicamente menores excessos de poropressão durante o cisalhamento em comparação ao solo puro. Além disso, observou-se um aumento sutil no módulo de cisalhamento secante (G) com a adição de fibras, embora o padrão de degradação da rigidez tenha seguido a tendência intrínseca do solo.

Os resultados validam a fibra de açaí como uma alternativa tecnicamente robusta e ambientalmente sustentável para o reforço de solos tropicais, oferecendo uma solução de baixo custo e menor impacto energético em comparação a reforços sintéticos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Rondônia pelo apoio contínuo à capacitação docente e ao laboratório New Geotechnical Materials, da Universidade de Brasília, pelos suporte e recursos necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2021). M 145-91. *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2025). NBR 7182. *Solos - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.*

ASTM International (2017). ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.

ASTM International (2024). ASTM D6528: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils.*

Calaunan, J. M. F. V. (2022) *Evaluation of Swelling Pressure and Shear Strength of Inorganic Microfiber-reinforced Bentonite for the Engineered Barrier System*. Master's thesis, University of Nebraska, 132 p.

Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., & Ulbrich, L. A. (1998) Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1211–1214.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 259/2023 – CLA: *Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação*. Rio de Janeiro, 2023.

Kalumba, D., Babalola, Z., Aneke, F., Chebet, F., & Sobhee-Beetu, L. (2025) Assessment of Soil Shear Strength Parameters: Insights from Direct Shear and Direct Simple Shear Testing. *Civil Engineering Journal*, 11(11).

Kong, B.-W., He, H., Yan, Y.-T., Ding, Z., & Zou, B.-P. (2025) Liquefaction behavior of fiber-reinforced calcareous sand under cyclic simple shear tests. *Acta Geotechnica*, 20, 5139–5158.

Robinson, S., Brennan, A. J., Knappett, J. A., Wang, K., & Bengough, A. G. (2019) Cyclic simple shear testing for assessing liquefaction mitigation by fibre reinforcement. *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Associazione Geotecnica Italiana.

Santos, M. L. de J., Lopes, M. M., Silva, A. B., Ferreira, J. W. dos S., & Casagrande, M. D. T. (2026) Mechanical performance and durability of açaí fibers as reinforcement in tropical clay soil. *Journal of Natural Fibers*, 23(1), 2595560.

Silva, A. B., Gonzaga, L. B. T., Cavalcante, A. L. B., & Casagrande, M. D. T. (2024) Ecoengenharia em geotecnia: utilização de fibras de açaí da Amazônia (euterpe oleracea) no melhoramento de solos arenosos. In: *Anais eletrônicos do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú.

Silveira, M. V., Ferreira, J. W. S., & Casagrande, M. D. T. (2022) Effect of Surface Treatment on Natural Aging and Mechanical Behavior of Sisal Fiber–Reinforced Sand Composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34 (6).

Seyyedrezaie, S. A., Tabarsa, A., Keramati, M., & Pordeli, H. (2024) *Dynamic behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP) improved loess soil with basalt fiber reinforcement using cyclic direct simple shear test* [Preprint]. SSRN.

Sun, Y., Li, H., Cheng, Z., Dong, J., & Wang, Y. (2023) Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of shallow slope root-soil composite in Qinghai area. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(7), 2834–2852.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/82

Diagnóstico Geoquímico e Vulnerabilidade Hidrogeotécnica das Águas Subterrâneas em Boa Viagem, Recife-PE.

Raiza Silva Bezerra
Mestre em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Pernambuco, rbraizabezerra@gmail.com

Eduardo Antonio Maia Lins
Professor Adjunto, IFPE, Recife, Brasil, eduardomaialins@gmail.com

Ana Gabriella dos Santos Batista de Menezes
Pós doc- PPGEC, UFPE, Recife, Brasil, gabriella.batista@ufpe.br

Lília Albuquerque da Silva
Doutoranda, UNESP, Rio claro, Brasil, lilia.albuquerque@unesp.br

José Fernando Thomé Jucá
Professor Titular, UFPE, Recife, Brasil, jftjucah@gmail.com

RESUMO: Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade e a vulnerabilidade das águas subterrâneas do bairro de Boa Viagem, Recife-PE, sob a perspectiva da geotecnia ambiental, com ênfase nos processos de mobilidade do ferro e salinização por cloretos em aquíferos rasos urbanos. A metodologia baseou-se na análise de dados físico-químicos de poços cadastrados, aplicando filtros espaciais, temporais e de profundidade para garantir homogeneidade hidroestratigráfica, além de interpretação estatística e geoquímica dos parâmetros pH, potencial redox, condutividade elétrica, ferro total, cloreto e sódio. Foram investigados os mecanismos de oxirredução, dissolução mineral e possível intrusão marinha, relacionando os resultados às condições de uso e ocupação do solo e à sobreexploração do aquífero. Observou-se a ocorrência pontual de concentrações de ferro acima dos limites de potabilidade, associadas a ambientes redutores e baixa oxigenação, que favorecem a forma ferrosa mais solúvel e móvel. Também foram identificados teores elevados de cloreto e aumento da condutividade elétrica em setores próximos à costa, indicando mistura entre água doce e marinha e tendência de salinização. A integração entre análise espacial, hidrogeológica e geoquímica permitiu mapear áreas de maior vulnerabilidade e compreender a influência de fatores antrópicos na degradação da qualidade hídrica. Conclui-se que o aquífero apresenta suscetibilidade média a alta à contaminação, demandando monitoramento sistemático e medidas preventivas de gestão para assegurar a proteção e o uso sustentável dos recursos subterrâneos.

PALAVRAS-CHAVE: Águas subterrâneas; Geoquímica; Ferro; Salinização; Geotecnia ambiental..

ABSTRACT: This study aimed to assess the quality and vulnerability of groundwater in the Boa Viagem neighborhood, Recife, Brazil, from an environmental geotechnical perspective, focusing on iron mobility and chloride-related salinization in shallow urban aquifers. Physicochemical data from registered wells were analyzed using spatial, temporal, and depth consistency criteria to ensure hydrostratigraphic comparability. Parameters including pH, redox potential, electrical conductivity, total iron, chloride, and sodium were evaluated through statistical and geochemical interpretation. The investigation addressed oxidation–reduction processes, mineral dissolution, and potential seawater intrusion associated with intense urbanization and groundwater overexploitation. Results indicated localized iron concentrations exceeding drinking water standards, linked to reducing environments that favor soluble ferrous species. In contrast, oxidizing conditions promoted ferric forms with lower mobility. Elevated chloride levels and increased electrical conductivity were detected near the coastline, suggesting mixing between freshwater and saline water and early salinization. The integrated spatial and hydrogeochemical approach enabled the identification of critical zones and the influence of anthropogenic pressures on groundwater degradation. Overall, the aquifer showed moderate to high vulnerability, emphasizing the need for systematic monitoring and preventive management to ensure sustainable groundwater use in densely urbanized coastal areas.

KEYWORDS: Groundwater; Geochemistry; Iron; Salinization; Environmental geotechnics.

1. INTRODUÇÃO

A explotação de águas subterrâneas em zonas costeiras urbanizadas constitui importante alternativa de abastecimento hídrico, porém está frequentemente associada à degradação hidroquímica dos aquíferos, sobretudo em contextos de superexploração e elevada densidade urbana. Na planície costeira do Recife, os aquíferos rasos vêm sendo intensamente utilizados há décadas, o que tem resultado em alterações sistemáticas na qualidade da água, com registros de aumento da condutividade elétrica, elevação de cloretos e evidências de intrusão salina em diversos setores da Região Metropolitana (Montenegro *et al.* 2009).

Estudos hidrogeoquímicos específicos para a área de Recife demonstram que a salinização das águas subterrâneas decorre principalmente da mistura entre água doce continental e água de origem marinha ou estuarina, processo favorecido pela redução do nível potenciométrico causada pelo bombeamento contínuo. Cary *et al.* (2015), utilizando abordagem multi-isotópica (δ^2H, $\delta^{18}O$, ^{34}S, $^{87}Sr/^{86}Sr$), confirmaram que a composição química das águas subterrâneas urbanas do Recife reflete a contribuição simultânea de intrusão marinha, dissolução de sais e influência antrópica, evidenciando a complexidade dos processos de salinização em aquíferos costeiros.

No caso específico do Aquífero Boa Viagem, Costa Sobrinho *et al.* (2015) aplicaram o índice GALDIT para avaliar a vulnerabilidade à intrusão salina, identificando áreas classificadas como de média a alta suscetibilidade, especialmente em setores próximos à linha de costa e com intensa explotação de poços. Esses autores ressaltam que características como baixa profundidade do aquífero, elevada condutividade hidráulica e intensa captação aumentam significativamente o risco de avanço da cunha salina.

Além disso, Bernardino (2014) demonstrou que a dinâmica de recarga natural na planície do Recife é limitada pela impermeabilização urbana e pela ocupação antrópica, reduzindo a capacidade de diluição dos sais e favorecendo a concentração de íons dissolvidos. Resultados técnicos apresentados por Paiva *et al*. (2023) também registram a ocorrência de poços com tendência à salinização progressiva, associada à alteração do balanço hidráulico e à conectividade com águas salobras costeiras.

Embora a intrusão salina seja o principal processo de degradação regionalmente documentado, a alteração das condições geoquímicas do meio subterrâneo também pode influenciar a mobilidade de constituintes naturais, como o ferro, cuja solubilidade é controlada por reações de oxirredução e interação água–sedimento. Dessa forma, a análise integrada entre parâmetros hidroquímicos, condições hidráulicas e características geológicas torna-se fundamental para o diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas em ambientes costeiros urbanos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade hidrogeoquímica das águas subterrâneas do bairro de Boa Viagem, com ênfase na distribuição espacial de ferro e cloreto, buscando identificar indícios de salinização, vulnerabilidade do aquífero e áreas críticas de risco ambiental, contribuindo para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na planície costeira do Recife.

2. METODOLOGIA

2.1 Delineamento metodológico e abordagem do estudo

O presente estudo adotou abordagem quantitativa, de caráter descritivo-analítico, combinando técnicas de análise espacial, avaliação hidroquímica e interpretação hidrogeológica para diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas no bairro de Boa Viagem, Recife-PE. A estratégia metodológica foi fundamentada em procedimentos consolidados em investigações de salinização de aquíferos costeiros, conforme empregado Cary *et al.* (2015) na identificação de fontes de sais por meio de indicadores hidrogeoquímicos e por Costa; Sobrinho *et al.* (2015) na avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha. O método integrou informações físicas, químicas e espaciais com o objetivo de reconhecer padrões de distribuição de contaminantes, inferir processos geoquímicos dominantes e classificar setores mais suscetíveis à degradação da qualidade hídrica.

2.2 Área de estudo e contexto hidrogeológico

A área de estudo compreende o bairro de Boa Viagem, localizado na zona sul do município do Recife, inserido na planície costeira da Região Metropolitana do Recife. Do ponto de vista hidrogeológico, o setor é caracterizado por aquíferos livres e semiconfinados desenvolvidos em sedimentos arenosos quaternários de elevada permeabilidade, com nível freático raso e forte interação com sistemas estuarinos e marinhos adjacentes. Estudos regionais indicam que essas condições favorecem elevada conectividade hidráulica e maior sensibilidade a alterações no regime de bombeamento, resultando em suscetibilidade à intrusão salina e aumento da mineralização das águas subterrâneas (Montenegro *et al.* 2009; Bernardino, 2014). A intensa impermeabilização superficial decorrente da urbanização reduz a recarga direta e contribui para a modificação do balanço hídrico local, potencializando processos de concentração de sais dissolvidos.

2.3 Base de dados, critérios de seleção e consistência amostral

A base de dados utilizada foi composta por registros de poços tubulares cadastrados em sistemas institucionais de monitoramento e relatórios técnicos regionais, contendo informações de localização geográfica, profundidade, datas de amostragem e parâmetros físico-químicos da água. Para garantir homogeneidade hidroestratigráfica, foram selecionados apenas poços com profundidade máxima de 60 m, representativos do aquífero freático, conforme critérios empregados por Bernardino (2014) para caracterização do sistema costeiro do Recife. Também foi aplicado filtro temporal, mantendo-se análises realizadas em período recente e com intervalo máximo de doze meses entre coletas, reduzindo interferências sazonais e assegurando comparabilidade entre os dados. Registros incompletos, valores inconsistentes ou amostras isoladas sem repetição espacial foram excluídos, visando aumentar a robustez estatística do conjunto amostral.

2.4 Caracterização hidroquímica e indicadores de qualidade

A avaliação hidroquímica concentrou-se nos parâmetros pH, condutividade elétrica, ferro total, cloreto e sódio, selecionados por sua relevância como indicadores de processos geoquímicos e de salinização costeira. O cloreto foi empregado como traçador conservativo de intrusão marinha, por apresentar baixa reatividade química e comportamento essencialmente advectivo, característica amplamente discutida em estudos regionais e confirmada por Cary *et al.* (2015). A condutividade elétrica foi utilizada como medida indireta do teor total de sólidos dissolvidos, refletindo o grau de mineralização da água. O ferro total foi analisado como elemento sensível às condições redox do aquífero, permitindo inferir ambientes oxidantes ou redutores associados à mobilização geoquímica natural. Para cada variável foram calculadas estatísticas descritivas, incluindo médias, desvios padrão e valores extremos, e os resultados foram comparados com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira vigente.

2.5 Análise integrada e interpretação hidrogeoquímica

Os dados obtidos foram analisados de forma integrada por meio de correlações bivariadas, gráficos comparativos e interpretação conjunta dos parâmetros químicos e espaciais. A associação entre elevação de cloretos, aumento de condutividade elétrica e proximidade da costa foi interpretada como indicativa de salinização progressiva, conforme padrões descritos para a planície do Recife por Montenegro *et al.* (2009). Paralelamente, a ocorrência de ferro elevado foi analisada à luz de possíveis condições redutoras locais, relacionadas à presença de matéria orgânica e à dinâmica geoquímica do meio poroso. A interpretação final considerou o contexto hidrogeológico regional, a intensidade de bombeamento e as limitações de recarga natural descritas por Bernardino (2014) permitindo classificar setores quanto ao grau relativo de vulnerabilidade.

2.7. Tratamento Estatístico dos Dados

A análise estatística descritiva dos parâmetros hidroquímicos foi realizada com o objetivo de caracterizar a tendência central, a dispersão e a incerteza associada às concentrações observadas nos poços monitorados. Considerando que o conjunto amostral foi composto por apenas nove poços ($n = 9$), adotou-se procedimento estatístico específico para amostras pequenas, empregando a distribuição t de Student em substituição à aproximação normal (z), recomendada apenas para grandes amostras ($n \geq 30$).

Para o cálculo dos intervalos de confiança de 95% (IC95%), utilizaram-se graus de liberdade iguais a gl = n − 1, resultando em gl = 8. O valor crítico da distribuição t para nível de significância de 5% (bicaudal) foi $t_{0,975,8}$ = 2,306. O intervalo de confiança foi estimado conforme a seguinte expressão:

$$IC95\% = \bar{x} \pm t \cdot (DP / \sqrt{n}) \quad (1)$$

em que $\bar{x}$ representa a média amostral, DP o desvio-padrão e n o número de observações. Esse procedimento fornece estimativas mais conservadoras e estatisticamente robustas da variabilidade dos dados, ampliando os limites de incerteza quando comparado ao método normal, sendo mais apropriado para bases amostrais reduzidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados espaciais e hidroquímicos foram integrados para identificação de áreas críticas e delimitação de zonas com maior suscetibilidade à degradação da qualidade da água subterrânea. Essa síntese metodológica possibilitou reconhecer padrões de salinização e alterações geoquímicas associadas ao uso urbano do território, fornecendo subsídios técnicos para o monitoramento sistemático e para estratégias de gestão preventiva do aquífero costeiro. A adoção de abordagem interdisciplinar, articulando ferramentas de geoprocessamento, análise estatística e interpretação hidrogeológica, mostrou-se adequada para o diagnóstico ambiental de sistemas freáticos urbanos complexos como o de Boa Viagem.

A distribuição espacial dos poços, organizada por agrupamentos geográficos, é apresentada na Figura 1, permitindo visualizar a formação de clusters com características hidrogeológicas semelhantes. Essa setorização serviu de base para a análise comparativa por grupos espaciais, reduzindo interferências locais e possibilitando interpretação regional dos padrões hidroquímicos.

A caracterização hidroquímica foi realizada com base em nove poços com dados completos de localização e parâmetros físico-químicos. A estatística descritiva, conforme Tabela 1, indicou condutividade elétrica média de 762 µS/cm (DP = 486 µS/cm; IC95%: 388–1.137 µS/cm), variando entre 146,9 e 1.690 µS/cm, o que evidencia águas desde fracamente mineralizadas até condições salobras pontuais. O cloreto apresentou média de 150 mg/L (DP = 171 mg/L; IC95%: 19–282 mg/L), com valores máximos de 517,7 mg/L, enquanto o ferro dissolvido registrou média de 0,80 mg/L (DP = 0,80 mg/L; IC95%: 0,18–1,42 mg/L), atingindo 2,0 mg/L em alguns poços. Observa-se que aproximadamente um terço das amostras excede o limite de 0,30 mg/L estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, indicando restrições à potabilidade.

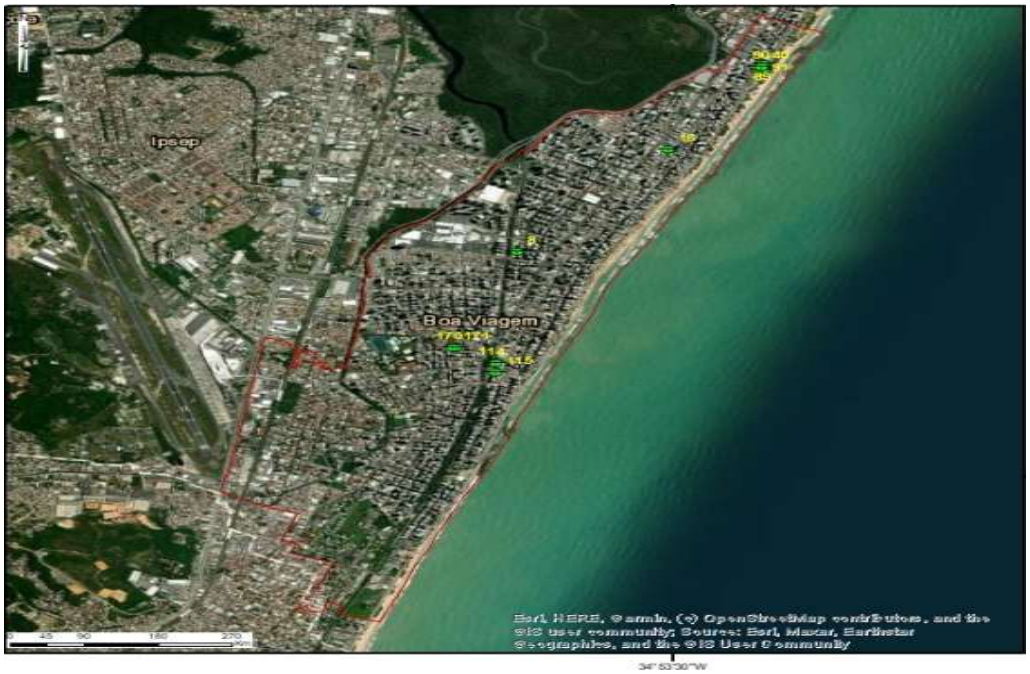


Figura 1. Distribuição espacial dos poços. Fonte: Adaptado do Google Earth (2026).

Tabela 1 – Estatísticas descritivas completas dos parâmetros hidroquímicos (n = 9 poços)

Parâmetro	Unidade	Média	DP	IC95%	Q1	Mediana	Q3	Mín	Máx
Condutividade elétrica	µS/cm	762	486	388 – 1.137	388	735	1.032	146,9	1.690
Cloreto (Cl^-)	mg/L	150	171	19 – 282	51,5	81,0	184,0	0,0	517,7
Ferro dissolvido (Fe)	mg/L	0,80	0,80	0,18 – 1,42	0,00	1,02	1,28	0,00	2,00

Legenda: DP = desvio padrão; IC95% calculado pela distribuição t de Student (gl = 8); Q1–Q3 = quartis.

3.1. Relação entre condutividade elétrica e cloreto

A análise da correlação entre condutividade elétrica (CE) e concentração de cloreto revelou comportamento linear positivo forte, conforme apresentado na Figura 2. O coeficiente de correlação de Pearson foi elevado (r = 0,867), com coeficiente de determinação $R^2 = 0,751$, indicando que aproximadamente 75% da variabilidade observada na condutividade pode ser explicada exclusivamente pela variação das concentrações de cloreto. O valor de p (0,0116) confirma significância estatística da relação, mesmo considerando o número reduzido de amostras (n = 7).

Esse resultado demonstra que o cloreto constitui o principal íon controlador da mineralização total do sistema aquífero. Do ponto de vista hidrogeoquímico, tal comportamento é esperado, uma vez que o cloreto é reconhecido como íon conservativo, apresentando baixa reatividade química, pouca participação em processos de adsorção e ausência de precipitação significativa em condições naturais. Assim, sua concentração reflete predominantemente processos físicos de mistura e aporte salino externo (FREEZE; CHERRY, 1979; APPELO; POSTMA, 2005). Em aquíferos costeiros, correlações elevadas entre CE e Cl^- são frequentemente associadas à intrusão marinha, deposição de aerossóis salinos e evapoconcentração, fenômenos que promovem aumento direto da salinidade da água subterrânea (HEM, 1985).

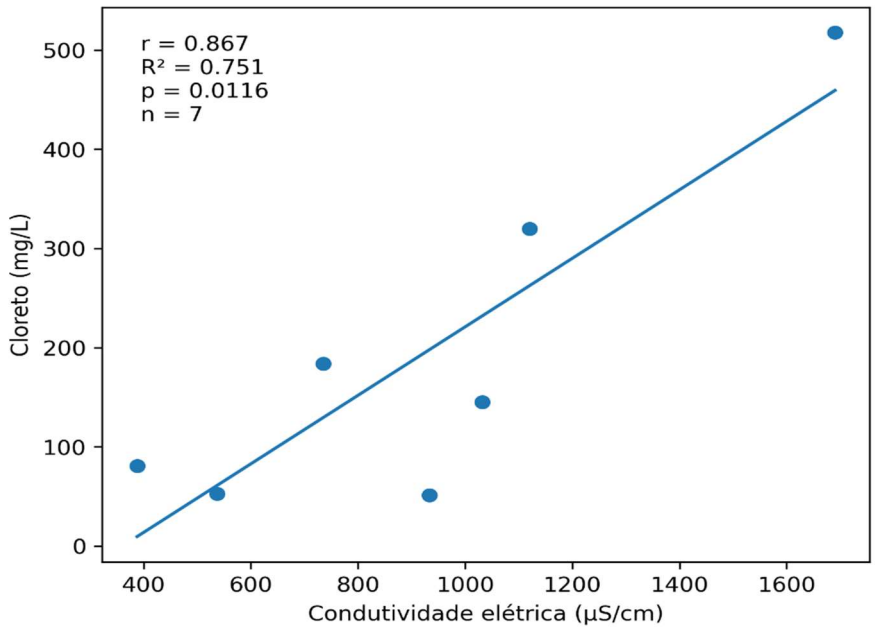


Figura 2 – Correlação entre condutividade elétrica e cloreto.

Na Região Metropolitana do Recife, a salinização por intrusão marinha e/ou por conectividade com canais, estuários e fontes salinas urbanas tem sido descrita como um processo recorrente associado à intensa explotação e ao rebaixamento piezométrico, com incremento de condutividade e cloreto em áreas mais vulneráveis (COELHO *et al.* 2018). Nesse sentido, o padrão CE×Cl^- nos seus dados é plenamente compatível

com o modelo hidrogeoquímico regional: o aumento de CE acompanha diretamente o aumento de Cl^-, sugerindo mineralização controlada por mistura com água salina (BERTRAND et al., 2022).

3.2 Relação entre sódio e cloreto

A dispersão entre sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), apresentada na Figura 3, evidenciou tendência linear crescente, indicando proporcionalidade entre esses íons. Essa associação é característica de águas cuja mineralização é controlada pela dissolução ou mistura de halita (NaCl), liberando ambos os íons em proporções estequiométricas semelhantes.

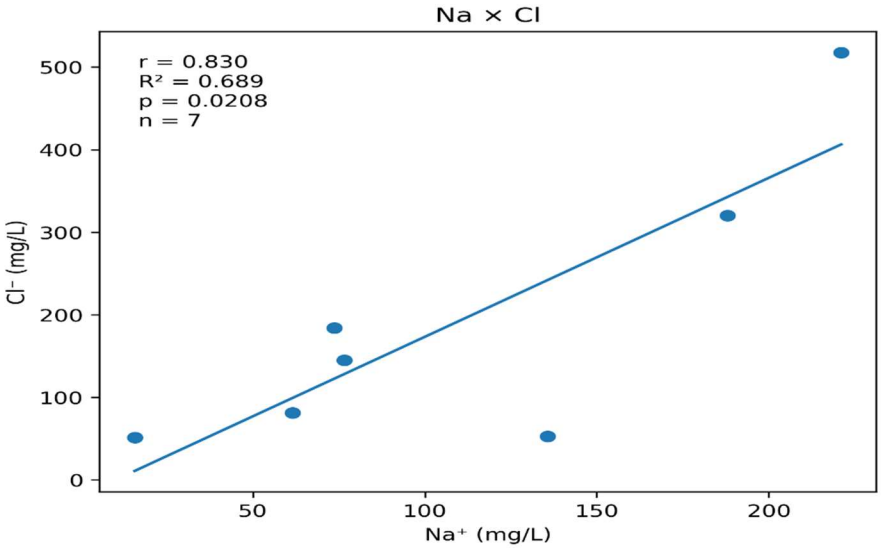


Figura 3 – Correlação entre sódio e cloreto.

Segundo Drever (1997) e Stumm; Morgan (1996), a correlação positiva entre Na^+ e Cl^- constitui indicador robusto de águas pertencentes à facies sódica-cloretada, comumente associada à influência marinha ou a sais evaporíticos. Esse padrão sugere que a composição iônica do aquífero não é dominada por reações de intemperismo silicatado ou carbonático, mas por processos de mistura com águas salinas ou por aporte de sais de origem oceânica. Em ambientes costeiros tropicais, esse comportamento é amplamente descrito como evidência de intrusão marinha ou recarga com aerossóis marinhos transportados pelo vento (APPELO; POSTMA, 2005). Portanto, a forte associação observada reforça o diagnóstico de que a salinidade do sistema possui origem predominantemente externa, vinculada à proximidade do ambiente marinho.

Em sistemas costeiros urbanos, como Recife, a literatura aponta que a intrusão salina pode ocorrer de forma localizada no aquífero raso e/ou em contatos hidrodinâmicos complexos entre unidades aquíferas (multi-layer aquifer system), amplificados por bombeamento contínuo e variabilidade climática (COELHO *et al.* 2018). O estudo de CARY et al. (2015), com abordagem multi-isotópica, descreve explicitamente intrusão marinha atual em porções superficiais associadas ao sistema costeiro urbano, o que é coerente com uma assinatura Na–Cl refletida por relações lineares Na×Cl.

3.3 Relação entre sólidos totais dissolvidos e condutividade

A relação entre sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica, ilustrada na Figura 3, apresentou correlação linear positiva consistente, demonstrando proporcionalidade direta entre ambas as variáveis. Esse comportamento confirma que a condutividade elétrica reflete adequadamente a carga iônica total da água, sendo um bom estimador indireto da mineralização.

A relação entre sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica apresentada na Figura 4 é uma validação operacional importante: quando a dispersão é baixa e o padrão é aproximadamente linear, reforça-se que a CE está efetivamente respondendo ao conteúdo iônico dissolvido (e não predominantemente a interferências analíticas, coloides ou matéria orgânica). Estudos aplicados em Recife demonstram que o

monitoramento espaço-temporal de CE é um instrumento sensível para detectar avanço/recuo da cunha salina e apoiar estratégias de gestão (COELHO *et al.* 2018), e o seu gráfico STD×CE vai na mesma direção ao mostrar coerência entre "proxy rápido" (CE) e carga dissolvida (STD).

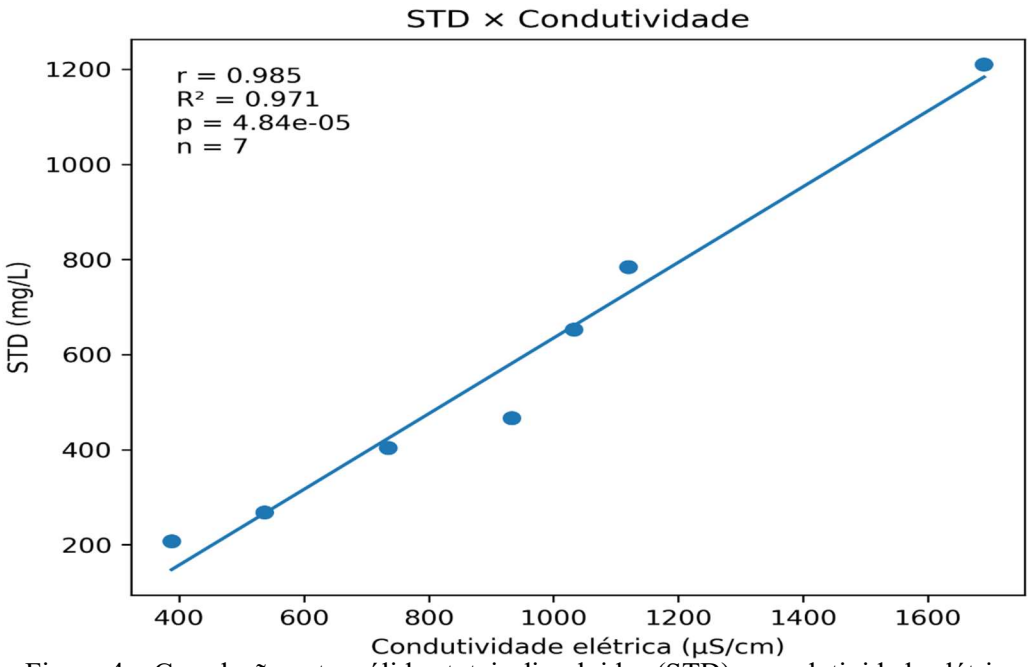


Figura 4 – Correlação entre sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica.

Em termos de interpretação de processos, esse resultado é compatível com o que foi documentado para o sistema costeiro urbano de Recife: a variabilidade de salinidade responde a pressões hidroclimáticas e antrópicas (bombeamento, densidade de poços, proximidade do mar/canais), e CE funciona como variável sentinela para triagem de risco e zoneamento de vulnerabilidade (BERTRAND *et al.* 2022; PETELET-GIRAUD *et al.* 2018).

3.4 Comportamento do ferro dissolvido

As concentrações de ferro dissolvido apresentaram variação entre aproximadamente 0,05 e 2,0 mg·L^{-1}, com valores frequentemente superiores ao limite de 0,30 mg·L^{-1} estabelecido pelo Ministério da Saúde do Brasil para potabilidade. Entretanto, os diagramas de correlação entre ferro e cloreto e entre ferro e condutividade indicaram ausência de relação linear significativa, evidenciando que o ferro não acompanha o padrão de salinização observado para os demais íons majoritários. Esse comportamento sugere que o ferro é controlado por processos geoquímicos distintos daqueles que governam a mineralização total. Conforme descrito por Appelo; Postma (2005), a solubilidade do ferro é fortemente dependente das condições de Eh e pH do meio. Em ambientes redutores, a redução de Fe^{3+} para Fe^{2+} aumenta significativamente sua solubilidade, promovendo elevação das concentrações dissolvidas. Tais condições são típicas de aquíferos rasos com presença de matéria orgânica, solos hidromórficos ou zonas saturadas com baixa oxigenação, favorecendo a redução bacteriana de óxidos férricos (FREEZE; CHERRY, 1979). Dessa forma, a elevação do ferro observada nas amostras está associada a controles redox locais e não à intrusão salina ou à mistura marinha, evidenciando a atuação de processos hidrogeoquímicos independentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos resultados indica que a química das águas subterrâneas é dominada por dois controles geoquímicos independentes. O primeiro, associado à salinidade, é governado por íons conservativos (Cl^- e Na^+), fortemente correlacionados com condutividade e STD, caracterizando influência marinha ou mistura

salina. O segundo, representado pelo ferro dissolvido, é controlado por processos redox locais, sem relação direta com a mineralização total. Esse padrão dual é amplamente documentado em aquíferos costeiros, onde a salinização resulta de processos físicos de mistura, enquanto metais traço respondem às condições geoquímicas específicas do meio poroso.

Assim, conclui-se que a qualidade das águas é condicionada simultaneamente por processos de salinização e por mobilização redutora de ferro, demandando abordagens de monitoramento e gestão distintas para cada grupo de parâmetros.

REFERÊNCIAS

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2. ed. Rotterdam: Balkema, 2005.

BERTRAND, G. et al. Delineating groundwater contamination risks in southern coastal metropoles through implementation of geochemical and socio-environmental data in decision-tree and geographical information system. *Water Research*, v. 209, 117877, 2022. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117877.

BRASIL. *Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 2021.

CARY, L. et al. Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): a multi-isotope approach. *Science of the Total Environment*, v. 530–531, p. 411–429, 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.015.

CHATTON, E. et al. Glacial recharge, salinisation and anthropogenic contamination in the coastal aquifers of Recife (Brazil). *Science of the Total Environment*, v. 569–570, p. 1114–1125, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.180.

COELHO, V. H. R. et al. Piezometric level and electrical conductivity spatiotemporal monitoring as an instrument to design further managed aquifer recharge strategies in a complex estuarial system under anthropogenic pressure. *Journal of Environmental Management*, v. 209, p. 426–439, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.078.

COSTA SOBRINHO, A. F. et al. Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do aquífero Boa Viagem – Região Metropolitana do Recife. *Águas Subterrâneas*, 2015.

DREVER, J. I. *The geochemistry of natural waters*. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

HEM, J. D. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. 3. ed. Washington: USGS, 1985.

MONTENEGRO, S. M. G. L. et al. Águas subterrâneas na zona costeira da planície do Recife: risco de salinização por intrusão marinha. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 3, 2009.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; FARIAS, V. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Problemas de salinização nos aqüíferos costeiros da região central da cidade de Recife. *In:* II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Recife, 2003.

PETELET-GIRAUD, E. et al. Multi-layered water resources, management, and uses under the impacts of global changes in a southern coastal metropolis: crossed analysis in Recife, NE Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 618, p. 645–657, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.228.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. *Aquatic chemistry*. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/83

Efeito do envelhecimento nas propriedades físico-químicas de solo e mistura solo-biocarvão (2,5%) visando aplicação geotécnica

Jéssica Pelinsom Marques
Professora Doutora, Departamento de Geologia Ambiental e Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), Brasil, jessica.pelinsom.marques@usp.br

Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues
Professora Associada, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil

RESUMO: Estudos anteriores indicam que misturas de solo do Vale do Ribeira (SP, Brasil) com biocarvão de resíduos de poda urbana são promissoras para uso em barreiras de proteção ambiental, porém os efeitos do envelhecimento dessas misturas ainda são pouco conhecidos. Este trabalho avaliou as variações de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) de um solo representativo da região e de uma mistura contendo 2,5% (m/m) de biocarvão, após envelhecimento simulado em laboratório por sete ciclos de umedecimento e secagem. A mistura solo-biocarvão apresentou maiores valores de pH e CE e menores valores de Eh em comparação com o solo puro, associados às características alcalinas, redutoras e ao elevado teor de nutrientes do biocarvão. O envelhecimento exerceu maior influência sobre os parâmetros físico-químicos da mistura do que sobre o solo. O pH da mistura aumentou de 5,1 para 7,3; a CE de 51,7 µS cm^{-1} para 749,0 µS cm^{-1}; e o Eh reduziu de +309,2 mV para valores entre +142,3 e +281,6 mV. Essas alterações podem impactar o desempenho dos materiais como barreiras de proteção ambiental. Estudos futuros devem aprofundar os efeitos do envelhecimento na permeabilidade, lixiviação e riscos ambientais associados.

PALAVRAS-CHAVE: Barreiras de Proteção Ambiental, Ciclos de Umedecimento e Secagem, Vale do Ribeira, pH do Solo

ABSTRACT: Previous studies indicate that mixtures of soils from the Vale do Ribeira region (SP, Brazil) with biochar derived from urban pruning waste are promising for use in environmental protection barriers; however, the effects of aging on these mixtures remain poorly understood. This study evaluated variations in pH, redox potential (Eh), and electrical conductivity (EC) of a representative soil and a mixture containing 2.5% (w/w) biochar after laboratory-simulated aging through seven wet-dry cycles. The soil-biochar mixture showed higher pH and EC values and lower Eh values compared to the unamended soil, which are associated with the alkaline, reducing characteristics and high nutrient content of the biochar. Aging exerted a greater influence on the physicochemical parameters of the mixture than on those of the soil alone. The pH increased from 5.1 to 7.3, EC from 51.7 µS cm^{-1} to 749.0 µS cm^{-1}, and Eh decreased from +309.2 mV to values between +142.3 and +281.6 mV. These changes may affect the performance of the materials as environmental protection barriers. Further studies are needed to better understand aging effects on permeability, leaching, and associated environmental risks.

KEYWORDS: Environmental Protection Barriers, Wet-Dry Cycles, Ribeira Valley, Soil pH

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de solo e água por metais e metaloides potencialmente tóxicos (MPT) é um problema de escala global. Elementos como níquel (Ni), chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd), zinco (Zn) e cobre (Cu), apresentam alta toxicidade, capacidade de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica, e podem causar impactos significativos à saúde humana (Yong e Mulligan, 2019; Marconi et al., 2026).

No Brasil, um dos principais exemplos de contaminação por MPT ocorre no município de Adrianópolis (PR), no Vale do Ribeira, onde resíduos do beneficiamento e da fundição da galena foram lançados diretamente

no rio Ribeira de Iguape por aproximadamente 50 anos, e dispostos diretamente na superfície do solo entre 1991 e 2006. Esses resíduos apresentavam elevadas concentrações de Pb, Cd, Zn, Cu e Ni, e diferentes trabalhos relataram a contaminação dos solos, sedimentos e corpos hídricos da região por tais metais (Cruz et al., 2019; Kasemodel e Rodrigues, 2022; Trevizani et al., 2023).

Diante desse histórico de contaminação, torna-se necessária a busca por alternativas para uma disposição mais adequada dos resíduos e a contenção e mitigação dos MPT. Trabalhos anteriores vêm investigando o uso de misturas de um argissolo da região do Vale do Ribeira com biocarvão de resíduos de poda urbana como alternativa para a construção de barreiras de proteção ambiental, como liners e camadas de cobertura de resíduos (Marques et al. 2024; Marques e Rodrigues, 2025). Essas pesquisas buscaram avaliar tanto o desempenho geotécnico, relacionado à impermeabilização e resistência mecânica, quanto a eficiência na imobilização de MPT, para proteção ambiental. Resultados obtidos por Marques e Rodrigues (2025) demonstraram que a adição de biocarvão de resíduos de poda urbana ao solo promoveu aumento da soma de bases trocáveis, do pH, da resistência à compressão simples e da capacidade de sorção de Pb, Cd e Zn. Isso indica que a combinação entre biocarvão e solos da região constitui uma alternativa promissora para aplicação em barreiras de proteção ambiental em áreas de disposição de resíduos de mineração ricos em MPT.

Entretanto, após sua aplicação ao solo, o biocarvão está sujeito a processos de envelhecimento associados a variações de temperatura, exposição à água da chuva, oxidação e degradação fotoquímica. Esses processos podem, ao longo do tempo, alterar propriedades importantes do material, como a área superficial específica, a morfologia da superfície, o pH, a capacidade de troca catiônica e o grau de aromaticidade, aspectos ainda pouco explorados na literatura (Li et al., 2019; Wang et al., 2020). O monitoramento do envelhecimento natural em campo ao longo do tempo é demorado e complexo, uma vez que alguns processos ocorrem de forma lenta, podendo demandar décadas de acompanhamento.

Diferentes métodos de envelhecimento artificial têm sido desenvolvidos para simular, em laboratório, os processos naturais de forma mais rápida e controlada (Wang et al., 2020). Entre esses métodos, destacam-se os ciclos de congelamento e descongelamento, que simulam condições de regiões sazonalmente frias; os ciclos de umedecimento e secagem, que reproduzem eventos naturais de precipitação; e a oxidação química, que simula os efeitos de agentes oxidantes abióticos, como o oxigênio atmosférico ou dissolvido (Yang et al., 2022).

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou as variações de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) de um solo representativo do Vale do Ribeira e de uma mistura contendo 2,5% em massa de biocarvão, após envelhecimento simulado em laboratório por meio de ciclos de umedecimento e secagem. Assim, este estudo contribui para a compreensão dos efeitos do envelhecimento do biocarvão nas propriedades geoquímicas de misturas solo-biocarvão, fornecendo subsídios para a avaliação de sua durabilidade e desempenho a longo prazo em barreiras de proteção ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O solo foi coletado na porção paulista do Vale do Ribeira (livre de contaminação), e apresenta textura predominantemente siltosa (48,1% silte, 22,2% argila e 29,7% areia), caráter ácido (pH 4,8), com caulinita como argilomineral predominante na fração fina (Marques et al. 2024). O biocarvão foi obtido da pirólise de resíduos de poda urbana a 500 °C por 5 horas, conforme descrito por Moraes (2022). A mistura de solo com 2,5% de biocarvão foi homogeneizada com auxílio de uma betoneira, e quarteada pelo método da pilha alongada, conforme descrito por Marques et al. (2024).

As amostras de solo e da mistura solo-biocarvão foram submetidas a 7 ciclos de umedecimento e secagem, conforme metodologia adaptada de Yang et al. (2022). Foram pesados 2 kg da amostra de solo, distribuídos em dois béqueres de plástico de 2 litros (1 kg de amostra em cada béquer). Adicionou-se água MilliQ até a saturação. A suspensão foi misturada com auxílio de uma colher, e o béquer foi vedado com plástico filme. Os béqueres vedados foram mantidos por 24 horas dentro de uma incubadora Tecnal modelo TE371 a 25°C. Em seguida, as amostras foram retiradas da incubadora, descobertas e secas em estufa a 60°C por 24 horas (Figura 1).

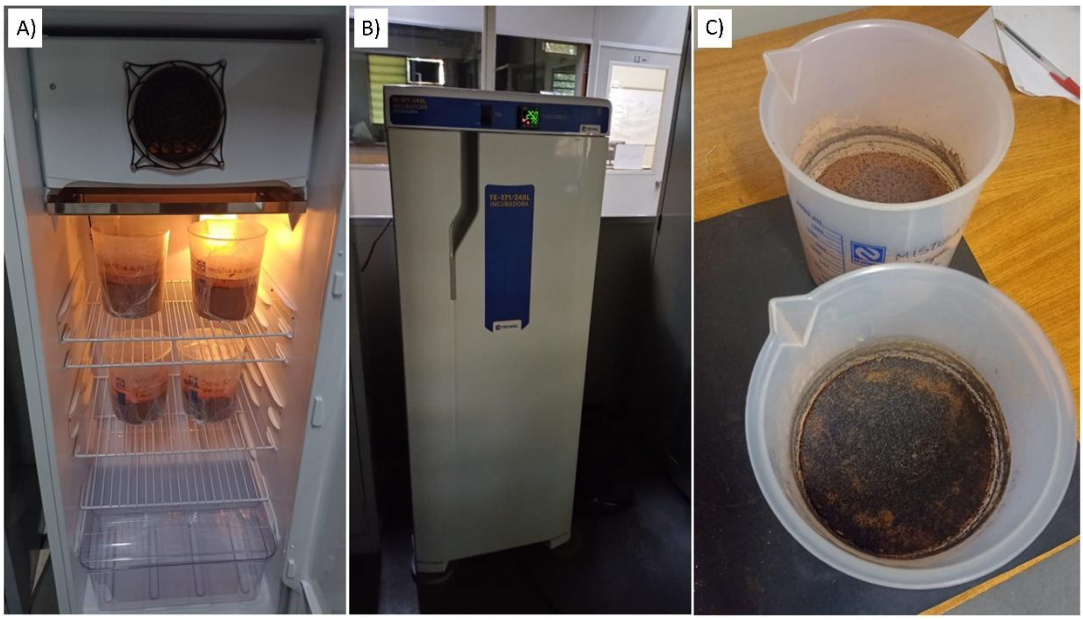


Figura 1. Processo de envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem das amostras. A) amostras de solo e da mistura dentro da incubadora: processo de umedecimento. B) incubadora utilizada na metodologia, C) amostras da mistura após secagem em estufa.

Esse procedimento foi repetido 7 vezes (totalizando 7 ciclos de umedecimento e secagem), sempre registrando a cada ciclo a quantidade de água adicionada, bem como o pH, o potencial redox (Eh) e a condutividade elétrica (CE) das amostras. O pH e a CE foram medidos utilizando um pHmetro Jensway 3540. O Eh foi medido em um pHmetro Digimed DH21 com eletrodo de anel de platina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a variação dos valores de pH, Eh e CE nas amostras ao longo dos 7 ciclos de umedecimento e secagem. Primeiramente, observou-se que em todas as etapas do processo, a mistura com biocarvão apresentou maior pH, maior CE e menor Eh em comparação com o solo puro. Isso pode ser explicado pelas características do biocarvão, que é um material mais alcalino, redutor e que apresenta alta concentração de nutrientes (Moraes, 2022). Marques et al. (2024) já havia observado o aumento do pH deste mesmo solo devido a adição de biocarvão de resíduos de poda urbana, não só devido ao maior pH do biocarvão, mas também a sua capacidade de neutralizar ácidos associada a íons bicarbonato e carbonato.

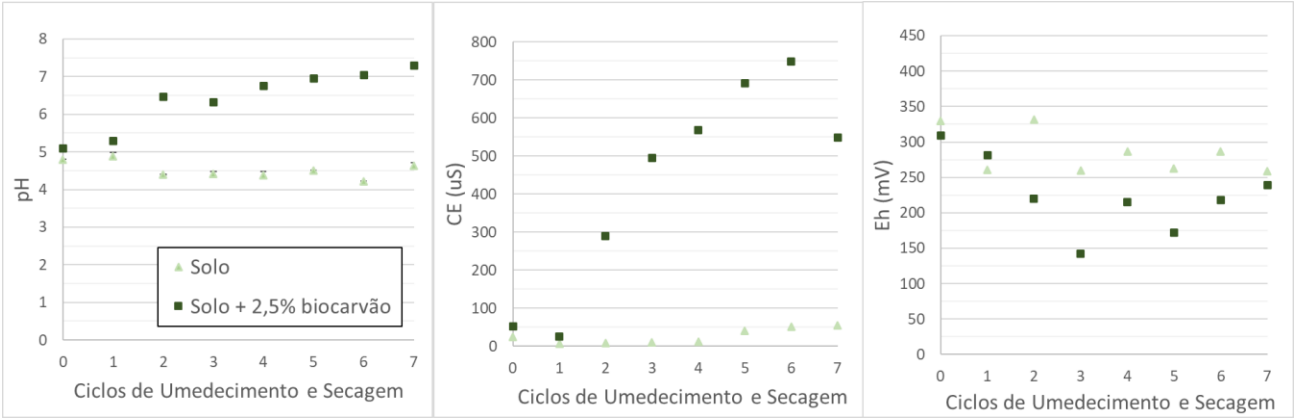


Figura 1. Variação de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) nas amostras de solo e mistura de solo com 2,5% de biocarvão de resíduos de poda urbana.

O pH inicial do solo era de 4,8, e teve pouca variação, chegando no final do processo com 4,6. Por outro lado, o pH da mistura com 2,5% de biocarvão aumentou de 5,1 para 7,3. Tais resultados contrastam com o observado por Luo et al. (2025), que estudaram o envelhecimento de um biocarvão de palha de milho alcalino (pH 10,6) a partir de 25 ciclos de umedecimento e secagem e reportaram diminuição do pH. No entanto, considerando misturas de solo e biocarvão, outros autores já demonstraram aumento do pH devido a processos de envelhecimento, como Yang et al. (2023), ao estudar uma mistura de solo com 2,5% de biocarvão de palha de milho após 30 ciclos de umedecimento e secagem. No caso de Yang et al. (2023) e da presente pesquisa, o aumento do pH pode estar relacionado a dissolução progressiva de compostos alcalinos do biocarvão e a influência da troca de cátions, como Ca+, Mg+ e K+, com a solução do solo.

A CE do solo permaneceu entre 7,3 e 12,0 µS cm^{-1} nos primeiros 4 ciclos e depois aumentou até 54,7 µS cm^{-1} no final do sétimo ciclo. A mistura com 2,5% de biocarvão também passou por um aumento da CE, que foi de 51,7 µS cm^{-1} até 749,0 µS cm^{-1} no sexto ciclo. Isso pode estar associado com a lixiviação progressiva dos íons das fases sólidas tanto do solo quanto do biocarvão.

O Eh inicial do solo, de +329,5 mV, variou ao longo do processo, ficando entre os valores de +258,6 mV (sétimo ciclo) e +332,1 mV (segundo ciclo). O Eh inicial da mistura solo-biocarvão foi de +309,2 mV, e este valor também sofreu variações para mais e para menos ao longo dos ciclos, estando sempre entre +142,3 (terceiro ciclo) e +281,6 mV(segundo ciclo).

De forma geral, o processo de envelhecimento por umedecimento e secagem teve maior efeito sobre os parâmetros físico-químicos da mistura solo-biocarvão do que sobre os do solo puro, o que indica que os componentes mais reativos estavam associados ao biocarvão. E o aumento do pH observado a partir do envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem pode favorecer a precipitação dos metais e sua sorção pelas partículas de solo e biocarvão, o que é relevante na aplicação como barreira de cobertura em resíduos de mineração ricos em metais potencialmente tóxicos. Em geral, um ambiente básico favorece a precipitação de metais (Kabata-Pendias, 2011). Alamgir (2016) destaca que o pH pode ainda influenciar a retenção de metais de outras formas como, por exemplo, com a variação da carga superficial dos minerais e com a dissolução de ânions de complexação de metais.

4 CONCLUSÕES

O envelhecimento simulado por ciclos de umedecimento e secagem afetou de forma mais intensa os parâmetros físico-químicos da mistura solo–biocarvão em comparação ao solo puro, promovendo aumento do pH e da condutividade elétrica e redução do potencial redox. Tais mudanças podem ter implicações para o uso dos materiais como barreira de proteção ambiental. Estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos do envelhecimento sobre propriedades hidráulicas e sobre a lixiviação de metais.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Doutorado (Processo 140124/2019-5), pela bolsa de Pós Doutorado Junior (Processo nº 175138/2023-0) e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 310989/2020-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alamgir, M. (2016) *The Effects of Soil Properties to the Extent of Soil Contamination with Metals.* In: Hasegawa, H.; Rahman, I. M. M.; Rahman, M. A. Environmetal Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils. Springer, Tóquio, p. 1-19.

Cruz, A. C. F., Gusso-Choueri, P., Araujo, G. S., Campos, B. G., Abessa, D. M. (2019) Levels of metals and toxicity in sediments from a Ramsar site influenced by former mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171, p.162–172.

Kabata-Pendias, A. (2011) *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed., CRC Press, Boca Raton. 505p.

Kasemodel, M. C.; Rodrigues, V. G. S. (2022) Soil Particle Size Fractioning and Pb and Cd Bioaccessibility on a Dirty Road Near Former Beneficiation and Smelting. *Water, Air & Soil Pollution*, 233, 478. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05936-8

Li, H.; Lu, X.; Xu, Y.; Liu, H. (2019) How close is artificial biochar aging to natural biochar aging in fields? A meta-analysis. *Geoderma*, 352, 96-103. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.006

Luo, Q.; Zhao, X.; Li, Y.; Deng, Y.; He, Q.; Dai, W. (2025) Aging alters the physicochemical properties of biochar, enhances its adsorption performance for tris-(1-chloro-2-propyl) phosphate, and changes the adsorption mechanism. *Environmental Technology & Innovation* 37, 104053. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104053

Marconi, G.; Di Resta, C.; Naclerio, A.; Banfi, G.; Tomaiulo, R. (2026) Heavy metals and human reproductive toxicity: Mechanisms, pregnancy outcomes, and mitigation strategies. *Reproductive Toxicology* 139, 109104. https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2025.109104

Marques, J. P.; Rodrigue, V. G. S. R. (2025) Urban pruning waste biochar enhances lead, cadmium, and zinc sorption: A potential strategy for soil liners in Ribeira Valley (Brazil). *Soil and Sediment Contamination: An International Journal.* 1–20. https://doi.org/10.1080/15320383.2025.2556142

Marques, J. P.; Vaz, C. M. P; Rodrigues, V. G. S. (2024) Characterization of mixtures of Brazilian Ultisol with urban pruning waste biochar at two different proportions. *Journal of Soil and Sediments* 24, 3610-3625. https://doi.org/10.1007/s11368-024-03928-1

Moraes, T. T. (2022) *Caracterização de biocarvão de resíduos de poda e análise da sorção de Cd e Pb.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP.

Trevizani, T. H.; Domit, C.; Santos, M. C. O.; Figueira, R. C. L. (2023) Bioaccumulation of heavy metals in estuaries in the Southwest Atlantic Ocean. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 26703-26717. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23974-x.

Wang, J.; Guo, X. (2020) Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials* 390, 122156. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156

Yang, K.; Wang, X.; Cheng, H.; Tao, S. (2023) Effects of physical aging processes on the bioavailability of heavy metals in contaminated site soil amended with chicken manure and wheat straw biochars. *Environmental Pollution* 324, 121414.

Yang, X.; Wang, L.; Guo, J.; Wang, H.; Masek, O.; Wang, H.; Bolan, N. S.; Alessi, D. S.; Hou, D. (2022) Aging features of metal(loid)s in biochar-amended soil: Effects of biochar type and aging method. *Science of the Total Environment* 815, 152922. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152922

Yong, R. N.; Mulligan, C. N. (2019) *Natural and Enhanced Attenuation of Contaminants in Soils*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 325p.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/84

Efeito do licor negro kraft e cimento CP II-F-32 na condutividade hidráulica de um solo argiloso compactado

Bruno Pereira de Queiroz
Doutorando, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, bruno.queiroz@ufv.br

Rejane Nascentes
Professora, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Maria Luiza Nobre de Almeida
Aluna de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, maria.luiza.almeida@ufv.br

Felipe Tura
Aluno de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, felipe.tura@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Professor, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

RESUMO: Solos compactados são amplamente empregados como barreiras hidráulicas em sistemas de disposição de resíduos, contudo podem apresentar variação da condutividade hidráulica durante a percolação de água ou lixiviados. Este estudo avaliou a evolução da condutividade hidráulica (k_{20}) de um solo argiloso compactado estabilizado com licor negro kraft e cimento CP II-F-32 ao longo de ensaios de permeabilidade de longa duração. As misturas foram preparadas com licor negro incorporado à água de compactação (100 e 200 mgNa/kg de solo seco), com e sem adição de 2% de cimento. As colunas de solo foram moldadas no ramo úmido da curva de compactação, com grau de compactação de 95%, e submetidos a percolação por aproximadamente 300 dias. Os resultados mostraram que a adição de licor reduziu a condutividade hidráulica e as amplitudes de variação de k_{20} em comparação ao solo compactado. A mistura com 200 mgNa e cimento apresentou o melhor desempenho hidráulico, com baixos valores iniciais, picos discretos e rápida estabilização. A redução de k_{20} foi associada à dispersão promovida pelo Na^+ do licor negro, que favorece a reorganização das partículas finas e o preenchimento de poros, enquanto o Ca^{2+} liberado pelo cimento tende a atenuar parcialmente esse efeito por meio de interações eletroquímicas na estrutura do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Licor negro kraft, Condutividade hidráulica, Estabilização química de solo, Compactação, Barreiras de baixa permeabilidade.

ABSTRACT: Compacted soils are widely used as hydraulic barriers in waste disposal systems; however, their hydraulic conductivity may vary during the percolation of water or leachates. This study evaluated the evolution of hydraulic conductivity (k_{20}) in a compacted clayey soil stabilized with kraft black liquor and CP II-F-32 cement during long-term permeability tests. The mixtures were prepared with black liquor incorporated into the compaction water (100 and 200 mgNa/kg of dry soil), with and without the addition of 2% cement. Soil columns were compacted on the wet side of the compaction curve at a degree of compaction of 95% and subjected to percolation for approximately 300 days. The results showed that the addition of black liquor reduced hydraulic conductivity and the amplitude of k_{20} variations compared with the compacted soil. The mixture containing 200 mgNa and cement exhibited the best hydraulic performance, with low initial values, discrete peaks, and rapid stabilization. The reduction in k_{20} was associated with dispersion promoted by Na^+ from the black liquor, which favors the rearrangement of fine particles and pore filling, while Ca^{2+} released by the cement partially attenuates this effect through electrochemical interactions within the soil structure.

KEYWORDS: Kraft black liquor, Unconfined compressive strength, Chemical soil stabilization, Compaction, Barrier materials.

1 INTRODUÇÃO

Aterros sanitários permanecem como uma das principais soluções de engenharia para a disposição ambientalmente segura de resíduos sólidos urbanos (RSU), devido ao custo relativamente baixo e à elevada capacidade de armazenamento (Khodary et al., 2018). Nesses sistemas, camadas de argila compactada são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas para reduzir a migração de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas (Musso et al., 2010). Entretanto, o custo elevado de materiais sintéticos frequentemente limita sua aplicação, especialmente em municípios de pequeno e médio porte, incentivando o uso de solos compactados e o desenvolvimento de técnicas de estabilização com materiais alternativos. Entre esses materiais, o licor negro kraft, subproduto alcalino da indústria de celulose rico em compostos de sódio, apresenta potencial para modificar a estrutura de solos argilosos por meio da interação de cátions Na^+ com as partículas de argila (Queiroz et al., 2025).

No contexto dessas soluções baseadas em solos compactados e misturas estabilizadas quimicamente, a estabilidade hidráulica a longo prazo de barreiras utilizadas em aterros sanitários é um aspecto fundamental, uma vez que processos geoquímicos e interações com o fluido percolante podem alterar a estrutura do solo e, consequentemente, sua condutividade hidráulica. Dessa forma, a avaliação experimental do comportamento dessas barreiras ao longo de períodos prolongados de percolação é essencial para compreender sua sustentabilidade e seu desempenho em condições reais de campo.

Este estudo investigou o efeito combinado do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento CP II-F-32 na condutividade hidráulica de um solo argiloso compactado em sua estabilidade hidráulica a longo prazo. Ensaios de colunas foram conduzidos por aproximadamente 300 dias, fornecendo uma indicação do desempenho hidráulico dessas misturas em condições prolongadas. Os resultados obtidos sugerem que as misturas avaliadas apresentam potencial para manter valores adequados de condutividade hidráulica ao longo do tempo, sugerindo sua viabilidade para aplicação em sistemas de revestimento de aterros. Destaca-se que o experimento permanece em andamento, possibilitando a avaliação do comportamento hidráulico das misturas em períodos ainda mais longos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo, estabilizantes químicos e misturas

O solo analisado neste estudo é um solo residual maduro derivado de gnaisse, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo (horizonte B). As amostras deformadas foram coletadas no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), estado de Minas Gerais, Brasil, em um talude de corte localizado nas coordenadas geográficas 20º45'08.7" S e 42º51'30.4" W.

Os estabilizantes químicos empregados foram o licor negro kraft de madeira de pinus e o cimento Portland composto com fíler calcário (CP II-F-32). O licor negro, proveniente de estudos realizados no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM) da Universidade Federal de Santa Maria (RS), teve sua composição química determinada por espectrofotometria de absorção atômica (Agilent Technologies, modelo 240FS), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do licor negro Kraft

[Na]	[K]	[Mg]	[Ca]	[Mn]	[Fe]	[Cu]	[Zn]	[Al]	[Si]	ρ	pH
mg/L										g/cm³	
19724	153	5,3	12	12	13	0,43	0,68	39	42	1,062	13,48

[Na], [K], [Mg], [Ca], [Mn], [Fe], [Cu], [Zn], [Al], [Si] – Concentração de sódio, potássio, magnésio, cálcio, manganês, ferro, cobre, zinco, alumínio e silício; ρ – massa específica.

O cimento CP II-F-32 foi selecionado por sua disponibilidade comercial e pelo potencial influência na resistência à compressão não confinada das misturas de solo. Sua caracterização química, apresentada na Tabela 2, foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro Rigaku Primus II, com amostras preparadas na forma de pastilhas fundidas. O teor de óxido de cálcio livre foi determinado pelo método do etilenoglicol, conforme a norma NBR 17086-10 (ABNT, 2023).

Tabela 2. Caracterização química do cimento CP II-F-32

H_2O	PF	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	MnO	Fe_2O_3	SrO	CaO-l
% em massa													
2,82	15,60	1,31	4,15	15,10	0,34	0,74	0,10	0,83	55,20	0,21	2,07	0,30	0,18

PF – perda ao fogo; CaO-l – óxido de cálcio livre.

Foram produzidas quatro misturas: solo com adições de licor negro correspondentes a 100 e 200 mgNa/kg de solo seco, equivalentes a aproximadamente 0,5% e 1,1% em massa de licor, respectivamente, em relação à massa seca do solo; e solo com as mesmas dosagens de licor negro kraft combinadas com 2% de cimento CP II-F-32, também referido à massa seca do solo.

2.2 Caracterização geotécnica e ensaios de compactação

A caracterização geotécnica do solo seguiu recomendações da ABNT, incluindo a determinação da massa específica dos sólidos (ABNT, 2025a), determinação dos limites de liquidez e plasticidade (ABNT, 2025b; 2025c), análise granulométrica (ABNT, 2025d), e ensaios de compressão não confinada, realizados tanto no solo quanto nas misturas. A compactação do solo e das misturas foi conduzida conforme as normas brasileiras para compactação de solos (ABNT, 2025e) e de misturas solo-cimento (ABNT, 2012), utilizando energia padrão Proctor.

Para o preparo das misturas, o licor negro foi adicionado por inclusão na água de compactação. As amostras foram mantidas em cura por 24 horas, posteriormente passadas em peneira com abertura de 4,75 mm para destorroamento e, em seguida, submetidas ao ensaio de compactação. O período de cura teve como objetivo uniformizar o teor de umidade e favorecer as reações de troca catiônica entre o solo e o licor negro, responsáveis por alterar a densidade de carga elétrica na superfície das partículas de argila e promover sua dispersão.

O preparo das misturas solo-licor-cimento seguiu procedimento semelhante. Após a adição do licor negro e o período de cura de 24 horas, o cimento foi incorporado. Um intervalo adicional de aproximadamente uma hora foi respeitado antes da compactação, para permitir o início do processo de pega do cimento. Em seguida, as amostras foram passadas novamente na peneira de 4,75 mm e submetidas à compactação. O tempo total entre a finalização da mistura e a compactação final dos corpos de prova não excedeu uma hora e meia, garantindo que o cimento permanecesse em condições adequadas de pega durante o processo.

2.3 Ensaios de coluna

Os ensaios de percolação foram conduzidos em equipamento desenvolvido por Caneschi (2012). A descrição detalhada da concepção, montagem e funcionamento do sistema encontra-se em Queiroz et al. (2025). Adotou-se gradiente hidráulico igual a 10, conforme recomendações da norma americana ASTM D5856-95, considerando-se os valores de condutividade hidráulica previamente determinados para o solo natural e para as misturas solo-licor.

Os ensaios em coluna foram realizados com água deionizada, sob temperatura controlada. A temperatura ambiente manteve-se predominantemente entre 19,8 e 23,2 °C (percentis 5 e 95), com média de 21,3 °C. Os valores de condutividade hidráulica foram corrigidos para 20 °C (k_{20}). A condutividade hidráulica do solo compactado e das quatro misturas de solo-licor e solo-licor-cimento foi determinada em triplicata, totalizando 15 colunas de solo. Os ensaios foram conduzidos por aproximadamente 300 dias de monitoramento contínuo, correspondentes ao período analisado neste estudo, permanecendo o experimento em operação.

As colunas de solo foram compactadas no ramo úmido da curva de compactação, com desvios de umidade entre 0,5% e 1,0% em relação ao teor ótimo e grau de compactação de 95%, definidos pela energia Proctor normal. A moldagem foi realizada, sob energia estática, visando garantir homogeneidade e reprodutibilidade, sendo executada diretamente no interior de moldes rígidos de PVC, com 10 cm de diâmetro interno, 12 cm de altura e 6 mm de espessura de parede.

Cada molde possuía dois sulcos transversais internos, localizados a 4 cm das extremidades superior e inferior, os quais foram preenchidos com bentonita antes da compactação, com o objetivo de mitigar a

ocorrência de fluxo preferencial na interface solo-molde. Todos as colunas de solo compactadas foram submetidas à cura por 7 dias em câmara úmida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica e a classificação do solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), são apresentadas na Tabela 3. O solo é predominantemente argiloso e classificado como argila de alta plasticidade (CH). A distribuição granulométrica, também apresentada na Tabela 3, segue as recomendações da norma NBR 6502 (ABNT, 2022).

Tabela 3. Caracterização geotécnica e classificação do solo.

ρ_s	Análise granulométrica (%)				Limites de Atterberg (%)			USCS
(g/cm³)	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	w_L	w_P	*IP*	
2,776	65,0	10,8	24,0	0,2	91	31	60	CH

ρ_s – massa específica dos sólidos; w_L – limite de liquidez; w_P – limite de plasticidade; *IP* – índice de plasticidade; USCS – *Unified Soil Classification System*; CH – argila inorgânica de alta plasticidade.

3.1 Ensaios de compactação

As curvas de compactação do solo e das misturas com adições de licor negro kraft correspondentes a 100 e 200 mg Na/kg de solo seco, assim como das misturas combinadas dessas mesmas dosagens de licor negro com 2% de cimento CP II-F-32, são apresentadas na Figura 1. Os parâmetros ótimos de compactação teor de umidade ótimo ($w_{ót}$), massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) e índice de vazios mínimo ($e_{mín}$), bem como o coeficiente de determinação (R^2) e as equações quadráticas ajustadas às curvas de compactação, estão listados na Tabela 4. As curvas de compactação foram ajustadas por regressão polinomial de segundo grau, na forma: $\rho_d = a \cdot w^2 + b \cdot w + c$ em que ρ_d é a massa específica seca e w é o teor de umidade do solo.

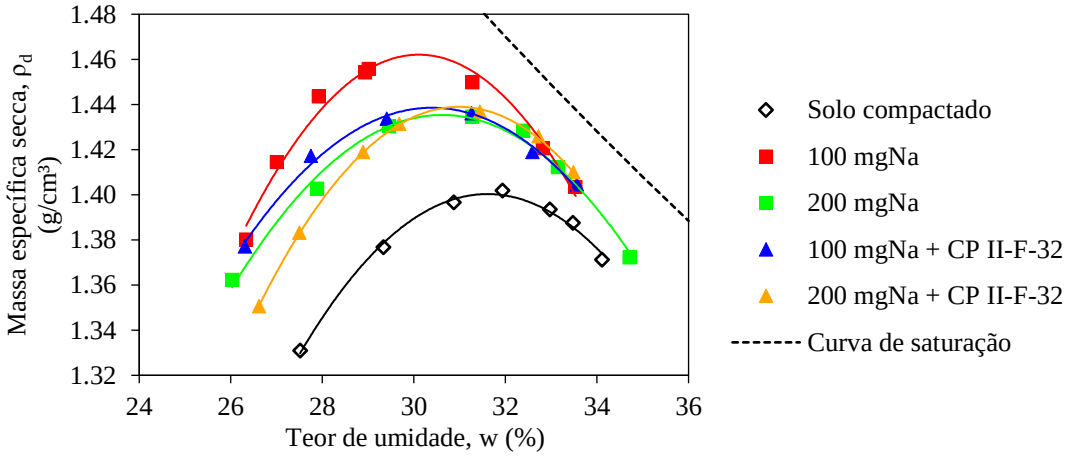


Figura 1. Curvas de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Tabela 4. Parâmetros ótimos de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Mistura	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm³)	e_{min}	Equação de regressão quadrática ($\rho_d = a \cdot w^2 + b \cdot w + c$)	R^2 (%)
Solo compactado	31,6	1,400	0,982	ρ_d = - 0,0042w^2 + 0,2662w - 2,8065	99,3
100 mgNa	30,1	1,462	0,899	ρ_d = - 0,0053w^2 + 0,3213w - 3,3746	97,3
100 mgNa + CP II-F-32	30,4	1,439	0,930	ρ_d = - 0,0036w^2 + 0,2171w - 1,8611	98,8
200 mgNa	30,6	1,435	0,934	ρ_d = - 0,0036w^2 + 0,2226w - 1,9723	98,7
200 mgNa + CP II-F-32	31,0	1,439	0,929	ρ_d = - 0,0046w^2 + 0,2862w - 2,9951	100,0

Os resultados apresentados na Figura 1 e na Tabela 4 indicam que a adição de licor negro kraft de madeira de pinus promoveu redução do teor de umidade ótima e aumento da massa específica aparente seca máxima do solo. O solo compactado apresentou $w_{ót}$ de 31,6% e $\rho_{d,máx}$ de 1,400 g/cm³. Com a adição de 100 mgNa de licor negro, observou-se deslocamento da curva de compactação, com redução do teor de umidade ótima para 30,1% e aumento da massa específica seca máxima para 1,462 g/cm³. Para a dosagem de 200 mgNa, os parâmetros ótimos foram 30,6% e 1,435 g/cm³, respectivamente, permanecendo superior ao do solo compactado, porém com incremento na $\rho_{d,máx}$ menos expressivo. Esse comportamento indica que ganhos adicionais de compactação tendem a ser limitados em dosagens mais elevadas de licor.

O incremento da massa específica seca máxima pode ser atribuído às interações químicas entre o licor negro e a fração argila do solo. A dissociação dos sais de sódio presentes no licor aumenta a disponibilidade de Na^+ na solução intersticial, favorecendo reações de troca catiônica e modificando o arranjo das partículas finas. Esse processo tende a promover maior dispersão das partículas de argila e rearranjos microestruturais durante a compactação, contribuindo para o deslocamento da curva de compactação observado nas misturas com licor (Queiroz et al., 2025). Adicionalmente, a elevação do pH imposta pelo caráter alcalino do licor amplia a carga negativa superficial da caulinita, reforçando os mecanismos de repulsão eletrostática descritos por Chorom e Rengasamy (1995).

A adição de 2% de cimento CP II-F-32 resultou em discreto aumento do teor de umidade ótima, associado ao consumo de água durante as reações iniciais de hidratação. A massa específica seca máxima permaneceu próxima de 1,439 g/cm³, indicando que o Ca^{2+} liberado pelo cimento modifica parcialmente o ambiente iônico do sistema e limita os efeitos dispersivos promovidos pelo Na^+ do licor.

3.2 Ensaios de coluna

A variação do coeficiente de condutividade hidráulica corrigido para 20°C (k_{20}) em função do volume de poros percolados (vpp), ao longo de aproximadamente 300 dias de monitoramento contínuo, é apresentada na Figura 2, sendo o experimento ainda mantido em operação. Uma das colunas do solo compactado (coluna A) apresentou comportamento hidráulico distinto das demais ao longo do período de monitoramento e, por essa razão, foi excluída das análises comparativas. Assim, os resultados apresentados referem-se a 14 colunas com comportamento consistente. A figura é subdividida em painéis de A a E, organizados de modo a facilitar a comparação entre os diferentes tratamentos. Os painéis A a C mostram o comportamento do solo compactado e das misturas com 100 mgNa e 200 mgNa de licor negro kraft, respectivamente. Os painéis D e E correspondem às misturas contendo 100 mgNa e 200 mgNa de licor, associadas à adição de 2% de cimento CP II-F-32. Cada painel apresenta os resultados individuais das colunas de solo, identificados por diferentes símbolos e cores (colunas A, B e C).

Os resultados apresentados na Figura 2 evidenciam que a condutividade hidráulica (k_{20}) evoluiu de forma variável com o avanço do volume de poros percolados (vpp), apresentando fases sucessivas de aumento, estabilização e redução. Apesar desse padrão geral, diferenças marcantes foram observadas entre os tratamentos quanto à magnitude dos valores máximos, à amplitude das variações e à estabilidade hidráulica ao longo do período analisado.

O solo compactado (Figura 2.A) apresentou os maiores valores máximos de k_{20} entre todos os tratamentos avaliados, com determinações máximas obtidas da ordem de 1×10^{-7} m/s e maior volume de poros percolados quando comparado às demais misturas. Houve aumento gradual da condutividade hidráulica até cerca de 40 e 60 vpp, seguido de estabilização relativa em torno de 9×10^{-8} m/s entre 60 e 120 vpp. Posteriormente, ocorreu redução progressiva de k_{20}, atingindo aproximadamente 4×10^{-8} m/s na coluna B (245 vpp) e 3×10^{-8} m/s na coluna C (230 vpp). A amplitude de variação dos valores de k_{20} para o solo compactado foi a maior entre os tratamentos analisados, sendo da ordem de 7×10^{-8} (coluna C) a 8×10^{-8} m/s (coluna B). Nos volumes finais percolados, a coluna B apresentou valores de k_{20} que tenderam a se reaproximar dos níveis iniciais, enquanto a coluna C exibiu valores finais inferiores aos inicialmente registrados.

As colunas da mistura com 100 mgNa (Figura 2.B) exibiram comportamento homogêneo, com valores iniciais de k_{20} próximos ou ligeiramente inferiores a 1×10^{-8} m/s. Em todas as colunas de solo, os primeiros volumes percolados apresentaram aumento discreto, atingindo valores máximos de k_{20} na faixa de 2×10^{-8} a 3×10^{-8} m/s entre 20 e 30 vpp. Após esse estágio, ocorreu redução suave ou estabilização em faixas estreitas de condutividade hidráulica, com valores finais entre 1×10^{-8} e 2×10^{-8} m/s. A amplitude de variação dos valores

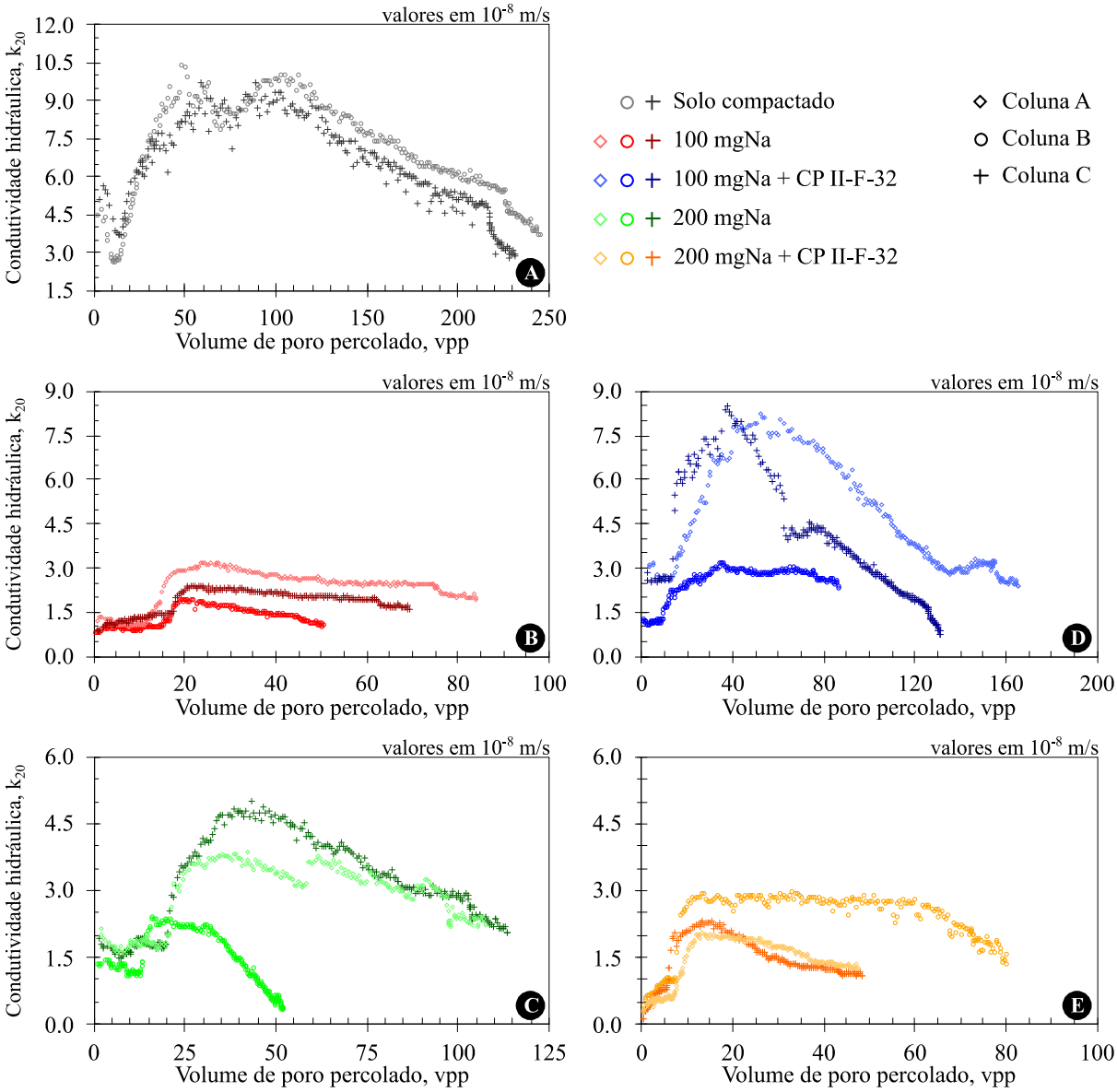


Figura 2. Variação do coeficiente de condutividade hidráulica corrigido para 20 °C (k_{20}) em função do volume de poros percolados (vpp) para o solo natural e para as misturas solo-licor e solo-licor-cimento, ao longo de aproximadamente 300 dias de percolação.

de k_{20} foi limitada a 2×10^{-8} m/s, refletindo baixa dispersão entre as colunas deste tratamento.

A mistura com 200 mgNa (Figura 2.C) exibiu comportamento mais heterogêneo entre as colunas quando comparado à dosagem de 100 mgNa. Os valores iniciais de k_{20} situaram-se entre $1{,}5\times10^{-8}$ (repetição A) e $1{,}8\times10^{-8}$ m/s (repetição C) até 20 vpp, seguidos de aumento gradual até $3{,}7\times10^{-8}$ e $4{,}7\times10^{-8}$ m/s, respectivamente nas colunas A e C, entre 25 e 50 vpp. Após os máximos, a condutividade hidráulica reduziu-se progressivamente, com tendência de convergência para valores próximos de 2×10^{-8} m/s nessas colunas. A coluna B apresentou padrão distinto, com redução inicial da condutividade hidráulica até aproximadamente 1×10^{-8} m/s, aumento transitório para $2{,}2\times10^{-8}$ m/s entre 15 e 30 vpp e posteriormente decréscimo acentuado, atingindo valores mínimos de $3{,}7\times10^{-9}$ m/s, inferiores aos valores iniciais ($1{,}2\times10^{-8}$ m/s). A amplitude de variação dos valores de k_{20}, entre 2×10^{-8} e 4×10^{-8} m/s, evidencia maior dispersão entre as colunas em relação à mistura com 100 mgNa.

A mistura com 100 mgNa e cimento CP II-F-32 (Figura 2.D) exibiu comportamento relativamente heterogêneo entre as colunas, com dois corpos de prova apresentando padrão semelhante e um comportamento distinto. Os valores iniciais de k_{20} situaram-se entre aproximadamente $1{,}2\times10^{-8}$ m/s (coluna B) e $3{,}0\times10^{-8}$ m/s

(colunas A e C), com elevação já a partir de 10 a 15 vpp, atingindo máximos de 3×10^{-8} (coluna B) e 8×10^{-8} m/s (colunas A e C) entre 40 e 50 vpp, inferiores aos picos observados para o solo compactado. As colunas A e C apresentaram trajetória semelhante, caracterizada por aumento até valores próximos de 8×10^{-8} m/s, seguido de redução progressiva ao longo da percolação. Na coluna C, após o pico em torno de 35 vpp, observou-se decréscimo gradual para aproximadamente 6×10^{-8} m/s entre 40 e 60 vpp, seguido de queda mais acentuada para cerca de 4×10^{-8} m/s e posterior redução contínua até valores da ordem de 7×10^{-9} m/s ao final do ensaio. Em contraste, a coluna B apresentou padrão distinto, com valor máximo de k_{20} da ordem de 3×10^{-8} m/s, estabilização entre 30 e 70 vpp e subsequente redução gradual para valores próximos de $2{,}5\times10^{-8}$ m/s. A amplitude de variação dos valores de k_{20}, atingindo cerca de 6×10^{-8} m/s na coluna A e 8×10^{-8} m/s na coluna C, e aproximadamente de 2×10^{-8} m/s na coluna B, evidencia maior dispersão entre as colunas, observando-se, contudo, tendência consistente de redução da condutividade hidráulica para volumes percolados superiores a 100-120 vpp.

A mistura com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 (Figura 2.E) apresentou comportamento relativamente uniforme entre as colunas, caracterizado por valores iniciais muito baixos de condutividade hidráulica, variando entre aproximadamente 3×10^{-9} e 5×10^{-9} m/s nos primeiros volumes percolados. Em todas as colunas de solo, houve aumentos graduais de k_{20} nos primeiros volumes de poros percolados até 5-7 vpp, seguidos de incrementos abruptos que conduziram a picos entre cerca de 2×10^{-8} e 3×10^{-8} m/s, atingidos ainda nos estágios iniciais da percolação, entre 10 e 15 vpp. Após esses máximos, ocorreu tendência predominante de redução gradual, conduzindo à convergência para valores relativamente estáveis, situados na faixa de $1{,}0\text{-}1{,}5\times10^{-8}$ m/s. As amplitudes de variação permaneceram moderadas, da ordem de $1{,}8\times10^{-8}$ a $2{,}5\times10^{-8}$ m/s, inferiores às observadas em outros tratamentos e semelhantes àquelas da mistura com 100 mgNa, indicando picos discretos e maior estabilidade da condutividade hidráulica ao longo da percolação. De modo geral, o comportamento foi marcado por máximos precoces, amplitudes reduzidas e volumes máximos de poros percolados moderados, sem oscilações tardias expressivas.

A análise comparativa dos tratamentos indica que o desempenho hidráulico deve ser interpretado considerando não apenas os valores mínimos de k_{20}, mas também a magnitude dos máximos, a amplitude das variações e a estabilidade a longo prazo. Embora algumas colunas tenham apresentado valores finais de k_{20} semelhantes ou até inferiores aos iniciais, tais reduções ocorreram apenas após a percolação de grandes volumes de poros. A mistura com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 apresentou o melhor desempenho global, combinando valores iniciais reduzidos de k_{20}, máximos discretos obtidos ainda nos primeiros volumes de poros e amplitudes moderadas, com convergência relativamente rápida para valores estáveis. Em seguida, a mistura com 100 mgNa destacou-se por apresentar máximos e amplitudes semelhantes, porém atingidos em volumes de poros ligeiramente superiores. A mistura com 200 mgNa apresentou desempenho intermediário, com amplitude inferior e retorno mais precoce aos valores iniciais de k_{20} quando comparada à mistura com 100 mgNa e cimento CP II-F-32, que exibiu maior amplitude de variação e convergência mais tardia. Por fim, o solo compactado apresentou o comportamento menos favorável, com os maiores valores máximos de k_{20}, as maiores amplitudes de variação e o maior volume de poros necessário para reaproximação dos valores iniciais.

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com aqueles reportados por Queiroz et al. (2025) para o mesmo solo estabilizado com licor negro kraft. Naquele trabalho, a adição de licor promoveu redução da condutividade hidráulica de até uma ordem de magnitude em relação ao solo compactado, sendo os menores valores médios de k_{20} observados nas misturas contendo 3% de licor e 5% de licor associado ao cimento CP II-F-32, cujos valores permaneceram praticamente constantes ao longo da percolação. Considerando a equivalência aproximada entre as dosagens utilizadas, sendo 100 mgNa e 200 mgNa aproximadamente equivalentes a 3% e 5% de licor, respectivamente, observa-se que o ranking de desempenho hidráulico entre os tratamentos foi mantido entre os dois estudos. Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que as diferenças nas condições de compactação não alteraram a hierarquia de desempenho das misturas: enquanto Queiroz et al. (2025) conduziram os ensaios na umidade ótima e com GC de 100%, o presente estudo adotou moldagem no ramo úmido e GC de 95%. Além disso, embora ambos os estudos tenham sido conduzidos por aproximadamente 300 dias, o menor grau de compactação empregado neste trabalho permitiu a percolação de volumes de poros substancialmente maiores do que os alcançados por Queiroz et al. (2025), que não ultrapassaram aproximadamente 7 vpp ao longo de todo o período experimental. Essa condição ampliou a faixa de avaliação da estabilidade hidráulica das misturas, permitindo acompanhar a evolução da condutividade hidráulica ao longo de intervalos mais extensos de percolação.

4 CONCLUSÃO

A estabilização combinada de licor negro kraft e cimento CP II-F-32 reduziu a condutividade hidráulica do solo e aumentou a estabilidade hidráulica das misturas ao longo prazo. As misturas solo-licor e solo-licor-cimento apresentaram menores valores de k_{20} e menores amplitudes de variação em comparação ao solo compactado. Entre as misturas avaliadas, a misturas com 200 mgNa e cimento CP II-F-32 apresentou o melhor desempenho hidráulico, com valores iniciais de k_{20} menores, picos discretos e rápida estabilização. A mistura com 100 mgNa apresentou comportamento semelhante, porém com estabilização ligeiramente tardia. O desempenho foi consistente com estudos anteriores para o mesmo solo, mesmo sob diferentes parâmetros de compactação e com maior volume de poros percolados ao longo de aproximadamente 300 dias de ensaio.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 12023. *Solo-cimento – Método de ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 7182. *Solos e rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 17086-10. *Cimento Portland – Análise química*: Parte 10: Determinação de óxido de cálcio livre por etilenoglicol. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025a). NBR 17212. *Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025b). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025c). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025d). NBR 7181. *Solos – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025e). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ASTM International (2002). ASTM D5856-95: *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter*.

Caneschi, F. P. (2012) *Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 136 f.

Chorom, M., Rengasamy, P. (1995) Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4):657-665.

Khodary SM, Negm AM, Tawfik A (2018) Geotechnical properties of the soils contaminated with oils, landfill leachate, and fertilizers. Arabian Journal of Geosciences. 11(2), 1-17.

Musso TB, Roehl KE, Pettinari G, Vallés JM (2010) Assessment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills. Applied Clay Science. 48(3), 438-445.

Queiroz, B. P. et al. (2025) Hydraulic conductivity of compressible clayey soil stabilized with kraft black liquor and composite cement. *Environmental Earth Sciences*, 84, 47.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/85

Efeitos da Cura no Comportamento Geomecânico de um Resíduo da Produção de Sal (Carago)

Thalita Costa Maurício de Souza
Engenheira Civil, Natal, Brasil, thalitacosta923@gmail.com

Romário Stéffano Amaro da Silva
Doutorando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, romario.amaro@coc.ufrj.br

Osvaldo de Freitas Neto
Professor, UFRN, Natal, Brasil, osvaldo.neto@ufrn.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior
Professor, UFRN, Natal, Brasil, olavo@ct.ufrn.br

Ricardo Nascimento Flores Severo
Professor, IFRN, Natal, Brasil, ricardo.severo@ifrn.edu.br

Afrânio Pereira de Oliveira Júnior
Engenheiro Civil, Natal, Brasil, a.j.mat@hotmail.com

RESUMO: Durante a produção de sal, é gerado um resíduo conhecido localmente como “carago”, composto por sulfato de cálcio di-hidratado, o qual pode ser empregado em obras geotécnicas. Para uma aplicação viável, é crucial entender o comportamento geotécnico do carago, especialmente em sua forma compactada e sob efeito de cura a seco. Realizou-se ensaios de ensaios de caracterização geotécnica básica, bem como ensaios de compactação do material em três níveis de energia. Também foram realizados ensaios de permeabilidade e ISC. O carago apresentou características de areia siltosa sem plasticidade. A partir dos parâmetros de compactação na energia normal, moldaram-se corpos de prova para testar a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral após períodos de cura de um, sete e 56 dias. O período de cura influenciou em um possível processo de cimentação do carago, dado que as resistências à compressão simples e à compressão diametral aumentaram consideravelmente entre os períodos de cura de sete e 56 dias. Nesse contexto, conclui-se que o carago tem potencial para obras de pavimentação, aplicado em subleito, reforço de subleito, sub-base e base com tráfego de veículos moderados, a depender da energia de compactação empregada.

PALAVRAS-CHAVE: carago, resíduo, tempo de cura, rodovias, obras de terra

ABSTRACT: Carago, a residual by-product made of dihydrated calcium sulphate, is generated during salt production. This waste material can be used in geotechnical projects. In order for such applications to become feasible, it is vital to understand the geotechnical behavior of carago, especially in its compacted form and subjected to a dry curing process. Geotechnical characterization laboratory tests were carried out, as well as three energy levels Proctor compaction tests. Constant head permeability and CBR tests were also performed. The material was characterized as no plastic silty sand. Based on Standard Proctor compaction tests results, specimens were prepared to perform unconfined compression tests and Brazilian tests after curing periods of one, seven, and 56 days. The curing period influenced a possible cementation process, given that the unconfined compression and diametral compression strengths increased considerably between the curing periods of seven and 56 days. Therefore, carago has potential for earthworks, applied in subgrade, subgrade reinforcement, subbase, and base for moderate traffic, depending on the compaction energy.

KEYWORDS: carago, waste material, curing period, roads, earthworks

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento de resíduos provenientes da indústria é uma tendência frente à necessidade da adoção de práticas cada vez mais ambientalmente sustentáveis. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei 12.305/2010) atesta que, em prol da adoção de condutas e condições que visem uma produção sustentável, deve-se objetivar a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos. Nesse âmbito, é de interesse dos geradores de resíduos explorar soluções sustentáveis, alternativas à disposição final. Uma das possibilidades mais vantajosas, inclusive financeiramente, é o aproveitamento do subproduto como material para outro fim.

Entretanto, de acordo com Mancini et al. (2021), uma alternativa comum para os resíduos sólidos industriais no Brasil ainda é a disposição final, que exige dispêndio de recursos naturais e financeiros, e ocasiona uma série de problemas associados. No contexto da possibilidade de aproveitamento de resíduos industriais, quando esses são inertes, destaca-se o seu uso em obras de terra. O volume de material necessário nesse tipo de obra é compatível com a ordem de grandeza dos volumes de resíduos gerados em diversas indústrias.

O litoral norte do estado do Rio Grande do Norte destaca-se como produtor industrial de sal marinho, responsável por cerca de 95% de todo o sal produzido no Brasil (Silva et al, 2023). Na indústria salineira, um subproduto residual composto por cálcio di-hidratado (CaSO4.2H2O), o carago, uma espécie de gipsita, formado na etapa de cristalização dos sais, é descartado na natureza sem nenhum tratamento adequado para minimizar os impactos ambientais. Batista et al. (2021) constataram que o carago apresentou características semelhantes à de uma areia siltosa sem plasticidade. No mesmo trabalho, conclui-se, a partir de ensaios de compactação, que o material apresentou potencial para aplicabilidade como subleito de rodovias.

O interesse pelo aproveitamento do carago cru se caracteriza em trabalhos anteriores, que estudaram o seu emprego como parte integrante na fabricação de materiais de construção civil (Gomes, 2012; Gomes Filho, 2019; Araújo, 2023). Entretanto, a avaliação do resíduo do sal como material para obras de terra ainda é um tema pouco explorado, tendo em vista a necessidade de uma caracterização distinta daquela realizada para o uso proposto nos trabalhos citados.

Ainda, o bom desempenho de um material como camada de pavimento rodoviário também é fortemente dependente da sua durabilidade. Lovato (2004) conceitua durabilidade como a capacidade de um material de manter a sua integridade estrutural frente a determinadas condições as quais é exposto. Um método para analisar a durabilidade de um material é avaliar as influências em suas características de solicitações impostas pelo ambiente ao qual ele se expõe. A imposição de períodos de cura é uma forma bastante empregada para simular os efeitos da exposição de um solo no campo. A cura em ambientes secos promove uma maior eficiência que a cura em condições úmidas e promove uma maior estabilidade ao longo do tempo (Latifi et al., 2017).

Com base nessas questões, este trabalho objetivou estudar o carago como material para camada de pavimento, a partir da sua caracterização por meio de ensaios geotécnicos de laboratório típicos de projetos rodoviários. Além disso, por meio de ensaios adicionais, avaliar a influência de períodos de cura na resistência mecânica do resíduo compactado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo utilizado neste trabalho foi coletado diretamente de uma planta de produção de sal, localizada no município de Grossos-RN. A localização do município está destacada na Figura 1. O material foi devidamente acondicionado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, até sua preparação para uso nos ensaios de laboratório. A preparação consistiu na realização de quarteamento e destorroamento, conforme o que preconiza a ABNT NBR 6457:2016 (Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).

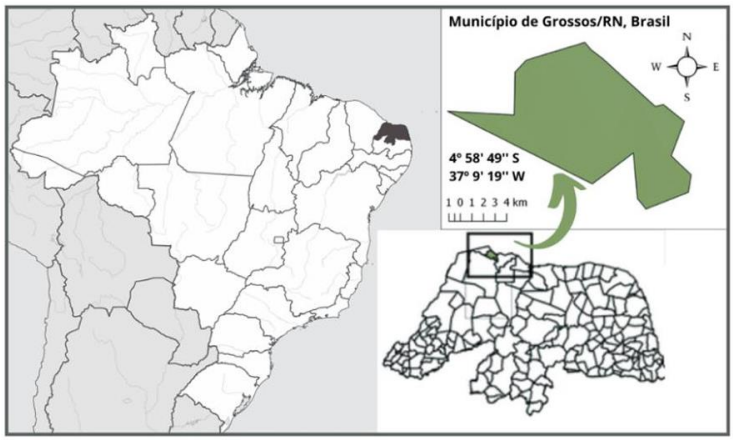


Figura 1. Localização geográfica do município de Grossos/RN (Batista et al., 2021)

2.2 Ensaios de caracterização geotécnica

Para execução dos ensaios de caracterização geotécnica do carago, a amostra foi seca ao sol por um período de 48h. A análise granulométrica do material seguiu as recomendações da ABNT NBR7181:2016 (Solo – Análise granulométrica), os limites de Atterberg foram determinados de acordo com as ABNT NBR 6459:2016 (Solos – Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180:2016 (Solo – Determinação do limite de plasticidade), e a massa específica dos sólidos foi medida conforme a norma DNER-ME 085/94 (Material finalmente pulverizado - determinação da massa específica real). As medidas de teor de umidade em estufa forma realizadas segundo as orientações descritas no trabalho de Batista et al. (2021), no qual destaca-se a importância de regular a estufa à 60 °C, para que o resíduo não perca água da sua microestrutura.

Foram realizados ensaios de compactação no cilindro Proctor, conforme as diretrizes descritas na ABNT NBR 7182:2020 (Solo – Ensaio de compactação). A compactação do carago foi feita para as três energias de compactação: Proctor Normal, Proctor Intermediária e Proctor Modificada, com reuso do material.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeâmetro de parede flexível, em célula triaxial mostrada na Figura 2a, conforme metodologia descrita por Gondim (2020). Os corpos de prova com 10,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro forma compactados estaticamente. Os parâmetros para a moldagem desses corpos de prova foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios de compactação Proctor. Foi realizado um ensaio para cada energia de compactação.

Realizou-se um ensaio de ISC para cada energia de compactação. Os procedimentos foram realizados conforme a ASTM-D 1883-2/ 2021 - Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soils, em prensa manual e com aquisição de dados por meio de relógio comparador e anel dinamométrico.

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados conforme as diretrizes da ABNT NBR 12025 (Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos- Método de ensaio), enquanto os ensaios de resistência à tração por compressão triaxial foram baseados na ABNT NBR 7222/2011 (Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos). Moldou-se corpos de prova com características semelhantes às dos usados nos ensaios de permeabilidade. Preparou-se um total de nove corpos de prova, subdivididos igualmente em três conjuntos, cada qual submetido a um período de cura distinto (um, sete e 56 dias). Durante os intervalos entre a moldagem e o ensaio, os corpos de prova permaneceram acondicionados no interior do laboratório e sem qualquer proteção, submetidos às mudanças de temperatura e de umidade do ambiente. Esse processo de cura não controlada foi proposital, com vistas a reproduzir parcialmente as condições pós-construtivas às quais uma camada de pavimento é submetida. As Figura 2b e Figura 2c ilustram a realização de ensaios de compressão simples e de compressão diametral, respectivamente. A medida de força e de deslocamento durante o ensaio foram feitas por meio de célula de carga e Linear Variable Displacement Transducer (LVDT), respectivamente, associados a um sistema de aquisição automática de dados.

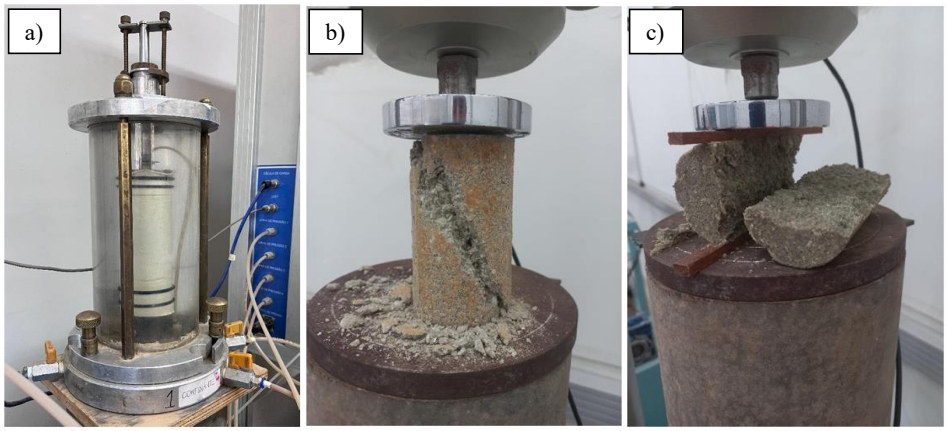
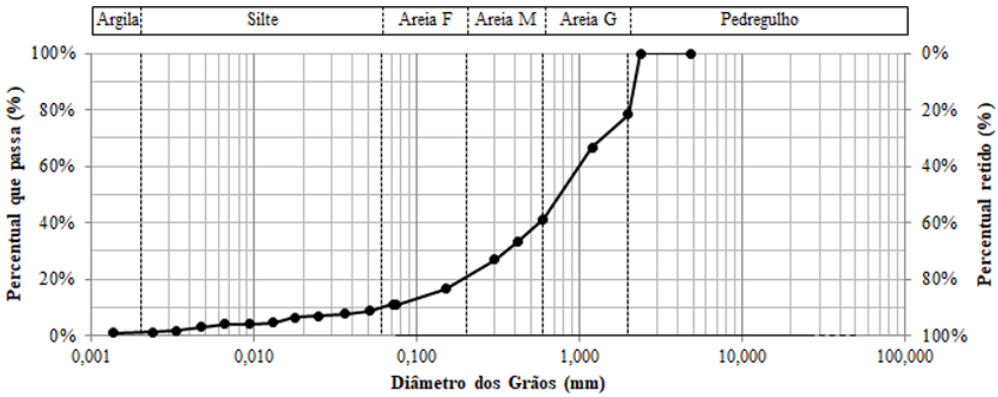


Figura 2. (a) Permeâmetro de parede flexível (b) compressão simples e (c) compressão diametral

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Carcterização geotécnica

A partir da tentativa de determinação dos limites de Atterberg, foi possível constatar que o carago é um material não plástico. A massa específica dos sólidos do resíduo é igual a 2,31 g/cm³, valor que condiz com a gipsita ($CaSO4 \cdot 2H2O$), para a qual espera-se massa específica de 2,31 a 2,32 g/cm³. A curva granulométrica do carago é apresentada na Figura 3, a qual mostra que o resíduo destorroado é composto principalmente por uma fração arenosa.



Pedregulho (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)
21,60	37,10	21,30	10,40	8,70	1,00	0,10	0,40	1,00

Figura 3. Curva granulométrica do carago.

A Tabela 1 resume a caracterização geotécnica do carago. Os valores de CNU e CC enquadram o material como bem graduado. Pelo Sistema de Classificação Rodoviário (HBR – AASHTO), o material se enquadra como A-2-4, equivalente a uma areia siltosa, o que indica uma expectativa de comportamento considerado satisfatório em obras rodoviárias.

Tabela 1. Características geotécnicas básicas do carago.

D_{10}(mm)	0,06
D_{30}(mm)	0,36
D_{60}(mm)	1,00
Coeficiente de não Uniformidade (CNU)	16,7
Coeficiente de Curvatura (CC)	2,2
Classificação SUCS	SW - SM
Classificação HRB	A – 2 - 4
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,30

3.2 Compactação, ISC e permeabilidade

Os ensaios de compactação foram feitos com reuso do carago e nas três energias de compactação: Proctor Normal, Proctor Intermediário e Proctor Modificada. As curvas de compactação resultantes estão apresentadas na Figura 4.

Foi possível observar que o resíduo apresentou o comportamento que se espera de um solo convencional, visto que o aumento da energia de compactação ocasionou uma maior massa específica seca máxima e uma menor umidade ótima. Isso é um indicativo preliminar de que o resíduo se adequa bem à tecnologia de compactação empregada em obras de terra. Porém, apenas pelas curvas de compactação não é possível definir se a possível quebra de grãos durante a aplicação dos golpes do soquete afeta a eficiência e o resultado do processo, o que é um aspecto relevante, a ser avaliado em trabalhos posteriores.

Observou-se que o carago cru apresentou valores crescentes de CBR, conforme o aumento da energia de compactação. É importante destacar que em nenhuma das situações o material apresentou expansão, após 96 horas de inundação. Na energia Proctor Normal, o valor de CBR = 12,9 % indica um material que pode ser aplicado na execução de um subleito ou reforço de subleito, de acordo com a faixa estabelecida pela DNER-ME 667/81, no qual determina CBR ≥ 2% e expansão ≤ 2%. O resíduo compactado na energia Proctor Intermediário se apresenta como um material adequado para sub-base, pois o CBR = 32,45 % está dentro do estabelecido, CBR ≥ 20% e expansão ≤ 1%. A compactação na energia Proctor Modificado, com CBR = 78,9%, aponta para um material que pode ser utilizado como base de uma via de uma via com tráfego moderado, para a qual se requer CBR ≥ 60%.

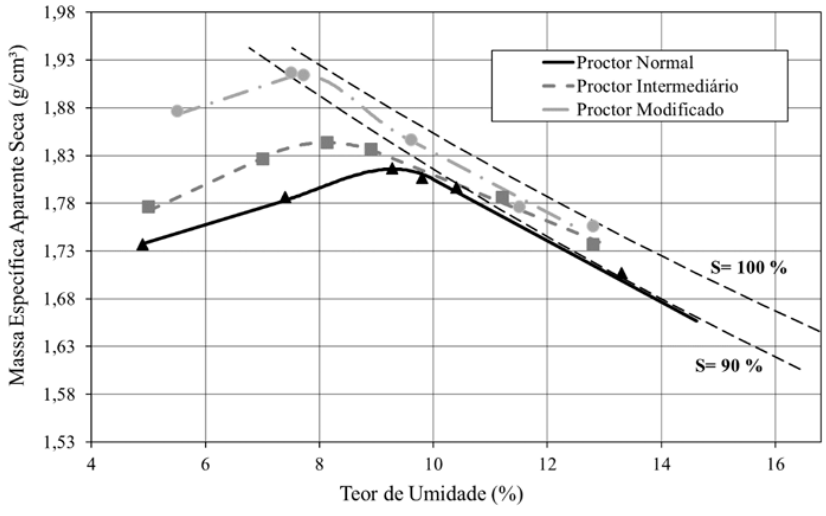


Figura 4. Curvas de compactação

A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, ISC e Permeabilidade para as energias Proctor Normal (PN), Proctor Intermediário (PI) e Proctor Modificado (PM).

Tabela 2. Influência da energia de compactação.

Energia	Massa específica seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)	Índice de vazios	ISC (%)	Variação de volume (%)	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
PN	1,81	9,9	0,28	12,9	2,20	$1{,}18\times 10^{-6}$
PI	1,85	8,2	0,25	32,4	0,16	$1{,}10\times 10^{-6}$
PM	1,92	7,7	0,20	78,9	0,02	$7{,}87\times 10^{-7}$

A tendência de diminuição da variação de volume do material durante a inundação, conforme o aumento da energia de compactação empregada, guarda relação com a porosidade do material resultante. Na energia Proctor Normal, o resíduo formou um material mais poroso, o qual tendeu a uma maior redução de volume. Nas maiores energias, em função do material resultante ser menos poroso, a redução de volume durante a inundação é percentualmente menor. Juntamente aos resultados destacados, na Tabela 2, é possível observar que houve uma diminuição no coeficiente de permeabilidade para a amostra referente à energia Proctor Modificada, quando em comparação com a amostra referente à energia Proctor Normal. Essa redução se dá pela redução da porosidade da amostra, em função da maior energia de compactação.

3.3 Resistência à compressão simples e diametral

A Tabela 3 apresenta as resistências à compressão simples e tração por compressão diametral dos corpos de prova moldados na energia Proctor Normal, com diferentes tempos de cura.

A partir da média aritmética dos resultados, o carago possui resistência à compressão simples de 25,13 kPa, 35,88 kPa e 141,27 kPa, para os tempos de cura um dia, sete dias e 56 dias, respectivamente. Tomando a resistência de um dia como referência, o percentual de aumento da resistência à compressão simples foi de 42,78% para sete dias e 462,16% para 56 dias. A partir da proximidade entre os valores de teor de umidade dos corpos de prova pós-ensaio, pode-se supor que o acréscimo de resistência à compressão simples ao longo do tempo não é exclusivamente dependente da sucção, a qual tende a aumentar conforme a diminuição do teor de umidade do corpo de prova. Tendo em vista os elevados valores de óxido de cálcio típicos desse tipo de material, pode-se esperar uma significativa cimentação no corpo de prova. O aumento da resistência mecânica desse material fica possivelmente condicionada ao tempo de cura seca, uma vez que o resíduo tem o tempo específico para formar ligações cimentícias, além do aumento da sucção devido a secagem do corpo de prova.

Tabela 3. Resistência à compressão simples do carago.

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistência à compressão simples (kPa)	Massa específica (g/cm³)	Grau de saturação (%)	Resistência à tração (kPa)	Massa específica (g/cm³)	Grau de saturação (%)
CP1	1	26,98	1,86	48	1,28	2,00	51
CP2	1	24,59	1,99	64	1,71	2,05	49
CP3	1	23,81	1,98	64	1,59	2,03	53
CP4	7	37,24	1,98	77	3,33	1,96	59
CP5	7	32,84	1,96	72	3,09	1,95	48
CP6	7	37,55	1,99	73	3,24	1,97	62
CP7	56	133,55	1,98	33	13,99	1,96	24
CP8	56	145,30	1,97	33	13,89	1,98	34
CP9	56	144,95	1,96	32	13,53	1,99	34

Analogamente à compressão simples, o resíduo apresentou as médias de 1,53 kPa, 3,22 kPa e 13,79 de resistência à tração, para os períodos de cura de um dia, sete e 56 dias. Também ao tomar a resistência de um dia como referência, foi obtido o percentual de acréscimo de resistência de 110,00 % para a cura de sete dias, e 801,32 % para a cura de 56 dias. A resistência a tração obteve um acréscimo significativo para o período de cura de 56 dias. Sabe-se que a magnitude da resistência a compressão axial de um material tende a ser maior do que a sua magnitude da sua resistência a tração por compressão diametral. Porém, os acréscimos de

resistência para os corpos de prova submetidos à tração foram percentualmente maiores do que os observados para o caso da resistência à compressão simples. Isso pode indicar uma maior relevância das ligações cimentícias e da sucção na resistência à tração do material.

É importante ressaltar que ao menos parte do acréscimo de resistência mecânica observado conforme a passagem do tempo se deve à presença de ligações cimentícias e de sucção, as quais podem ser degradadas em função das condições ambientais e de operação as quais o material será exposto no campo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, estudou-se o comportamento geomecânico do Carago, a partir de ensaios de laboratório, com foco no emprego desse resíduo em obras rodoviárias. Além disso, analisou-se o efeito do tempo de cura na resistência mecânica do material. A partir dos resultados, podese chegar às seguintes conclusões:

- O material destorroado manualmente possui granulometria semelhante a de uma areia siltosa não plástica;
- Observou-se que, com o aumento da energia de compactação, o material apresentou maior valor de CBR. O carago possui potencial para pavimentação, podendo ser aplicado no subleito, reforço de subleito, sub-base e base com tráfego de veículos moderados, a depender da energia de compactação aplicada.
- Os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples com um tempo de cura seca de sete dias tiveram acréscimo de 42,78% na sua resistência à compressão simples. Para uma cura seca de 56 dias, a resistência à compressão simples aumentou 462,16%.
- No ensaio de compressão diametral, os períodos de cura dos corpos de prova ocasionaram um aumento mais significativo na resistência à tração, quando comparados ao acréscimo de resistência à compressão simples. Foi constatado o acréscimo de resistência à tração de 110,00 % para a cura seca de sete dias, e 801,32 % para a cura seca de 56 dias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials. ASTM-D 1883-2 - *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soils*. U.S., 2021.

Araújo, T. M. *Estudo da potencialidade do CBR na produção de tijolos maciços estabilizados com cimento Portland e teores de carago, cal hidratada e metacaulim*. 2023. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6457 – *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12025: *Solocimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT ,1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, ABNT,2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12025: *Solocimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT ,1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7182: *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.

Batista, S. D., Freitas Neto, O., Souza, T. C. M., Santos, G. C., Santos, V. S. Caracterização Geotécnica de um Resíduo da Produção de Sal. In: *Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN*, 34., 2021, Natal. Anais eletrônicos [...] Rio Grande do Norte. Disponível em: https://cic.propesq.ufrn.br/trabalhos.php. Acesso em: 22 de out. de 2023.

Baltar, C. A. M.; Bastos, F. F.; Luz, A. B. Gipsita. IN: *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 505-526.

Barreto, E. M. R. *Caracterização geotécnica de um resíduo da produção de sal (carago)*. 2022. 23f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

Brasil (2010). *Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010*. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 085/94: *Solos – Determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, DNER,1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 667/81: *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro, DNER,1981.

Gondim, T. F. *Aplicação geotécnica de resíduo de mineração em sistemas de cobertura final de aterros sanitários*. 2020. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

Gomes, M. F. *Optimization of time and temperature in the processing of the gypsum from of the crystallizers of the salt production for use plaster in civil construction*. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

Gomes Filho, T. S. *Incorporação de gesso alfa, oriundo de resíduos da indústria salineira, e de gesso beta reciclado em pastas para revestimento de construção civil*. 2019. 325f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Latifi, N.; Horpibulsuk, S.; Meehan, C. L.; Abd Majid, M. Z.; Tahir, M. M.; Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer-an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2), pp. 04016204.

Lovato, R. S. *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação*. 2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2004.

Mancini, S. D., Medeiros, G. A., Paes, M. X., Oliveira, B. O. S., Antunes, M. L. P., Souza, R. G., Oliveira, J. A. P. Circular economy and solid waste management: challenges and opportunities in Brazil. *Circular Economy and Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 261-282, 2021.

Silva, S. L. P., Costa, W. P. L., Nascimento, I. C. S. A indústria salineira do Rio Grande do Norte: análise de fatores para o desenvolvimento. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 12, n. 2, p. 292-323, 2023.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/86

Eficiência de uma barreira de proteção de solo compactado sob lagoa de lixiviado

Arthur Fernandes Gonçalves
Aluno de doutorado, Doutorado em Engenharia Ambiental – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, arthurfernandes@gmail.com

Priscila Zidan
Fundadora, Evolui, Rio de Janeiro, Brasil, priscilazidan@evolui.eco.br

Daniel Lourenço dos Santos
Aluno de Iniciação Científica (CNPq), Departamento de Química e Ambiental – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, lourencodaniel.backup@gmail.com

Halexia Marques Cotegipe de Almeida
Bolsista PROATEC/UERJ, Laboratório de Engenharia Sanitária – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, aluna.halexiacmarques@gmail.com

Elisabeth Ritter
Professora Titular, Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, ritter@eng.uerj.br

RESUMO: O presente trabalho avalia a eficiência de um liner de solo compactado, instalado sob uma lagoa de lixiviado, na contenção do transporte do íon amônio. Para a obtenção dos parâmetros de transporte, realizaram-se ensaios de sorção em batelada com o solo e o lixiviado provenientes da mesma área de estudo. O ensaio de difusão foi conduzido ao longo de 4 dias em uma célula de acrílico (10 cm de diâmetro), constituída por uma camada de 6 cm de solo compactado subjacente a um reservatório de 5 cm de lixiviado. O sistema foi mantido em ambiente termostatizado a 23 ºC, com coletas diárias no reservatório. Ao término do ensaio, o corpo de prova foi seccionado e cada fatia de solo foi submetida à extração dos íons em água destilada sob agitação por 24 h (proporção 1:10 m/m). A partir dos parâmetros calibrados, simulou-se o transporte em escala real para uma lagoa impermeabilizada com geomembrana de PEAD (2 mm) operando com uma densidade média de 2,5 furos/ha. A modelagem constatou um elevado potencial de contaminação das águas subterrâneas, com as concentrações na base do liner ultrapassando o limite normativo de 20 mg/L após 20 anos de operação. Os resultados indicam que um liner de argila compactada abaixo da geomembrane pode não ser suficiente para garantir proteção das águas subterrâneas em cenário realista de furos na geomembrana.

PALAVRAS-CHAVE: liner argila compactada, aterro sanitário, transporte de contaminantes, adsorção, modelagem, difusão

ABSTRACT: This study evaluates the efficiency of a compacted soil liner installed beneath a leachate pond in controlling ammonium ion transport. Transport parameters were obtained through batch sorption tests using soil and leachate collected from the same study area. The diffusion test was conducted over four days in an acrylic cell (10 cm in diameter), consisting of a 6 cm thick compacted soil layer underlying a 5 cm leachate reservoir. The system was maintained in a temperature-controlled environment at 23 °C, with daily sampling from the reservoir. At the end of the test, the specimen was sectioned, and each soil slice was subjected to ion extraction in distilled water under agitation for 24 h (1:10 soil-to-solution mass ratio). Using the calibrated parameters, full-scale transport was simulated for a pond lined with a 2 mm HDPE geomembrane operating with an average defect density of 2.5 holes per hectare. The modeling results indicated a high potential for groundwater contamination, with concentrations at the base of the liner exceeding the regulatory limit of 20

mg/L after 20 years of operation. The results indicate that compacted soil liners alone may not be sufficient to ensure long-term protection of groundwater under realistic geomembrane defect scenarios.

KEYWORDS: compacted clay liner, landfill, contaminant transport, adsorption, modelling, diffusion

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos está diretamente associada às atividades humanas. Idealmente, após esgotadas todas as possibilidades de reutilização e reaproveitamento, os rejeitos devem ser destinados à disposição final adequada. A infraestrutura que atende aos requisitos de disposição final é o aterro sanitário, uma obra de engenharia que integra sistemas de impermeabilização da base, coleta e aproveitamento ou queima de biogás, drenagem e tratamento de lixiviado, além de monitoramento ambiental e geotécnico (ABREMA, 2024). A percolação da água da chuva pela massa de resíduos, associada à degradação da fração orgânica, resulta na formação do lixiviado (CHRISTENSEN et al., 2001; TENG et al., 2021). Este líquido possui elevadas concentrações de contaminantes, representando um significativo risco ambiental.

Para o gerenciamento do lixiviado, são utilizadas lagoas, que desempenham funções essenciais, como armazenamento, regulação de vazão e estabilização pré-tratamento. A fim de garantir a estanqueidade dessas lagoas, é comum a adoção de uma estrutura composta por uma camada de argila compactada e uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) acima do solo.

Embora sejam projetadas para alta eficiência, furos em geomembranas são considerados inevitáveis (PEGGS, 2009). Essas perfurações podem ser provocadas por falhas na soldagem, danos mecânicos por equipamentos, pressão e corrosão (WAN et al., 2023). Em geomembranas instaladas sob rigoroso controle de qualidade, a média de furos é estimada entre 1 e 5 furos por hectare (GIROUD, 2016; TOUZE-FOLTZ; GIROUD, 2005). No caso de lagoas de armazenamento, reporta-se ampla variabilidade na densidade de defeitos em geomembranas, com projetos apresentando valores que variam de 0 a 689 vazamentos/ha (ZIDAN et al., 2024).

Portanto, é fundamental avaliar a capacidade de retenção de contaminantes dos liners compactados em cenários realistas de falha de geomembrana. Esse trabalho teve como objetivo analisar a capacidade de um solo utilizado como liner para conter o contaminante nitrogênio amoniacal em caso de furos em geomembrana de lagoa de armazenamento de lixiviados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaio de sorção

Foi coletado lixiviado bruto e solo usado como camada de argila compactada de um aterro localizado no estado do Rio de Janeiro, o solo foi seco ao ar e peneirado em peneira de 2 mm. O ensaio de sorção foi realizado de acordo com a norma USEPA EPA 530 SW87006-F (ROY, 1992). Foram testadas diferentes proporções solo:lixiviado (1:4, 1:5, 1:10, 1:20 e 1:50), com as amostras mantidas sob agitação a 120 rpm por 24 horas. O ensaio foi realizado em triplicata com um branco somente com lixiviado. Após o ensaio, todas as amostras foram centrifugadas por 30 minutos a 2500 rpm. O sobrenadante foi removido e filtrado em papel de filtro para remoção de solo em excesso e em seguida em membrana de 0,45 µm.

O material filtrado foi analisado quanto às suas características físico-químicas de acordo com o Standard Methods (RICE et al., 2012). Os parâmetros e respectivas metodologias estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Metodologias de determinação de características do lixiviado.

Parâmetro	Norma
pH	4500 – H+ B
Condutividade elétrica	2510 B
Cloreto	4500 – Cl
DQO	5520 – COD
Nitrogênio amoniacal	4500 – NH3 D

Na etapa seguinte, foi determinado o tempo de equilíbrio, mantendo a proporção selecionada constante. Os tempos foram de 1 h, 24 h, 48 h e 72 h. Ao término do ensaio, os mesmos parâmetros analisados anteriormente foram determinados.

O ensaio definitivo foi realizado com a proporção de 1:5 de solo:solução por 24h. Foi mantida a massa constante, sendo variada diluição do lixiviado 25%, 35%, 50%, 75%, 90% e 100%. Ao fim do mesmo, as isotermas linear, de Langmuir e de Freundlich foram determinadas pelo método Levenberg-Marquardt (GONÇALVES; RITTER, 2023; BELTRAN; PIGNATELLO; TEIXIDO, 2016) pelo software Origin 2018 (ORIGINLAB, 2018).

2.2 Ensaio de difusão

O ensaio de difusão seguiu o procedimento similar ao realizado por Valadão (2008) e Ritter (1998). Em resumo, foram utilizadas células de acrílico do tipo Ontario Western, com 12,8 cm de altura e 10 cm de diâmetro, equipadas com um reservatório para a introdução do lixiviado.

O solo foi compactado 2% acima do teor de umidade ótima (ramo úmido), em 3 camadas, com 26 golpes em cada uma delas. Em seguida, a célula permaneceu por 4 dias mergulhada em água destilada para incrementar a saturação. A massa do conjunto foi determinada. Com o volume da célula e a massa de solo, e a densidade real dos grãos determinada, foi calculado o grau de saturação. Em caso de esse valor ser maior que 90%, o solo foi considerado como saturado.

As células foram montadas em duplicata (C1 e C2). Foi colocado no topo um reservatório com lixiviado, 300 mL formando 5 cm. Durante o ensaio, foram removidas alíquotas de 30 mL desse reservatório e medidos os parâmetros físico-químicos iniciais e diários.

As células foram mantidas em incubadora a 25 °C. Para o solo, após 4 dias, os testes de difusão foram concluídos. O solo foi fatiado em camadas de 1-1,5 cm para análise, e as concentrações de íons amônio medidas tanto no reservatório quanto no solo.

Os contaminantes no solo foram lixiviados de acordo com Leite (2001). Alíquotas de 15g de massa seca de solo em 150 mL de água destilada (1:10 m/m) em agitação durante 24h a 120 rpm. Após esse período, a amostra foi centrifugada e filtrada antes da medição. As concentrações obtidas foram submetidas a cálculo de balanço de massa como feito por Valadão (2008) para determinar a concentração no líquido intersticial do solo.

A partir dos perfis de concentração experimentais, o software POLLUTE foi utilizado para a estimativa do coeficiente de difusão efetivo (D_e). A seleção do melhor ajuste do modelo ocorreu em duas etapas: uma análise visual preliminar das curvas, seguida da minimização do erro estatístico por meio do cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), conforme apresentado na Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(C_{exp,i} - C_{mod,i}\right)} \quad (1)$$

Onde C_{exp} é a concentração experimental (mg/L) e C_{mod} é a concentração modelada (mg/L).

2.3 Simulação para caso em aterros sanitário

A partir dos parâmetros obtidos experimentalmente, procedeu-se a uma simulação preditiva adotando o coeficiente de difusão efetivo médio. O cenário modelado representou uma lagoa de lixiviado cujo sistema de impermeabilização de fundo operaria com uma densidade média de defeitos na geomembrana de 2,5 furos/ha. Os parâmetros utilizados nesta simulação encontram-se sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na simulação.

Parte do aterro	Parâmetro	Valor
Lixiviado	Concentração no lixiviado constante (mg/L)	1.000
	Altura do lixiviado (m)	2,5
	Altura relativa ao topo do aquífero (m)	0

Geomembrana	Espessura (mm)	2
	Coeficiente de difusão (m²/ano)	3×10^{-5}
	Método de cálculo de vazamento	Giroud e Bonaparte (1989)
	Formato dos furos	Redondos
	Frequencia de furos (furos/ha)	2,5
	Area do furo (cm²)	0,1
Liner	Espessura (m)	0,9
	Densidade (g/cm³)	1,9
	Condutividade hidráulica (cm/s)	3×10^{-7}
	Coeficiente de difusão (m²/ano)	0,0575
	K_d (mL/g)	$4,4 \times 10^{-4}$
	Porosidade	0,344
Aquífero	Espessura (m)	3
	Porosidade	0,3
	Velocidade de escoamento (m/a)	10

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2 Ensaio de sorção

A Tabela 3 detalha as médias das características físico-químicas do lixiviado bruto.

Tabela 3. Características fisico-químicas do lixiviado (n=3).

Parâmetro	Resultado
pH	8,32 ± 0,02
Condutividade elétrica (mS/cm)	118,43 ± 1,57
Cloreto (mg/L)	2.412,07 ± 69,92
DQO (mg/L)	4.542,76 ± 309,56
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	984,38 ± 4,18

Foi determinado que a melhor proporção para a execução do ensaio foi de 1:5, pois permite melhor trabalhabilidade do solo e atinge valor de sorção próximo a 10% (9,52%). A variação na remoção foi inferior a 5% entre 24 e 48 horas. Diante disso, o tempo de equilíbrio de 24 horas se mostrou mais adequado, prevenindo a perda de amônia e otimizando a sorção. Foi então realizado o ensaio definitivo de adsorção em bateladas, sendo apresentado na Figura 1 e seus respectivos valores dos coeficientes apresentados na Tabela 4.

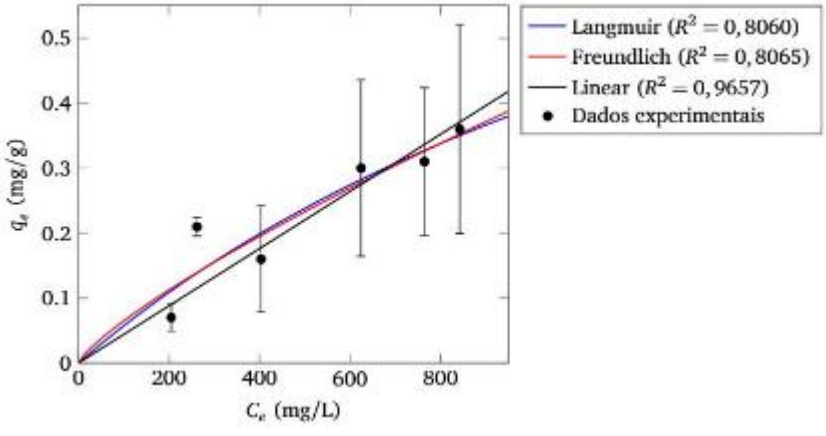


Figura 1. Isotermas de sorção do íon amônio ao solo de liner de aterro sanitário (n=3).

Tabela 4. Parâmetros ajustados dos modelos de sorção linear, Langmuir e Freundlich.

Modelo	Parâmetro	Valor	Erro
Linear	K_d (mL/g)	$4{,}4 \times 10^{-4}$	$3{,}37 \times 10^{-5}$
Langmuir	q_m (mg/g)	1,13	1,07
	K_L (L/mg)	$5{,}34 \times 10^{-4}$	$6{,}86 \times 10^{-4}$
Freundlich	K_F(mg/g)(L/mg)$^{1/n}$	$1{,}68 \times 10^{-3}$	$2{,}27 \times 10^{-3}$
	n	1,26	0,34

O ajuste ao modelo de Langmuir indicou uma capacidade máxima de adsorção de 1,13 mg/g, com o fator de separação (R_L) entre 0,001 e 0,004 apontando para leve favorabilidade da sorção (Pal e Rai, 2009). No entanto, quando confrontado com outros solos fluminenses, o material apresentou um potencial adsortivo mais restrito. Trabalhos correlatos, como os de Silva (2013) e Melgaço (2018), reportaram capacidades superiores, da ordem de 2,5 mg/g e 1,9 mg/g, respectivamente. Essa comparação reforça a classificação do solo estudado como um material de limitada capacidade de retenção para o nitrogênio amoniacal.

3.2 Ensaio de difusão

Durante o experimento, observou-se o efetivo transporte do contaminante em direção ao solo. Tal dinâmica está demonstrada na Figura 2, que apresenta o monitoramento da concentração do íon amônio no reservatório superior da célula ao longo do ensaio.

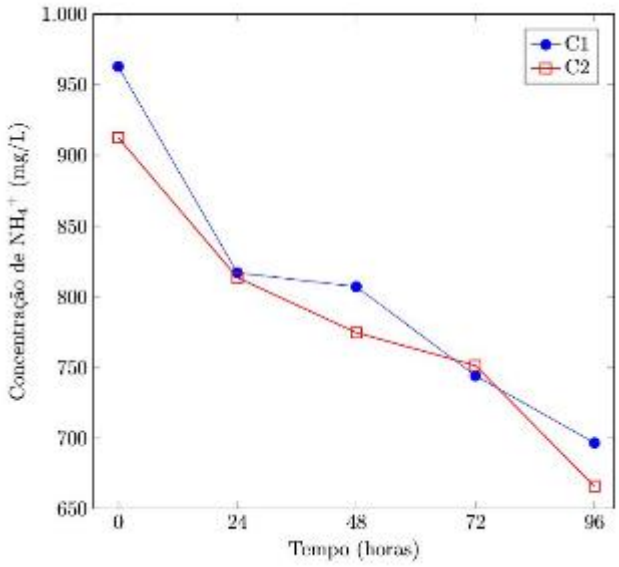


Figura 2. Concentração de amônio (NH_4^+) no lixiviado do reservatório da célula durante ensaio de difusão.

O ajuste dos dados experimentais foi realizado por meio do software POLLUTE (GAEA, 2020). Após uma inspeção visual preliminar, selecionaram-se três coeficientes de difusão que apresentavam melhor aderência gráfica aos dados, procedendo-se, então, ao cálculo da RMSE para cada cenário. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros ajustados dos modelos de sorção linear, Langmuir e Freundlich.

Coluna	D_e (m²/ano)	RME (mg/L)	R^2
C1	0,055	60,92	0,9373
C1	0,06	60,29	0,9386
C1	0,065	60,91	0,9373
C2	0,05	50,91	0,9524
C2	0,055	50,7	0,9528

C2	0,06	50,97	0,9504

Com base nos dados apresentados, adotaram-se os coeficientes de 0,060 m²/ano para a primeira coluna (C1) e 0,055 m²/ano para a segunda (C2), visto que tais valores apresentaram o menor RMSE e o maior coeficiente de determinação (R2). Os coeficientes de difusão encontrados revelaram-se superiores aos reportados por Ritter (1998) em ensaio com solo reconstituído do Aterro de Gramacho. A Figura 3 apresenta a sobreposição dos dados experimentais às curvas teóricas obtidas pelo modelo.

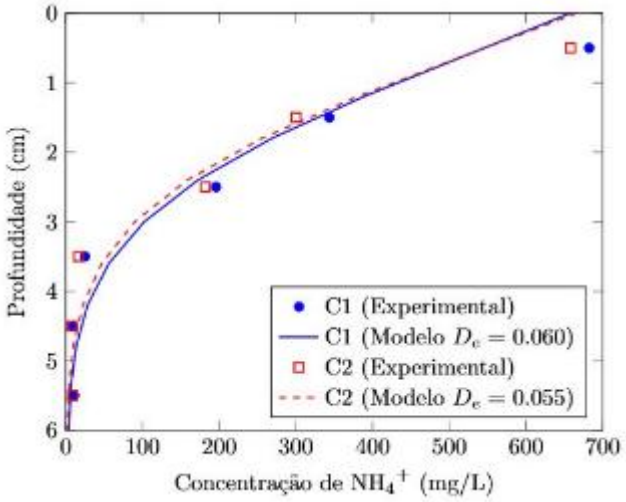


Figura 3. Perfil de concentração de amônio (NH_4^+) nas células de solo: compararação entre dados experimentais e ajuste do modelo do software POLLUTE.

3.3 Simulação para caso em aterros sanitário

As simulações foram realizadas e os dados apresentados na Figura 4.

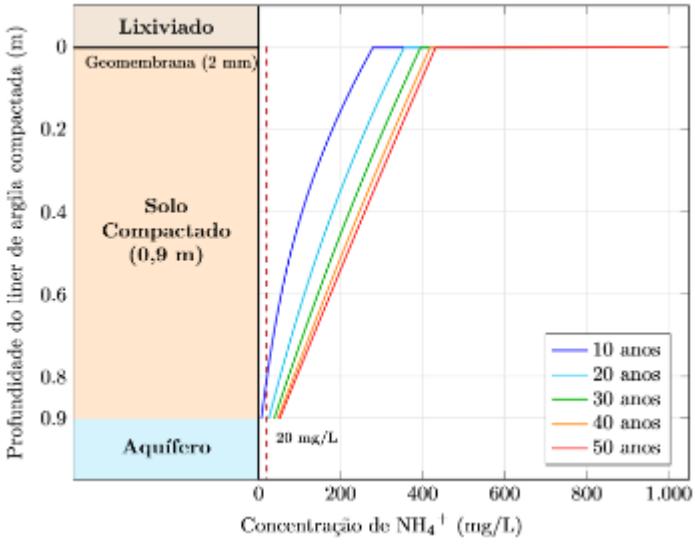


Figura 4. Migração do íon amônio (NH4+) através da barreira de fundo da lagoa de lixiviado (geomembrana + liner argila) em longo prazo.

Os resultados das simulações indicam que, após 20 anos de operação, a concentração de amônio na base da camada de solo compactado (0,9 m) atinge 25,1 mg L^{-1}, excedendo o limite de 20 mg L^{-1} estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Esse resultado demonstra que a presença de descontinuidades na

geomembrana compromete a eficiência hidráulica do sistema de barreira e pode levar à perda de integridade ambiental do aterro ao longo do tempo.

Destaca-se que, no presente estudo, foi adotada uma densidade de defeitos inferior aos valores reportados na literatura, como abordagem conservadora. Estudos recentes relatam médias de 14 vazamentos/ha^{-1} (ZIDAN et al., 2024) e valores de até 600 defeitos/ha^{-1} (LAKE;ROWE, 2005), evidenciando que, em condições reais de instalação e operação da geomembrana, o potencial de migração de contaminantes pode ser superior ao estimado nas simulações aqui apresentadas.

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que o solo avaliado apresenta melhor ajuste ao modelo de isoterma linear, além de um potencial de sorção favorável, embora de magnitude limitada. A partir dos ensaios em coluna, determinou-se que o coeficiente de difusão efetivo do contaminante situa-se entre 0,055 e 0,060 m²/ano. As simulações de longo prazo revelaram que o emprego de geomembrana simples, solução amplamente adotada nos aterros sanitários brasileiros, não possui capacidade suficiente para reter a migração do amônio, havendo potencial de contaminação do aquífero após 20 anos de operação. Portanto, para resguardar o meio ambiente, é imprescindível a execução de um rigoroso Controle de Qualidade de Instalação e a realização de inspeções periódicas para detecção de furos e posterior reparo. Ademais, em áreas ambientalmente sensíveis, recomenda-se a adoção de sistemas de impermeabilização mais robustos e resilientes a falhas, como o uso de geomembrana dupla com sistema intermediário de drenagem para a detecção de vazamentos da primeira camada.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Apoio Técnico às Atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão (PROATEC/UERJ) pelo suporte financeiro indispensável à realização desta pesquisa. Estendemos o reconhecimento ao Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS/UERJ) pela infraestrutura disponibilizada e a todos os seus colaboradores pelo apoio técnico prestado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2024) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 13 jan. 2025.

Beltran, J.L., Pignatello, J.J., Teixidó, M. (2016) ISOT_Calc: A versatile tool for parameter estimation in sorption isotherms. Computers & Geosciences, 94, p. 11–17.

Christensen, T.H. et al. (2001) Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry, 16 (7–8), p. 659–718.

GAEA Technologies Ltd. (2020). POLLUTE (Version 8). Software de computador. www.gaeatech.com.

Giroud, J.P. (2016) Leakage control using geomembrane liners. Soils and Rocks, 39 (3), p. 213–235.

Gonçalves, A.F., Ritter, E. (2023) Modelagem da difusão de íons monovalentes reativos no solo do Aterro Metropolitano de Gramacho, RJ. In: X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023), Salvador. Anais...

Lake, C. B., & Rowe, R. K. (2005). The 14-year performance of a compacted clay liner used as part of a composite liner system for a leachate lagoon. Geotechnical and Geological Engineering, 23, 657–678. https://doi.org/10.1007/s10706-004-8815-8.

Melgaço, S. (2018) Estudos de sorção utilizando lixiviado e monossoluções de nitrogênio amoniacal e bisfenol A em GCL e solo. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

OriginLab (2018) OriginPro, Version 2018. Northampton, MA, USA.

Pal, R., Tewari, S., Rai, J.P.N. (2009) Metals sorption from aqueous solutions by Kluyveromyces marxianus: Process optimization, equilibrium modeling and chemical characterization. Biotechnology Journal, 4, p. 1471–1478. DOI: 10.1002/biot.200900051.

Peggs, I.D. (2009) Geomembrane liner action leakage rates: What is practical and what is not? Land and Water, p. 47.

Rice, E.W. et al. (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC: American Public Health Association.

Ritter, E. (1998) Efeito da salinidade na difusão e sorção de alguns íons inorgânicos em um solo argiloso saturado. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Roy, W.R. (1992) Technical Resource Document: Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Silva, Q.S. (2013) Estudo da contaminação e da toxicidade do solo do Aterro Metropolitano de Gramacho, Duque de Caxias - RJ. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Teng, C. et al. (2021) Characterization and treatment of landfill leachate: A review. Water Research, 203, 117525.

Touze-Foltz, N., Giroud, J.P. (2005) Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane. Geosynthetics International, 12 (4), p. 205–207.

Valadão, I.C.R.P. (2008) Simulação computacional e experimental da influência da geomembrana na difusão de íons inorgânicos no solo do aterro sanitário de Rio das Ostras – RJ. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ.

Wan, Y. et al. (2023) Geomembrane leaks detection and leakage correlation factor analysis of composite liner systems for fifty-five (55) solid waste landfills in China. Environmental Technology & Innovation, 32, 103308.

Zidan, P., Kemnitz, M., Ritter, E. (2024). Locating leaks in geomembrane-lined ponds using the electrical leak location method: Case histories. Geotextiles and Geomembranes, 52(4), 773-777. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.04.003

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/87

Estabilidade de Aterro Sanitário com RSU em Diferentes Idades por Método Determinístico e Probabilístico

Fernanda Camarota Barbeitos
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, nandacb.jes@gmail.com

Jonathan do Amaral Braz
Discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em aterros sanitários representa um aspecto essencial tanto na etapa de implantação quanto durante a operação dessas estruturas, de modo que está diretamente relacionada à segurança e confiabilidade do empreendimento. De modo geral, resíduos sólidos apresentam composição gravimétrica heterogênea, o que acarreta variações em seus parâmetros de resistência, influenciando na análise de estabilidade. Ademais, a degradação dos resíduos ao longo dos anos de disposição também atua diretamente na variação desses parâmetros. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar análises de estabilidade para um talude de aterro sanitário com resíduos de diferentes idades, a fim de verificar a influência do tempo de disposição e da variabilidade do material aterrado na estabilidade do aterro. Para isso, são utilizados dados da literatura referentes aos parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos, os quais são aplicados na análise de estabilidade de taludes determinística e probabilística, por meio do Método de Monte Carlo, que consiste na geração de amostras aleatórias dos parâmetros de resistência, implementado em algoritmo em Python. Os resultados demonstram que ambas as análises indicam um aumento do fator de segurança com a decomposição dos resíduos. Porém, no cálculo probabilístico há um elevado risco de falha, apesar do estágio de decomposição do material. Assim, evidencia-se a importância da avaliação determinística juntamente com a probabilística para que os riscos sejam analisados corretamente e para que haja maior segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Aterro Sanitário, Método de Monte Carlo.

ABSTRACT: Slope stability in sanitary landfills represents an essential aspect during the construction phase and the operation of these structures, as it is directly related to the safety and reliability of the facility. In general, solid waste presents a highly heterogeneous gravimetric composition, which results in variations in its strength parameters and influences the slope stability analysis process. In addition, the degradation of waste over the years of disposal also directly affects the variation of these parameters. Thus, the objective of this study is to perform stability analyses of a sanitary landfill slope with different ages, in order to evaluate the influence of disposal time and waste variability on landfill stability. For this purpose, literature data related to the strength parameters of municipal solid waste are used and applied in both deterministic and probabilistic slope stability analyses, through the Monte Carlo Method, which consists of generating random samples of the shear strength parameters, implemented in a Python algorithm. The results show that both analyses indicate an increase in the factor of safety with the decomposition of the waste. However, in the probabilistic analysis, a high risk of failure is observed despite the waste decomposition. Therefore, the importance of combining deterministic and probabilistic evaluations is highlighted in order to properly investigate risks and ensure greater safety.

KEYWORDS: Slope Stability, Sanitary Landfill, Monte Carlo Method.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), nos últimos anos, o crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) e do comércio no Brasil levou a um grande aumento no consumo, o que implica na maior geração de resíduos pela população e na demanda de estruturas adequadas para sua disposição. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), estabelece uma ordem de prioridade para a gestão de resíduos, baseada na não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Assim, os aterros sanitários tornam-se a forma mais adequada para a destinação final dos resíduos, de maneira que englobam práticas como a divisão de células, compactação e cobertura dos resíduos, sistema de impermeabilização, sistemas de drenagem e tratamento para gases e lixiviado, além de monitoramento geotécnico e ambiental (Boscov, 2008). Portanto, a partir da necessidade de construção dessas estruturas, observa-se a ocorrência de acidentes relacionados à instabilidade de taludes em aterros sanitários, os quais podem provocar impactos ambientais expressivos e riscos à segurança da população (G1, 2022; Revista Limpeza Pública, 2019).

A estabilidade de um aterro sanitário depende de diversos fatores, entre eles o comportamento dos resíduos, influenciado por sua composição gravimétrica, grau de degradação, peso específico, poropressão, teor de umidade, compressibilidade entre outros. A ampla variação na composição gravimétrica reflete em um comportamento geomecânico igualmente heterogêneo, afetando diretamente a resistência dos resíduos e tornando mais complexa a definição de parâmetros que representem adequadamente o material ao longo do maciço. Além disso, o envelhecimento dos resíduos e a decomposição causa alterações nas características do aterro sanitário, de forma que é difícil a previsão do seu comportamento. Dessa forma, a avaliação adequada do comportamento mecânico dos resíduos torna-se essencial para a análise de estabilidade de taludes e para a prevenção de falhas geotécnicas em aterros sanitários (Boscov, 2008).

De acordo com Gerscovich (2016), a análise de estabilidade tem como finalidade a avaliação da possibilidade de escorregamento de massa de um talude natural ou construído. Assim, é feita uma comparação entre as tensões de cisalhamento atuantes com a resistência ao cisalhamento, através do Fator de Segurança (FS). A NBR 11682 da ABNT (2009) determina que um maior valor de FS equivale a um maior nível de segurança com relação à ruptura. Assim, a partir da determinação do risco enquadrado para a situação em análise, é determinado um FS mínimo a ser considerado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Fatores de segurança mínimos (ABNT, 2009)

	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Segundo o critério de ruptura de Mohr–Coulomb, a resistência ao cisalhamento pode ser representada por uma envoltória linear no plano tensão cisalhante versus tensão normal. O ângulo de atrito (ϕ) representa a inclinação da envoltória de ruptura e indica o aumento da resistência ao cisalhamento com o acréscimo da tensão normal aplicada. Já a coesão (c) corresponde ao intercepto da envoltória no eixo das tensões cisalhantes, representando a parcela da resistência independente da tensão normal (Das, 2007; Pinto, 2006). Para resíduos sólidos urbanos, esses parâmetros podem ser obtidos por ensaios de campo, laboratoriais e retroanálises.

A grande parte dos métodos de análise de estabilidade para o cálculo do FS foram elaborados por meio da Teoria do Equilíbrio Limite, na qual há uma hipótese de que a massa de solo é considerada um corpo

rígido que desliza sobre uma linha de escorregamento conhecida, seja plana, circular ou mista, respeitando o critério de Mohr-Coulomb (Pinto, 2006). Assim, as equações de Mecânica dos Solos são empregadas diretamente para a verificação do equilíbrio da superfície em estudo, por meio do cálculo direto do FS, de modo que é uma análise determinística (Bueno; Vilar, 1985; Gerscovich, 2016).

Para o contexto de aterro de resíduos, a análise puramente determinística apresenta limitações devido à grande variabilidade dos parâmetros e pelo número limitado de amostras. A análise probabilística é uma alternativa que inclui um tratamento estatístico que incorpore as incertezas intrínsecas ao FS determinado pelos métodos tradicionais. Dessa maneira, os métodos probabilísticos possibilitam uma representação mais realista da variabilidade dos resíduos e dos parâmetros geotécnicos, de maneira que contribuem para a tomada de decisões mais seguras no projeto e operação dos aterros. Para isso, abordam os conceitos de probabilidade de falha ou índice de confiabilidade para indicar a estabilidade de maciços (Barbeitos; Righi; Braz, 2025; Gerscovich, 2016; Mehdizadeh et al., 2020).

2 METODOLOGIA

2.1 Coleta de dados

A coleta de dados para as simulações foi estruturada de modo a garantir representatividade geométrica e realismo nos parâmetros de entrada. Adotou-se a geometria de aterro apresentada por Gerscovich (2016), por se tratar de uma configuração consolidada na literatura e com dimensões típicas de projetos de engenharia. Essa escolha fornece base confiável para a modelagem numérica e permite a comparação dos resultados com estudos previamente publicados. A geometria adotada é apresentada na Figura 1.

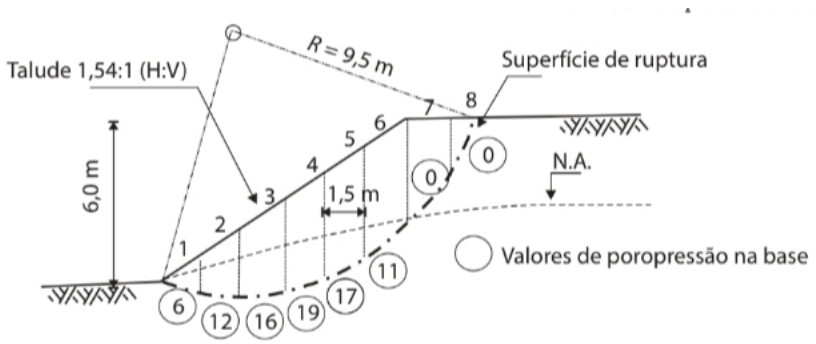


Figura 1. Exemplo de geometria adotada (Gerscovich, 2016)

Dessa forma, a partir do formato utilizado como base e dos dados fornecidos por Gerscovich (2016), é possível inferir os dados fixos das fatias que serão utilizadas posteriormente no modelo para a implementação do método, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Dados de cada fatia (Gerscovich, 2016)

Fatia	b (m)	h (m)	l (m)	α (°)	$u\ (kN/m^2)$
1	1,5	0,8	1,6	-14,6	6,0
2	1,5	1,8	1,5	0,0	12,0
3	1,5	2,8	1,6	14,6	16,0
4	1,5	3,5	1,6	20,4	19,0
5	1,5	3,9	1,7	28,0	17,0
6	1,5	4,0	2,0	40,0	11,0
7	1,5	3,0	2,4	50,3	0,0
8	1,0	1,2	2,2	63,6	0,0

Os parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito foram adotados a partir do estudo estatístico de Daciolo (2020), que avaliou a variabilidade da resistência dos RSU para análises probabilísticas. O autor diferenciou resíduos menos decompostos e mais degradados, representando a heterogeneidade vertical do maciço. Neste trabalho, essas condições são denominadas Resíduos Novos e Resíduos Antigos, permitindo comparar o comportamento em diferentes estágios de decomposição. Os dados adotados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos dos resíduos (Adaptado de Daciolo, 2020)

Material	Propriedade	Valor Médio	Desvio Padrão
Resíduos Novos	c'(kPa)	15,8	15,7
	$\phi'(°)$	22,2	9,6
Resíduos Antigos	c'(kPa)	19	15,7
	$\phi'(°)$	26,7	9,6

.

Para os valores de peso específico, Daciolo (2020) utilizou uma distribuição uniforme para os valores adotados, que foi mantida para esse estudo, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Valores de peso específico dos resíduos (Adaptado de Daciolo, 2020)

Material	Peso específico (KN/m^3)
Resíduos Novos	9
Resíduos Antigos	11

2.2 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade foi realizada pelo método de Fellenius, escolhido por sua aplicabilidade a diferentes geometrias e por fornecer resultados conservativos de FS (Gerscovich, 2016). Inicialmente, foi conduzida uma análise determinística com valores médios dos parâmetros de resistência. Para considerar a variabilidade dos resíduos, empregou-se o método probabilístico de Monte Carlo, que consiste na geração de um grande número de amostras aleatórias de variáveis de entrada de um modelo matemático a partir de medidas estatísticas de tendência definidas (McClarren, 2018). Assim, foi possível avaliar o valor esperado do FS, a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade para Resíduos Novos e Antigos, conforme o U.S. Army Corps of Engineers (1995).

A implementação da análise de estabilidade foi realizada a partir do desenvolvimento de um algoritmo em Python que executasse as análises de estabilidade determinística e probabilística através do Método de Fellenius. Na etapa probabilística, utilizou-se o método de Monte Carlo com geração de amostras aleatórias de intercepto coesivo e ângulo de atrito, assumindo distribuição normal com as médias e desvios padrão apresentados na Tabela 3 e limites físicos compatíveis com resíduos sólidos urbanos. Foram realizadas simulações com diferentes tamanhos de amostra (100, 10000 e 100000) para avaliação da convergência, e calculados o valor esperado do FS e a probabilidade de ruptura (relação entre a quantidade de simulações com FS menores que 1 e o total de simulações), além da análise gráfica dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações executadas para os Resíduos Novos e Resíduos Antigos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado das análises (Autores, 2026)

Material	Simulações	Valor esperado do FS	Probabilidade de Ruptura
Resíduos Novos	Determinística	1,747	-
	100	1,151	11%
	10000	1,985	13,87%
	100000	1,959	13,86%
	Convergência	1,77	13,9%
Resíduos Antigos	Determinística	1,851	-
	100	2,036	10%
	10000	1,930	10,97%
	100000	2,027	10,96%
	Convergência	1,86	10,9%

A análise de estabilidade pelo método determinístico, tanto para resíduos novos quanto para antigos, resultou em valores de FS acima de 1,5, indicando condições de estabilidade e um nível de segurança alto de acordo com a ABNT (2009). Além disso, a degradação dos resíduos causou um aumento do FS, o que aponta uma melhora na estabilidade. Esse resultado é esperado devido ao aumento dos valores absolutos dos parâmetros de resistência de ângulo de atrito e intercepto coesivo, além do aumento do peso específico, proporcionando um aumento da resistência ao cisalhamento a partir do aumento da idade dos materiais dispostos.

Na análise pelo método probabilístico, a execução de 100 simulações resultou em distribuições pouco representativas dos parâmetros geotécnicos e dos valores de FS, de maneira que a representação estatística das amostras ainda é insuficiente para representar a variabilidade real dos parâmetros. Assim, ao executar um maior número de simulações, observa-se uma distribuição melhor definida, até a convergência, indicando que o volume de amostras utilizado foi suficiente para representar a variabilidade. Para os resíduos novos, a convergência de valores ocorreu a partir de 40000 amostras, enquanto para os resíduos antigos ocorreu a partir de 20000, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

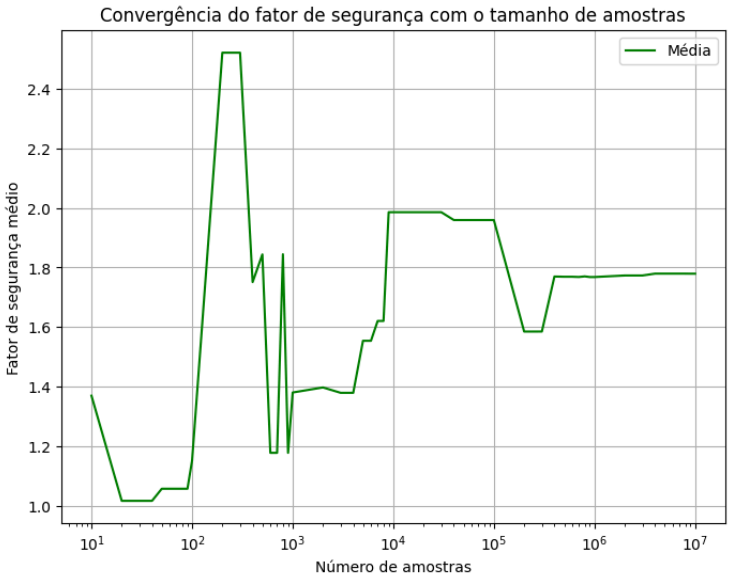


Figura 2. Convergência do FS para resíduos novos (Autores, 2026)

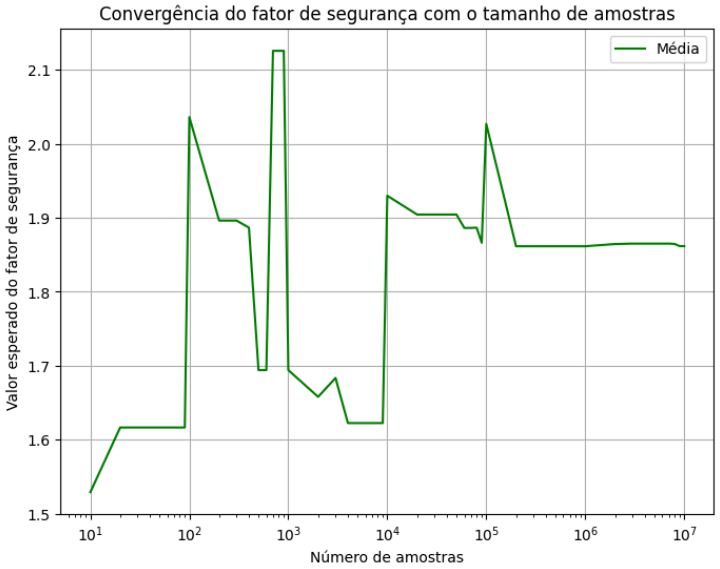


Figura 3. Convergência do FS para resíduos antigos (Autores, 2026)

A partir da convergência, os resultados do FS para resíduos novos tendem a 1,77, o que indicaria um nível adequado de segurança segundo a ABNT (2009). Contudo, a probabilidade de ruptura converge para 13,9%, o que representa um nível de desempenho entre Insatisfatório e Perigoso, de acordo com a classificação do U.S. Army Corps of Engineers (1995). Para os resíduos antigos, os valores de FS convergem para 1,86 e a probabilidade de ruptura para 10,9%, também indicando um nível adequado de segurança para a ABNT (2009), porém um nível de desempenho entre Insatisfatório e Perigoso, de acordo com a classificação do U.S. Army Corps of Engineers (1995).

Os resultados dos valores esperados de FS na análise probabilística confirmam os resultados obtidos na análise determinística, indicando que a decomposição dos resíduos contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do maciço estudado. Ademais, embora o FS tenha apresentado um resultado satisfatório, a probabilidade de ruptura se manteve em um grau alto de risco, mesmo com a sua redução para resíduos mais degradados. Esse comportamento indica que, apesar da tendência central indicar condições estáveis, há uma parcela significativa das simulações em que o FS se iguala ou permanece inferior a 1,0. Isso ocorre devido à grande variabilidade dos parâmetros, de modo que a dispersão dos seus valores ainda interfere negativamente no FS, mesmo com o aumento da resistência.

Além disso, os valores utilizados para a poropressão podem ter influenciado os resultados. A pressão negativa foi fixada de acordo com o modelo proposto por Gerscovich (2016), não sofrendo modificações a partir do envelhecimento dos resíduos. Entretanto, é esperado que o volume total de lixiviado presente em um aterro sanitário reduza a partir da estabilização da decomposição dos resíduos, o que reduziria a poropressão. Dessa maneira, os valores obtidos para os resíduos mais antigos poderiam oferecer condições mais seguras em termos de estabilidade e ruptura do aterro, caso essa redução fosse considerada

Ademais, ao comparar as análises determinísticas e probabilísticas, observa-se que os resultados de FS possuem valores próximos, o que indica que o cálculo determinístico representou uma boa aproximação do valor real do FS. Porém, ao incluir a probabilidade de falha, a análise de estabilidade torna-se mais completa, de modo que se verifica o risco associado à segurança do maciço.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a estabilidade de um talude de aterro sanitário considerando resíduos com diferentes idades, por meio de abordagens determinística e probabilística, a fim de analisar a influência da decomposição e da variabilidade do material na estabilidade do aterro. Os resultados obtidos evidenciam que a análise determinística, embora amplamente utilizada na prática, pode não representar de forma adequada o risco associado à instabilidade, uma vez que não considera a heterogeneidade dos resíduos. Por outro lado, a análise probabilística permitiu uma avaliação mais realista do problema, ao considerar a variabilidade dos parâmetros de resistência e fornecer informações adicionais relacionadas à probabilidade de ruptura e ao nível de confiabilidade do talude.

Os valores esperados do FS obtidos na análise probabilística confirmam a tendência identificada na análise determinística, reforçando que o processo de decomposição e envelhecimento dos resíduos promove um aumento da resistência ao cisalhamento do maciço em estudo. Contudo, apesar de os fatores de segurança apresentarem valores satisfatórios, a probabilidade de ruptura permaneceu em um nível considerado elevado de risco, mesmo após a sua redução para resíduos mais degradados.

Ademais, a avaliação da convergência dos resultados obtidos por meio do Método de Monte Carlo mostrou-se essencial para a validação das análises probabilísticas realizadas. A estabilização dos resultados ocorreu para quantidades distintas de simulações para resíduos novos (400000 amostras) e para resíduos antigos (200000 amostras).

Dessa forma, conclui-se que a utilização de análises probabilísticas constitui uma ferramenta relevante e complementar às abordagens tradicionais, contribuindo para uma avaliação mais consistente da estabilidade de taludes em aterros sanitários e para a tomada de decisões mais seguras no projeto e na operação dessas estruturas.

Com base nos resultados e nas limitações identificadas neste estudo, sugere-se a execução de análises considerando a influência da dissipação de poropressões, bem como a variação do nível de lixiviado ao longo do tempo. Além disso, realizar a comparação de diferentes métodos probabilísticos além do Método de Monte Carlo, avaliando a aplicabilidade e sensibilidade no contexto de aterros sanitários. Por fim, analisar estudos de casos de falhas em aterros sanitários para verificar a aplicabilidade do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente – ABREMA. (2024) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. São Paulo. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 15 set. 2025.

Barbeitos, F. C.; Righi, J. A.; Braz, J. A. Avanços em Estudos de Estabilidade de Taludes em Aterros Sanitários. (2025) In: IX Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE, Garibaldi. *Anais*… ABMS, p. 313-318.

Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia Ambiental*, 1a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 248 p.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). PIB cresce 3,4% em 2024 e fecha o ano em R$ 11,7 trilhões. *Agência de Notícias IBGE*, Brasília, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42774-pib-cresce-3-4-em-2024-e-fecha-o-ano-em-r-11-7-trilhoes>. Acesso em: 20 ago. 2025.

Bueno, B. S.;Vilar, O. M. (1985) *Mecânica dos Solos Volume II*, São Carlos, 219 p.

Daciolo, L. V. P.; Correia, N. S.; Boscov, M. E. G.; Kamiji, T. S. M. M. (2020) *Abordagem probabilística em análises de estabilidade de aterros sanitários: caso da ruptura do aterro Sítio São João*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, São Paulo. *Anais*... ABMS.

Das, B. M. (2007) *Fundamentos de engenharia geotécnica.* Tradução All Tasks. Tradução da 6. ed. norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 562p.

G1. *Operador de retroescavadeira cai em barranco e é soterrado em aterro sanitário de Fazenda Rio Grande.* Disponível em:

<https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2022/06/26/operador-de-retroescavadeira-cai-em-barranco-e-e-so terrado-em-aterro-sanitario-de-fazenda-rio-grande.ghtml>. Acesso em: 07 nov. 2025.

Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*. 2 ª Edição, São Paulo, Oficina de Textos, 192 p.

McClarren, R. G. (2018) *Uncertainty quantification and predictive computational science*. Cham: Springer Nature Switzerland.

Mehdizadeh, M. J.; Shariamadari, N.; Karimpour-Fard, M. (2020) *Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 79, n. 5, p. 2679–2695, ISSN 14359537.

Pinto, C. d. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 367 p.

Revista Limpeza Pública, São Paulo, n. 101, jul./set. 2019. *Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública* – ABLP.

USACE. (1985) *Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering, Engineering and Design* - Rep. No. 20314–1000. Washington, USA.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/88

Estabilização de um Solo Tropical com Escória de Aciaria Elétrica Primária

Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos Teixeira
Doutorando, UFV, Viçosa, Brasil, francisco.teixeira@ufv.br

Klaus Henrique de Paula Rodrigues
Professor, UFV, Viçosa, BR, klaus@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

Taciano Oliveira da Silva
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, taciano.silva@ufv.br

Natália Assunção Brasil Silva
Professor, UFV, Viçosa, Brasil, natalia.brasil@ufsj.edu.br

RESUMO: O reaproveitamento de resíduos industriais na engenharia de pavimentos tem se mostrado promissor para substituição de materiais convencionais. A escória de aciaria elétrica primária (EAEP), coproduto siderúrgico com potencial reativo com constituintes dos solos formando compostos cimentícios (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) que melhoram propriedades geotécnicas. Embora estudos demonstrem resultados satisfatórios com teores até 20% de EAEP, o comportamento com teores superiores sob energia Proctor Modificada permanece pouco explorado. Este trabalho avaliou a estabilização de um solo tropical de Viçosa-MG com 0%, 20% e 40% de EAEP (M0, M1 e M2), utilizando a energia Proctor Modificada e cura selada por 7 dias em câmara úmida. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS), mini-ISC e expansão ISC. Os resultados mostraram incrementos de RCS de 67% (M1) e 253% (M2), mini-ISC acima de 20% (M1) e 80% (M2), além de redução da expansão ISC de 85% (M1) e 90% (M2). Conclui-se que a ampliação da dosagem para 40% com energia Proctor Modificada representa avanço significativo, demonstrando viabilidade técnica da EAEP para camadas estruturais de pavimentos, com benefícios ambientais pelo aproveitamento de coprodutos siderúrgicos e redução do consumo de agregados naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de Aciaria Elétrica Primária, Estabilização de Solos, Estabilização Química, Pavimentação, Sustentabilidade.

ABSTRACT: The reuse of industrial waste in pavement engineering has shown promising results for replacing conventional materials. Electric arc furnace slag (EAFS), a steelmaking by-product with reactive potential, interacts with soil constituents to form cementitious compounds (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) that improve geotechnical properties. Although studies demonstrate satisfactory results with EAFS contents up to 20%, the behavior at higher contents under Modified Proctor energy remains underexplored. This study evaluated the stabilization of a tropical soil from Viçosa-MG with 0%, 20%, and 40% EAFS (M0, M1, and M2), using Modified Proctor energy and sealed curing for 7 days in a moist chamber. Unconfined compressive strength (UCS), mini-CBR, and CBR swell tests were performed. The results showed UCS increases of 67% (M1) and 253% (M2), mini-CBR values above 20% (M1) and 80% (M2), and CBR swell reductions of 85% (M1) and 90% (M2). It is concluded that increasing the dosage to 40% with Modified Proctor energy represents a significant advancement, demonstrating the technical feasibility of EAFS for structural pavement layers, with environmental benefits from the utilization of steelmaking by-products and reduction in natural aggregate consumption.

KEYWORDS: Electric Arc Furnace Slag, Soil Stabilization, Chemical Stabilization, Paving, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a redução de impactos ambientais na construção civil tem incentivado a busca por soluções que conciliem desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos industriais tem se mostrado promissor para substituição de materiais convencionais, com estudos demonstrando que a escória de aciaria elétrica pode melhorar significativamente o comportamento resiliente e a resposta estrutural de pavimentos asfálticos quando utilizada em camadas de subleito (Rodrigues et al., 2024a; Rodrigues et al., 2024b).

Dentre os coprodutos industriais com potencial geotécnico, destaca-se a escória de aciaria elétrica primária (EAEP), gerada durante o processo de produção do aço em fornos elétricos a arco. Nesse processo, ocorre a fusão de sucatas metálicas e ferro-gusa sob altas temperaturas com injeção de oxigênio. Isso produz uma escória rica em óxidos de cálcio, ferro e magnésio. Esses elementos são responsáveis por conferir ao material caráter básico e reatividade pozolânica (Lopes et al., 2023; Rodrigues et al., 2023).

Ao ser moída e utilizada como fino de escória, a EAEP apresenta capacidade de reagir com os argilominerais do solo e formar compostos cimentícios como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H), que melhoram propriedades geotécnicas, criando estruturas mais densas, aumentando a resistência e reduzindo a plasticidade e a expansibilidade (Kang et al., 2024; Lopes et al., 2021; Rodrigues et al., 2024a; Yu et al., 2021).

Estudos recentes demonstraram que o uso de teores de EAEP de até 20% em misturas solo-escória promove elevação significativa da resistência à compressão simples (RCS) e do índice de suporte Califórnia (ISC), além de reduzir a expansão e o teor de umidade ótimo (Lopes et al., 2023; Rodrigues et al., 2023). Entretanto, a literatura técnica ainda apresenta escassez de estudos envolvendo teores superiores a 20% e o uso da energia de compactação Proctor Modificada, condição essencial para simular solicitações típicas da camada de base de pavimentos rodoviários.

Assim, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico e volumétrico de um solo tropical da microrregião de Viçosa-MG estabilizado com EAEP, considerando teores de 0%, 20% e 40% utilizando a energia de compactação Proctor Modificada. Pretende-se, com isso, investigar a influência do aumento do teor de EAEP sobre as propriedades mecânicas e expansivas das misturas, buscando verificar sua viabilidade técnica para uso em camada de base de pavimentos asfálticos, conforme os critérios de classificação do manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

Este trabalho representa um avanço na literatura ao ampliar a faixa de dosagem de EAEP e avaliar seu comportamento sob maior energia de compactação, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos siderúrgicos e para a redução do consumo de agregados naturais em obras de infraestrutura rodoviária.

2 MATERIAIS E METÓDOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados dois materiais: uma amostra de solo tropical residual e uma amostra de uma escória de aciaria elétrica primária (EAEP).

2.1.1 Solo Tropical

A amostra de solo foi coletada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta da amostra seguiu o procedimento PRO 003 (DNER, 1994), a qual foi preparada para os ensaios geotécnicos de laboratório, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2024).

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: análise granulométrica conjunta, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2025d); limite de liquidez, segundo a NBR 6459 (ABNT, 2025b); limite de plasticidade, segundo a NBR 7180 (ABNT, 2025c); e massa específica dos grãos do solo (ρ_s), segundo a NBR 17212 (ABNT, 2025a). Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização e classificação geotécnicas da amostra de solo, Autores 2026.

Parâmetro	Resultado
% argila ($\varphi < 0{,}002$ mm)	5
% silte (0,002 mm < φ < 0,06 mm)	24
% areia (0,06 mm < φ < 2 mm)	68
% pedregulho (2 mm < φ < 60 mm)	3
LL (%)	36
LP (%)	18
IP (%)	18
ρ_s (g/cm³)	2,657
TRB	A-2-6
USC	SC
MCT	NA’

O solo apresentou limite de liquidez de 36%, índice de plasticidade de 18% e massa específica dos grãos de 2,657 g/cm³, sendo classificada em A-2-6, SC e NA’ nos sistemas de classificação TRB, USC e MCT, respectivamente.

2.1.2 Escória de Aciaria Elétrica Primária (EAEP)

A amostra de EAEP foi fornecida por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada no município de Jeceaba, região do Alto Paraopeba, também no estado de Minas Gerais, Brasil. A coleta das amostras de EAEP em seu estado original (escória bruta) foi realizada de acordo com a norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004). A amostra utilizada foi proveniente de locais de estocagem recente, no qual o tempo máximo entre sua geração e sua disposição foi de 72 horas, não sendo empregado qualquer processo de cura do material antes da realização dos ensaios.

Para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização, esse material foi moído para redução da sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,106 mm (peneira #150) a fim de aumentar a sua superfície específica.

Os ensaios de caracterização física das amostras de EAEP realizados foram: finura por peneiramento, de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012a), superfície específica pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015), massa específica da escória moída, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A amostra de EAEP moída apresentou índice de finura por peneiramento de 24,88%, superfície específica pelo método de Blaine de 1955,60 cm²/g, massa específica dos sólidos de 3,7 g/cm³.

2.2 Métodos Adotados

As misturas de solo-EAEP foram identificadas como M0 a M2, sendo que a mistura M0 possui 100% de solo, a mistura M1 possui 80% de solo e 20% de EAEP, e a mistura M2 possui 60% de solo e 40% de EAEP. Os teores foram determinados em relação à massa seca das misturas.

Para determinação dos parâmetros de ótimo da massa específica aparente seca e o teor de umidade ótimo o solo e as misturas foram submetidos ao ensaio de compactação conforme a NBR 7182 (ABNT, 2025e) utilizando a energia Proctor Modificada, a qual é representativa das condições de compactação empregadas em camadas de base de pavimentos rodoviários.

As propriedades mecânicas utilizadas para avaliação da estabilização da amostra do solo foram a resistência à compressão simples (RCS) e o índice de mini-ISC, conforme as respectivas normas técnicas NBR 12025 (ABNT, 2012b) e DNIT 254 ME (DNIT, 2023). Essas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com os critérios de seleção de materiais para composição de camadas estruturais de pavimentos rodoviários, conforme recomendações da norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012c) e do manual de pavimentação (DNIT, 2006).

Para a determinação das propriedades mecânicas de cada mistura analisada, foram moldados, no teor de umidade ótimo, três corpos de prova, os quais foram submetidos a um processo de cura selada, em filme de PVC, em câmara úmida por sete dias, para que as propriedades cimentantes pudessem ser avaliadas.

O ensaio de RCS foi realizado em corpos de prova da amostra de solo em sua condição natural e das misturas solo-EAEP analisadas, de acordo com a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012b), sem imersão previa dos corpos de prova em água. Os ensaios para a determinação dos valores de mini-ISC e da expansão ISC da amostra de solo na condição natural e das misturas solo-EAEP analisadas foram realizados segundo a norma técnica DNIT 254 ME (DNIT, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Compactação

Os resultados dos ensaios de compactação indicaram influência direta do teor de EAEP nas propriedades de compactação das misturas. Conforme apresentado na Tabela 2, observou-se redução progressiva do teor de umidade ótimo (w_{ot}) e aumento da massa especifica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) com o incremento do teor de EAEP.

Tabela 2. Parâmetros de ótimo das misturas analisadas.

Material	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)
M0	12,711	1,874
M1	11,902	1,959
M2	11,137	2,114

Segundo Zumrawi e Babikir (2017), a diminuição do teor de umidade com a adição de EAEP é devido às trocas catiônicas que ocorrem entre os íons de cálcio provenientes da EAEP e os íons presentes na dupla camada difusa das partículas dos solos. De acordo com Yu et al. (2024), essa redução também pode ser atribuída a uma hidratação prévia dos óxidos de cálcio presentes na EAEP, gerando o composto hidróxido de cálcio, o que implica em menor demanda de água na mistura para alcançar sua massa especifica aparente seca máxima.

O aumento da massa específica aparente seca máxima com adição de EAEP é amplamente reportado na literatura técnica. No presente estudo, observou-se incremento de ρ_{dmax} de 1,87 g/cm³ (M0) para 2,11 g/cm³ (M2, 40% de EAEP), representando aumento de aproximadamente 12,8%. Esse comportamento está associado à maior massa específica real da EAEP em comparação às partículas do solo, promovendo melhorias de propriedades mecânicas (Jia et al., 2022; Lopes et al., 2022; Shi et al., 2022; Yu et al., 2021).

Em misturas solo-escoria submetidas à energia Proctor Normal, Kang et al. (2024) e Ogundare et al. (2024) também observaram incremento de ρ_{dmax} , associando-o tanto ao preenchimento físico de vazios quanto ao desenvolvimento de produtos cimentantes decorrente da reatividade dos óxidos presentes na EAEP.

3.2 Propriedades Mecânicas e Expansão Volumétrica

Utilizando os parâmetros de ótimo dos ensaios de compactação (ρ_{dmax} e w_{ot}), foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios mecânicos de RCS, índice mini-ISC e expansão ISC. Os resultados são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente, com barras de erro representando o erro padrão da média calculado a partir das repetições experimentais.

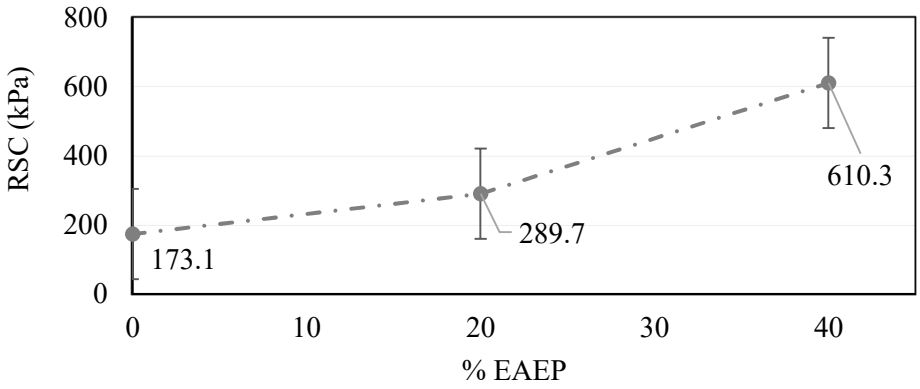


Figura 1. RCS da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Observou-se uma tendência de aumento de RCS com a adição de EAEP, sendo mais evidente quando o teor de EAEP foi de 40%. Para a amostra de solo, o aumento de RCS foi de 67% para a mistura M1 (20% de EAEP) e de 253% para a M2 (40% de EAEP) quando comparada com a amostra do solo no estado natural, alcançando um valor aproximado de 290 kPa e 610 kPa, respectivamente. Esses valores superam o mínimo de RCS exigido pelo departamento de estradas de Louisiana para que um material possa compor uma camada de reforço de subleito (Gautreau et al., 2010).

Parsaei et al. (2021) observaram, através do ensaio de difração de raios-X (DRX) em misturas de argila, cimento e escoria de forno elétrico a arco, que houve formação de compostos cimentícios, como o C-S-H, o que confere às misturas solo-EAEP maior resistência mecânica e criando uma estrutura mais densa em comparação ao solo natural, conforme também reportado por Rodrigues et al. (2024a). Os autores também observaram que o grau de floculação na estrutura da mistura aumentou, devido ao processo de troca catiônica entre os cátions presentes na EAEP e na amostra de solo. Shi et al. (2022) e Yu et al. (2024) atribuíram o aumento de RCS com o aumento de escória de aciaria elétrica ao aumento da massa especifica aparente seca máxima, à diminuição do teor de umidade ótimo, e à formação de produtos cimentícios via carbonatação.

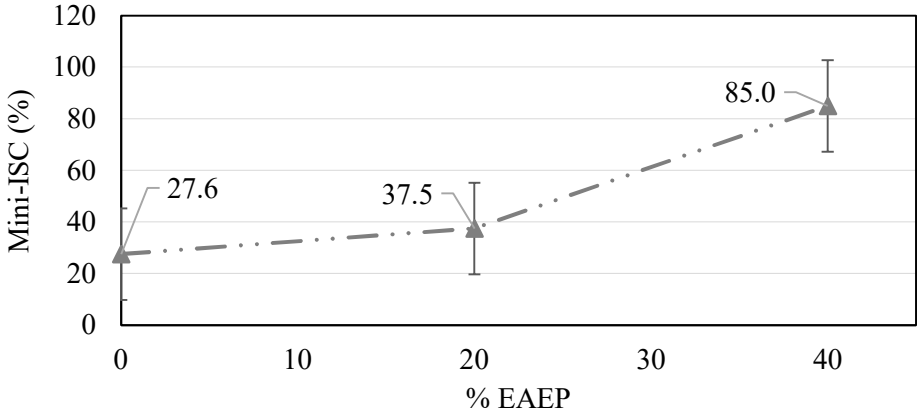


Figura 2. Mini-ISC da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Verificou-se uma tendência de aumento do valor de mini-ISC com o aumento do teor de EAEP, o que também foi observado por outros autores (Jia et al., 2022; Kang et al., 2024; Lopes et al., 2021, 2022, 2023; Rodrigues et al., 2023). A mistura M1 (20% de EAEP) apresentou mini-ISC acima de 20% e a mistura M2 (40% de EAEP) apresentou índice ISC acima de 80%.

Kang et al. (2024) afirmam que esse aumento é devido aos novos grãos que se formam resultantes de reações químicas entre a amostra de solo e a EAEP, sendo que o processo de troca de cátions gera uma alteração na estrutura do material, tornando-a mais floculada e com maiores tamanhos. Alguns autores atribuem o aumento do valor de ISC com a adição de escória de aciaria elétrica ao aumento da massa específica aparente seca máxima e à redução do teor de umidade ótimo (Jia et al., 2022; Lopes et al., 2021).

Rodrigues et al. (2023) também observaram um aumento nas propriedades mecânicas RCS e ISC com o aumento no teor de EAEP em solos tropicais, o qual foi atribuído à cimentação promovida pelos óxidos presentes na escória, os quais geraram uma estrutura mais densa nos corpos de prova.

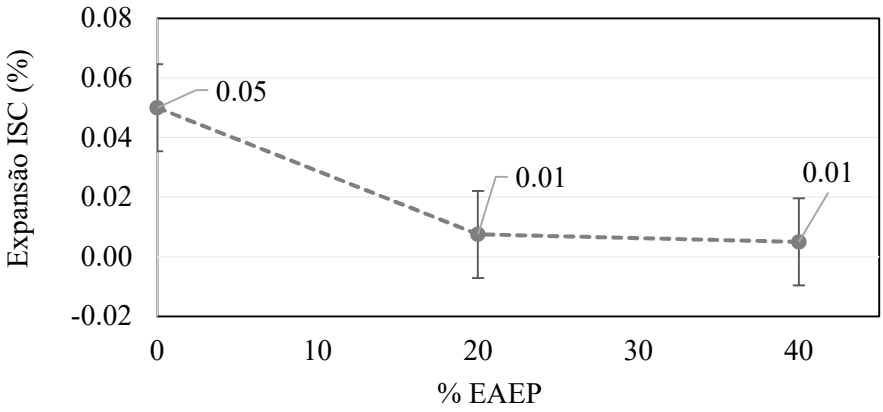


Figura 3. Expansão ISC da amostra de solo e suas misturas com EAEP, Autores 2026.

Observou-se que o incremento do teor de EAEP nas misturas solo-EAEP gerou uma redução nos valores de expansão ISC. As misturas M1 e M2 apresentaram valores de expansibilidade inferiores a 0,5%, valor considerado baixo segundo o manual de pavimentação (DNIT, 2006), indicando a adequada estabilidade volumétrica para aplicação em camada de base. A redução da expansão pode ser atribuída aos mecanismos físico-químicos previamente discutidos.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a estabilização de um solo tropical da microrregião de Viçosa–MG com escória de aciaria elétrica primária (EAEP), investigando teores de 0%, 20% e 40% (misturas M0, M1 e M2) sob compactação na energia Proctor Modificada e cura selada em câmara úmida por 7 dias.

Os resultados de compactação indicaram redução progressiva do teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 12,71% (M0) para 11,137% (M2), acompanhada de aumento da massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) de 1,87 g/cm³ para 2,11 g/cm³. O incremento de aproximadamente 12,8% na massa específica seca máxima demonstra melhoria significativa da compacidade com a ampliação do teor de EAEP até 40%.

Quanto ao desempenho mecânico, verificou-se tendência consistente de ganho de resistência à compressão simples (RCS) com a adição de EAEP, com aumento de 67% para a mistura M1 e de 253% para a mistura M2, atingindo valores de 290 kPa e 610 kPa, respectivamente. Os resultados de mini-ISC também apresentaram tendência de incremento com o teor de EAEP, com M1 acima de 20% e M2 apresentando ISC acima de 80%.

No que se refere a estabilidade volumétrica, a adição de EAEP promoveu redução da expansão ISC. As misturas M1 e M2 apresentaram valores inferiores a 0,01%, indicando comportamento expansivo desprezível.

Dessa forma, conclui-se que a ampliação da faixa de dosagem da EAEP para 40%, combinada ao uso de energia Proctor Modificada, constitui um avanço em relação aos estudos anteriores concentrados em teores até 20% e energias menores, ao evidenciar ganhos simultâneos de compacidade, resistência e estabilidade volumétrica. Os resultados reforçam o potencial da EAEP como estabilizante em solos tropicais, com benefícios ambientais associados à redução do consumo de agregados naturais e ao aproveitamento de coprodutos siderúrgicos na infraestrutura de transportes.

Limitações do estudo, esta pesquisa foi conduzida em escala laboratorial com um único tipo de solo tropical e períodos de cura de 7 dias. Estudos futuros devem contemplar ensaios de durabilidade, avaliação de longo prazo, testes em campo e analise de viabilidade econômica pra consolidar a aplicação prática da EAEP em pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2004). *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012a). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012b). *NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012c). *NBR 12253: Solo-Cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2017). *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2024). *NBR 6457: Preparo de Amostras de Solos.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025a). *NBR 17212: Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025b). *NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez* (p. 5).

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025c). *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025d). *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025e). *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994). *PRO 003: Coleta de amostras deformadas de solos*.

Departamento Nacional De Infra-Estrutura De Transportes (DNIT). (2023). *DNIT 254. Solos - Compactação em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão - Método de ensaio*.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2006). *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro.

Gautreau, G. P., Zhang, Z., & Wu, Z. (2010). *Accelerated loading evaluation of subbase layers in pavement performance.* Louisiana Transportation Research Center. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/20296

International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 13320. *Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods*.

Jia, Y., Hua, S., Qian, L., Ren, X., Zuo, J., & Zhang, Y. (2022). Development of steel slag-based solidification/stabilization materials for high moisture content soil. *Journal of Renewable Materials*, *10*(3), 735–749. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.016819

Kabeta, W. F., & Lemma, H. (2023). Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil. *Modeling Earth Systems and Environment*, *9*(4), 4023–4030. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1

Kang, X., Li, C., Zhang, M., Yu, X., & Chen, Y. (2024). Mechanical Properties and Stabilization Mechanism of Steel Slag-Rice Husk Ash Solidified High Plasticity Clay. *Geotechnical Testing Journal*, *47*(1), 235–253. https://doi.org/10.1520/GTJ20220294

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., de Carvalho, J. M. F., Nalon, G. H., de Araújo, E. N. D., & de Paula Rodrigues, K. H. (2023). Chemical, mineralogical, microstructural and engineering properties of tropical soils stabilised with the combined and individual use of different types of steel slag. *Road Materials and Pavement Design*, *25*(7), 1507–1527. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268723

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Franco de Carvalho, J. M., Nalon, G. H., de Lima, G. E. S., & de Araújo, E. N. D. (2022). Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. *Road Materials and Pavement Design*, *24*(1), 247–266. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2017328

Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Franco de Carvalho, J. M., Nalon, G. H., Lima, G. E. S. de, & Rodrigues, M. H. R. (2021). Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(14), 5003–5014.

https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1990289

Ogundare, D. A., Adeleke, O. O., & Akinbuluma, A. T. (2024). Chemical and Mechanical Characterisation of Clay Soil Stabilised with Steel Slag and Calcium Carbide Waste. *Civil and Sustainable Urban Engineering*, *4*(1), 55–64. https://doi.org/10.53623/csue.v4i1.427

Parsaei, M., Vakili, A. H., Salimi, M., Farhadi, M. S., & Falamaki, A. (2021). Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *80*(8), 6303–6320. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02316-0

Rodrigues, K. H. de P., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., & Rodrigues, M. H. R. (2023). Experimental study of mixtures soil-industrial waste using simplex design for application in paving. *Journal of Building Engineering*, *78*(September), 107761. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107761

Rodrigues, K. H. de P., Silva, T. O. da, Pitanga, H. N., Nes, Almeida, M. S. de S., Pedroti, L. G., Rodrigues, M. H. R., & Lopes, E. C. (2024a). Effect of carbonation of soil-slag mixtures on the resilient behaviour and structural response of an asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, *25*(10), 2101–2120. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2300364

Rodrigues, M. H. R., Silva, T. O. da, Pitanga, H. N., Pedroti, L. G., Rodrigues, K. H. de P., Lopes, E. C., & Nalon, G. H. (2024b). Efficacy of the Simplex-Centroid Method for Optimization of Mixtures of Soil, Ladle Furnace Slag and Fly Ash Applied in Pavement Construction. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(17). https://doi.org/10.3390/su16177726

Shi, J., Wang, S., Cao, W., Su, J., & Zhang, X. (2022). Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Dredged Silty Clay Stabilized by Cement and Steel Slag. *Materials*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/ma15113823

Yu, C., Cui, C., Wang, Y., Zhao, J., & Wu, Y. (2021). Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale. *Engineering Geology*, *295*(October), 106410. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106410

Yu, C., Cui, C., Zhao, J., Liu, F., Fu, S., & Li, G. (2024). Enhancing mechanical properties of dredged sludge through carbonation stabilization employing steel slag: An eco-friendly and cost-effective approach. *Construction and Building Materials*, *412*(January), 134748. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134748

Zumrawi, M. M. E., & Babikir, A. A.-A. A. (2017). Laboratory Study of Steel Slag Used in Stabilizing Expansive Soil. *Asian Engineering Review*, *4*(1), 1–6. https://doi.org/10.20448/journal.508.2017.41.1.6

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/89

Estudo Comparativo da Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Municípios do Sertão Nordestino: Um Diagnóstico Geotécnico Ambiental

Joyce da Cruz Lima
Engenheira Civil e Pos-Graduanda em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Juazeiro-BA, Brasil, joycedaclima@gmail.com

Plynio Armando da Silva Domingos
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Juazeiro-BA, Brasil, plynio.domingo@discente.univasf.edu.br

Luan Santos Benevides
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Juazeiro-BA, Brasil, luanbenevides123@gmail.com

Raliny Mota de Souza Farias
Professora Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Juazeiro-BA, Brasil, raliny.mota@univasf.edu.br

Rafaella de Moura Medeiros
Mestre em Engenharia Civil e Coordenadora Técnica do Projeto de Extensão Plansanear, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Petrolina-PE, Brasil, rafaella.moura@ufpe.br

RESUMO: A gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Petrolina-PE e Juazeiro-BA, polos do Vale do São Francisco, constitui um desafio para o desenvolvimento regional e para a efetivação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Este estudo realizou uma análise comparativa dos sistemas de gestão de RSU e propôs alternativas de monitoramento geotécnico-ambiental e remediação. A metodologia baseou-se em pesquisa bibliográfica e análise documental, associadas à proposição de melhorias na investigação de campo e na instrumentalização geotécnica, incluindo análises laboratoriais de RSU e lixiviado, previsão de recalques e tecnologias de remediação, como cobertura final, drenagem de passivos, controle de emissões de metano e recirculação de lixiviado. Os resultados indicam que, embora ambos os municípios operem aterros sanitários em conformidade legal, apresentam desempenho distinto, onde Petrolina possui cobertura total da coleta domiciliar e Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana de 0,364, enquanto Juazeiro apresenta cobertura de 81,21% e índice de 0,546. Concluiu-se que a região tem potencial de otimização nos seus sistemas vista a necessidade de controle geotécnico e ambiental rigoroso visando à segurança estrutural das áreas de descarte, à adequação ambiental dos sistemas e à proteção dos recursos hídricos do Rio São Francisco, em conformidade com a legislação vigente.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos, Aterro Sanitário, Petrolina, Juazeiro, PNRS.

ABSTRACT: The management of Urban Solid Waste (USW) in Petrolina, Pernambuco, and Juazeiro, Bahia, major urban centers of the São Francisco River Valley, constitutes a challenge to regional development and to the effective implementation of Brazil's National Solid Waste Policy. This study carried out a comparative analysis of USW management systems and proposed alternatives for geotechnical-environmental monitoring and remediation. The methodology was based on a literature review and document analysis, combined with proposed improvements in field investigations and geotechnical instrumentation, including topographic surveys, subsurface investigations, and settlement measurements, as well as laboratory analyses of USW and leachate, geotechnical modeling for stability assessment and settlement prediction, and remediation technologies such as final cover systems, legacy site drainage, methane emission control, and leachate recirculation. The results indicate that, although both municipalities operate sanitary landfills in legal

compliance, they present distinct performance: Petrolina achieves full household waste collection coverage and an Urban Cleaning Sustainability Index of 0.364, whereas Juazeiro presents 81.21% coverage and an index of 0.546. The study concludes by proposing methods to address the identified need for rigorous geotechnical and environmental control, ensuring structural safety, environmental adequacy, and the protection of the São Francisco River's water resources.

KEYWORDS: Solid Waste, Sanitary Landfill, Petrolina, Juazeiro, PNRS.

1 INTRODUÇÃO

A gestão e a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos representam desafios centrais ao desenvolvimento sustentável das cidades brasileiras em contextos de expansão urbana acelerada. O aumento contínuo da geração de resíduos impõe pressões significativas sobre os serviços públicos e a saúde pública e exige sistemas de gestão integrados e tecnicamente estruturados. Nesse cenário a Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída pela Lei Federal 12.305 de 2010 configura um marco regulatório fundamental ao estabelecer diretrizes para a gestão integrada e a erradicação de lixões (BRASIL, 2010).

Em regiões semiáridas esses desafios são intensificados por particularidades climáticas, geológicas, pedológicas e geotécnicas que impõem limitações adicionais à operação e ao monitoramento de áreas de disposição final. Inseridos no semiárido nordestino, os municípios de Petrolina em Pernambuco e Juazeiro na Bahia, destacam-se como polos regionais de desenvolvimento impulsionados pela fruticultura irrigada no Vale do São Francisco. Ambos os municípios apresentam um histórico de disposição inadequada de resíduos seguido por processos de remediação de lixões e pela implantação de aterros destinados à recepção dos descartes urbanos. Em 2024, Petrolina obteve pontuação de 0,364 no Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana enquanto Juazeiro alcançou 0,546 o que indica níveis insatisfatórios de aderência às diretrizes nacionais. A ausência de medidas sistemáticas de controle pode comprometer o desempenho dessas unidades e favorecer instabilidades geotécnicas ou a contaminação de recursos hídricos.

A efetividade das ações de remediação depende da caracterização do meio físico e da implementação de programas rigorosos de monitoramento geotécnico e ambiental. A relevância desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de mitigar passivos ambientais e assegurar a estabilidade estrutural das áreas de descarte para a proteção do ecossistema local.

Diante desse cenário, o objetivo estudo consistiu em realizar uma análise comparativa dos sistemas de limpeza urbana de Petrolina e Juazeiro associada à avaliação da infraestrutura e das competências administrativas das instituições envolvidas, contendo uma proposição integrada de monitoramento e remediação aplicada aos antigos lixões e aos aterros sanitários dos dois municípios. O foco da investigação recaiu sobre a análise pedológica e geotécnica das áreas para a espacialização de riscos e a definição de critérios técnicos de controle ambiental.

2 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma abordagem qualitativa, de caráter aplicado e analítico, fundamentada na integração de análise documental, pesquisa bibliográfica, levantamento de dados secundários e observações de campo. O estudo baseou-se em documentos oficiais, legislações municipais e relatórios técnicos, como o RIMA da CTR de Petrolina, tendo a Política Nacional de Resíduos Sólidos como referência central. Complementarmente, realizaram-se consultas à produção acadêmica e dados do BDIA/IBGE, processados em software QGIS para a caracterização do meio físico e identificação de vulnerabilidades geotécnicas.

A metodologia incluiu visitas técnicas às áreas de interesse em Petrolina e Juazeiro para verificação in loco das condições físicas, ambientais e operacionais das estruturas. Os dados obtidos foram integrados de forma sistemática para permitir uma análise comparativa entre os municípios, considerando aspectos institucionais e geotécnicos. A partir dessa integração, foram definidos critérios técnicos para a proposição de medidas de remediação e monitoramento, em conformidade com as diretrizes da PNRS e com as condições locais.

2.1 Delimitação da área de estudo

As áreas de estudo compreendem os sistemas de disposição final de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), polos estratégicos do semiárido nordestino. A análise abrange o Aterro Sanitário de Petrolina, o Aterro Controlado de Juazeiro e a área remediada do antigo lixão do Raso da Catarina, atualmente convertida no Parque do Povo e em unidade de transbordo. A localização dessas áreas e sua proximidade com o Rio São Francisco reforçam a necessidade de controle rigoroso para a proteção dos recursos hídricos locais.

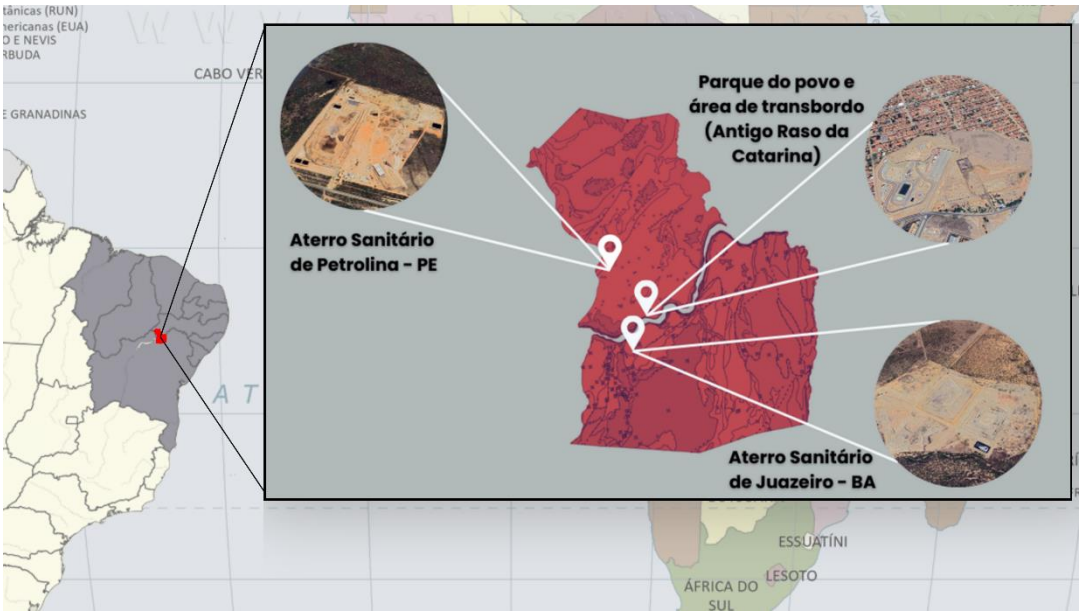


Figura 1. Localização das áreas de estudo em Petrolina (PE) e Juazeiro (BA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos revelam disparidades técnicas e operacionais significativas na gestão de resíduos sólidos entre Petrolina e Juazeiro, refletindo diferentes estágios de adequação à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

3.1 Evolução histórica da gestão de resíduos sólidos

A análise comparativa mostra que ambos os municípios operaram lixões a céu aberto por décadas (Raso da Catarina e Serrote da Batata). Petrolina iniciou a transição em 2006, convertendo o lixão em aterro controlado e, em 2014, migrando para um aterro sanitário licenciado. Juazeiro remediou seu lixão em 2014, transformando-o em aterro controlado. Atualmente, Petrolina apresenta avanços na requalificação urbana, como a conversão de parte do antigo lixão no Parque do Povo em 2025, enquanto Juazeiro ainda busca consolidar o monitoramento contínuo de sua unidade.

3.2 Geração de RSU

Petrolina registrou um salto populacional para 386.786 habitantes (IBGE, 2022), com geração per capita de 1,18 kg/hab.dia, totalizando aproximadamente 456,41 toneladas diárias coletadas em 2023. Juazeiro, com 237.821 habitantes (IBGE, 2022), apresenta um incremento populacional de 18,95% desde 2010. Segundo dados do SNIS/SINIR, o município coleta anualmente 88.090 toneladas, o que equivale a 241,3 toneladas/dia e uma geração per capita de 406 kg/hab.ano.

3.3 Sistema de coleta e transporte

Em Petrolina, a coleta domiciliar é realizada pela gestão municipal e terceirizadas, operando majoritariamente em dias alternados. O município implementou Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e conta com as cooperativas COOMARCA e RENASCER, embora a efetividade da segregação ainda seja limitada.

Em Juazeiro, o serviço é responsabilidade do SAAE, com coleta diária no centro e alternada nos bairros. O município dispõe do programa "Cata Treco" para resíduos volumosos, visando reduzir o descarte irregular em terrenos baldios.

3.4 Destinação final

3.4.1 Características logísticas e operacionais

O aterro sanitário de Petrolina opera via concessão com a CTR Petrolina (Contrato nº 440/2006), fundamentado na Lei Federal nº 12.305/2010 e na Lei Estadual nº 14.236/2010. A unidade possui balança rodoviária, compactação mecanizada e cobertura diária. Em Juazeiro, a disposição ocorre em aterro controlado sem balança para controle direto, sendo o quantitativo baseado em relatórios dos geradores e controle manual de acesso pela prefeitura.

3.4.2 Tecnologias no tratamento de resíduos, monitoramento e remediação

Petrolina destaca-se pela usina de biogás (Gera Energia Brasil) com capacidade de 1 MW, usina de compostagem e unidade de beneficiamento de entulho (UBE) com capacidade de 2.600 t/mês. Juazeiro não possui aproveitamento energético e utiliza resíduos de construção para preenchimento de valas sem camadas de proteção. Em relação ao monitoramento, não foram identificados sistemas formais contínuos em nenhum dos municípios. No Raso da Catarina (Petrolina), a remediação foi formalizada em 2025, integrando área de transbordo e lazer, embora persistam lacunas documentais sobre os ensaios geotécnicos de longo prazo executados.

3.5 Análise geotécnica

Para subsidiar a análise geotécnica e ambiental, foram elaborados mapas pedológicos e geológicos dos aterros sanitários de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. A caracterização identificou que o aterro de Petrolina se assenta sobre Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico, solos com limitações de infiltração e suscetibilidade erosiva. Já o aterro de Juazeiro situa-se em Planossolo Háplico, apresentando relevo plano e variações texturais que demandam atenção especial à drenagem e ao controle de líquidos.

Geologicamente, ambas as áreas integram a unidade Sobradinho–Remanso do embasamento cristalino, composta por ortognaisses de alta competência mecânica e resistência. Embora a baixa porosidade primária das rochas favoreça a estabilidade, o comportamento hidrogeológico é condicionado por fraturas e falhas, que podem atuar como vias de migração para lixiviados. Assim, a integração desses dados é crucial para o planejamento de medidas de impermeabilização e monitoramento ambiental.



Figura 2: Mapa Geológico e Pedológico das áreas dos aterros de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

3.5.1 Análise de risco e proposta de remediação

A avaliação dos riscos ambientais e geotécnicos associados às áreas de disposição e remediação de resíduos sólidos exige a análise integrada das condições pedológicas, geológicas e antrópicas. Nesse sentido, a Tabela 2 sintetiza os principais aspectos físicos e os riscos potenciais identificados nos aterros sanitários de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), bem como nas áreas remediadas do Parque do Povo e do Raso da Catarina, permitindo uma comparação objetiva entre os diferentes contextos.

Quadro 2. Resumo da análise de risco das áreas estudadas.

Área de Estudo	Análise Pedológica	Risco Pedológico	Análise Geológica	Risco Geológico
Aterro Sanitário de Petrolina - PE	Presença de Argissolo com horizonte A fraco e ocorrência de Neossolo Litólico raso e pedregoso, favorecendo infiltração inicial e contato rápido com o substrato rochoso	Moderado a elevado	Substrato cristalino TTG (Sobradinho–Remanso) com alta resistência, porém com fraturas que podem atuar como vias preferenciais de percolação	Baixo a moderado
Aterro controlado de Juazeiro - BA	Predominância de Planossolo com horizonte subsuperficial adensado, favorecendo fluxo lateral de lixiviados e proximidade de depósitos aluvionares	Elevado	Relevo plano a suave ondulado associado à saturação do solo e à presença de estruturas fraturadas no embasamento cristalino	Moderado
Parque do Povo	Solo urbano antropizado, heterogêneo e com histórico de disposição irregular de resíduos, aumentando a mobilização residual de contaminantes	Elevado	Substrato rochoso resistente, porém com heterogeneidades geotécnicas decorrentes de aterros, cortes e compactações irregulares	Baixo a moderado
Área de Transbordo	Alteração significativa das propriedades naturais do solo por uso antrópico e ausência de caracterização pedológica detalhada	Elevado	Condições semelhantes às do Parque do Povo, com possíveis recalques diferenciais e instabilidades superficiais localizadas	Baixo a moderado

Diante da ausência de registros técnicos sobre os processos de remediação executados, foram sistematizadas técnicas de remediação potencialmente aplicáveis às áreas passíveis de intervenção, especificamente o Raso da Catarina e o antigo lixão de Juazeiro (BA). A remediação de áreas contaminadas deve basear-se em avaliações de risco, considerando os receptores ambientais e humanos expostos.

A seleção das técnicas depende da caracterização do sítio, incluindo condições geotécnicas e hidrogeológicas, tipo e comportamento dos contaminantes, além da viabilidade técnica e econômica. De forma geral, as estratégias envolvem a restrição do uso do solo, a remoção ou tratamento dos contaminantes ou a redução de sua concentração e mobilidade. A Tabela 3 apresenta os indicativos de remediação recomendados para as áreas analisadas.

Tabela 3. Indicações de remediação para áreas estudadas.

Técnica/Medida proposta	Finalidade da técnica	Raso da Catarina	Área do antigo lixão de Juazeiro - BA
Encapsulamento	Isolar a massa de resíduos, impedir	X	X

geotécnico e cobertura final	infiltração de águas pluviais, reduzir geração de chorume, evitar liberação de gases e garantir segurança ao novo uso da área		
Controle e tratamento de gases (SVE)	Extrair e tratar gases gerados pela decomposição da matéria orgânica (ex.: metano e VOCs), reduzindo riscos ambientais e à saúde	X	
Biorremediação / Atenuação Natural Monitorada (ANM)	Reduzir, ao longo do tempo, possíveis contaminações residuais em águas subterrâneas por processos naturais controlados e monitorados	X	X
Contenção da pluma de contaminação (Barreira hidráulica ou Bombeamento e Tratamento)	Conter e tratar águas subterrâneas contaminadas, evitando a migração da pluma em direção aos corpos d'água		X
Barreiras Reativas Permeáveis (BRP)	Tratamento passivo dos contaminantes por degradação, adsorção ou imobilização ao longo do fluxo subterrâneo		X
Melhoria das coberturas do aterro controlado	Reduzir infiltração de água da chuva, minimizar geração de chorume e compensar limitações operacionais do sistema existente		X

3.6 Proposta de monitoramento

Apesar de Petrolina operar um aterro sanitário com padrão tecnológico mais avançado e Juazeiro dispor apenas de um aterro controlado, ambos os municípios apresentam uma fragilidade comum: a ausência de monitoramento geotécnico e ambiental sistemático. Em Juazeiro, essa deficiência é mais crítica, uma vez que não há informações públicas sobre as características geotécnicas do aterro e a inexistência de balança rodoviária compromete o controle quantitativo dos resíduos, realizado de forma manual e declaratória pelos próprios geradores. Em ambos os casos, a carência de monitoramento e de recursos técnicos impede a avaliação contínua da segurança do maciço, a estimativa da vida útil dos aterros e a identificação precoce de falhas nos sistemas de drenagem e impermeabilização, essenciais para a proteção do meio ambiente. Dessa forma, torna-se necessária a adoção de um plano de monitoramento adaptado às realidades locais, capaz de suprir a ausência de dados primários e subsidiar medidas preventivas e corretivas.

Desta maneira, foi sistematizado a Tabela 4 com a indicação de quais tipos de monitoramento cada área estudada poderia ser submetida.

Tabela 4. Indicações de monitoramento para áreas estudadas.

Monitoramento	Finalidade	Frequência	Raso da Catarina	Aterro Controlado (Juazeiro - BA)	Aterro Sanitário (Petrolina - PE)
Recalques Superficiais (Placas)	Medir deslocamento vertical total; garantir a integridade de pistas e quadras e estimar vida útil.	Semanal	X	X	X
Recalques em Profundidade	Localizar áreas de maior compressão e entender a evolução da decomposição orgânica.	Quinzenal		X	X
Inspeções de Campo (Visual)	Detectar sinais de instabilidade como trincas, fissuras, afundamentos e erosões.	Diária/ Semanal	X	X	X

Temperatura Interna	Monitorar o estágio de degradação biológica e seu impacto no recalque.	Semanal		X	X
Piezômetros (Pressão Neutra)	Monitorar o nível de chorume e evitar pressões excessivas que causem deslizamentos.	Semanal	X	X	X
Emissões Fugitivas (Gases)	Verificar fugas de biogás pela cobertura para evitar explosões e emissão de GEE.	Quinzenal	X	X	X
Qualidade e Quantidade do Gás	Acompanhar o potencial energético e a pressão interna nos drenos.	Quinzenal		X	X
Águas Subterrâneas (Poços)	Verificar contaminação por metais pesados e efluentes, protegendo o aquífero.	Bimestral a Quadrimestral	X	X	X
Águas Superficiais	Monitorar impactos em rios e riachos vizinhos (essencial pela proximidade ao Rio S. Francisco).	Bimestral a Trimestral		X	X
Qualidade do Ar e Ruído	Avaliar a poluição do ar e a pressão sonora (ruído) no entorno.	Mensal		X	X
Sondagens e Ensaios Geotécnicos	Coletar amostras de lixo/solo para definir propriedades de resistência e permeabilidade (Investigação Inicial).	Inicial / Conforme Demanda	X	X	X
Manutenção da Cobertura	Garantir a cobertura vegetal e drenagem pluvial para evitar infiltrações e erosão.	Constante	X	X	X

4 CONCLUSÃO

A análise comparativa entre Petrolina-PE e Juazeiro-BA revela que, embora ambos os municípios tenham avançado na transição de lixões para aterros, persistem disparidades técnicas e operacionais significativas que comprometem a plena eficiência da gestão de resíduos sólidos. Petrolina demonstra um estágio tecnológico superior ao operar um aterro sanitário com pesagem automatizada e aproveitamento energético de biogás, enquanto Juazeiro ainda utiliza um aterro controlado com monitoramento quantitativo manual e declaratório. Ambos os centros urbanos apresentam índices de sustentabilidade insatisfatórios, evidenciando dificuldades na consolidação da coleta seletiva e na inclusão socioprodutiva de catadores.

O estudo diagnóstico aponta uma vulnerabilidade crítica comum: a ausência de sistemas formais e contínuos de monitoramento geotécnico e ambiental. As características do meio físico, como a presença de solos com horizonte A fraco em Petrolina e o adensamento subsuperficial em Juazeiro, associadas ao substrato cristalino fraturado, elevam o risco de percolação de lixiviados e instabilidade dos maciços. Tais fatores reforçam a necessidade urgente de implementar planos de monitoramento sistemáticos, incluindo a medição de recalques e pressões neutras, para garantir a segurança estrutural das áreas e a preservação dos recursos hídricos do Rio São Francisco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. *Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana: ISLU 2024*. [S. l.]: ABREMA, 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.* Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

BRASIL. *Ministério das Cidades. Painel de Indicadores: resíduos sólidos.* 2025 [S. l.: s. n.], s.d. Disponível em: https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=residuos_solidos. Acesso: 15 jan 2026.

CTR PETROLINA. *Marcílio Augusto Duque Pacheco (Coord. Geral) et al. Relatório de Impacto Ambiental (RIMA): Implantação de Central de Tratamento de Resíduos Sólidos em Área Rural do Município de Petrolina.* Petrolina, PE: [s.n.], 2010.

FREITA, C. L. V. et al. *Reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD): um estudo de caso em usina de beneficiamento de resíduos em Petrolina-PE. Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA*, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 93–109, jan./abr. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Banco de Dados de Informações Ambientais – BDIA: mapas pedológicos e geológicos.* Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://bdiaweb.ibge.gov.br.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Cidades e Estados.* [Rio de Janeiro]: IBGE, s.d. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/.

OLIVEIRA, D. S. N. *Análise da geração de energia elétrica com biogás no aterro sanitário de Petrolina – PE.* 2019. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro-BA, 2019.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.236, de 13 de dezembro de 2010. *Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.* Recife: Assembleia Legislativa do Estado de Pernambuco, 2010.

PETROLINA (PE). Prefeitura Municipal. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS).* Petrolina, PE: Prefeitura Municipal de Petrolina, 2019.

RODRIGUES, A. da S. et al. *Implantação da compostagem no gerenciamento dos resíduos orgânicos de feiras e podas de árvores de Petrolina, PE.* In: EMBRAPA SEMIÁRIDO. Publicações. [S.l.]: Embrapa, [s.d.]. Disponível em: https://www.embrapa.br/semiarido/publicacoes. Acesso em: 10 set. 2025.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/90

ESTUDO COMPARATIVO DA MOBILIDADE DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM SOLOS LATERÍTICO E NÃO LATERÍTICO

Renata Conciani Nunes
Docente, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, reconciani@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante
Docente, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A contaminação dos solos e das águas subterrâneas constitui tema de crescente relevância, em razão da ampliação da conscientização ambiental e de sua recorrente abordagem nos meios de comunicação. Diversas pesquisas internacionais determinaram parâmetros de transporte de contaminantes em solos típicos de climas temperados, geralmente associados a comportamento não laterítico. No Brasil, embora existam várias publicações sobre o tema, o enfoque predominante recai sobre solos lateríticos. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo comparar os parâmetros de transporte obtidos por meio de ensaios em coluna, para os mesmos contaminantes e em condições similares, em um solo de comportamento laterítico e em outro de comportamento não laterítico. Ambos os solos foram submetidos a ensaios em coluna de parede flexível. Nos ensaios, utilizaram-se nitratos de quatro metais: cromo, chumbo, cádmio e cobre. A comparação dos dados experimentais das curvas de chegada permitiu identificar diferenças relevantes entre os solos. Observou-se dessorção evidente do cádmio no solo laterítico, comportamento não verificado no solo não laterítico. O cobre atingiu $c_w/c_0 = 1$ aos 40 volumes de poros em ambos os solos, mesmo após sofrer dessorção no solo laterítico. O cromo apresentou mobilidade muito baixa, não atingindo $c_w/c_0 = 1$ em nenhum dos solos; contudo, sua mobilidade foi maior no solo laterítico. A análise das concentrações dos metais no solo após a percolação indicou que o cromo foi o metal mais sorvido. O chumbo apresentou comportamento distinto nos dois solos, com retardo significativamente maior no solo laterítico, o que se evidencia pelo fato de que, nos ensaios com esse solo, o metal não atingiu $c_w/c_0 = 1$. Com base nas concentrações dos metais nas amostras ensaiadas, constatou-se maior mobilidade de todos os metais no solo laterítico. Os metais de maior mobilidade foram o cádmio e o cobre, enquanto o cromo apresentou a menor mobilidade em ambos os solos, fenômeno atribuído à sua elevada sorção. Esses resultados indicam que o solo laterítico apresentou maior capacidade de transporte dos metais ensaiados em comparação ao solo não laterítico, uma vez que, para um mesmo intervalo de tempo, as concentrações associadas ao transporte e à retenção dos metais diferiram entre os materiais analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação de solos, metais pesados, solos lateríticos, solos não-lateríticos, mobilidade de metais.

ABSTRACT: Soil and groundwater contamination has become an increasingly relevant topic due to growing environmental awareness and its frequent discussion in the media. Several international studies have determined contaminant transport parameters in soils typical of temperate climates, which generally exhibit non-lateritic behavior. In Brazil, although several studies have addressed this subject, most have focused on lateritic soils. In this context, the objective of this study is to compare transport parameters obtained from column tests, using the same contaminants and similar experimental conditions, in one soil with lateritic behavior and another with non-lateritic behavior. Both soils were subjected to flexible-wall column tests. Nitrates of four metals were used in the tests: chromium, lead, cadmium, and copper. The comparison of the experimental breakthrough curves revealed relevant differences between the two soils. Clear cadmium desorption was observed in the lateritic soil, whereas this behavior was not observed in the non-lateritic soil. Copper reached $c_w/c_0 = 1$ after 40 pore volumes in both soils, even after undergoing desorption in the lateritic soil. Chromium showed very low mobility and did not reach $c_w/c_0 = 1$ in either soil; however, its mobility was higher in the lateritic soil. The analysis of metal concentrations in the soil after percolation indicated that chromium was the most strongly sorbed metal. Lead exhibited distinct behavior in the two soils, with

significantly greater retardation in the lateritic soil, as evidenced by the fact that, in the tests with this soil, lead did not reach $c_w/c_0 = 1$. Based on the metal concentrations in the tested samples, all metals showed greater mobility in the lateritic soil. Cadmium and copper were the most mobile metals, whereas chromium showed the lowest mobility in both soils, a phenomenon attributed to its high sorption. These results indicate that the lateritic soil had a greater capacity to transport the tested metals than the non-lateritic soil, since, for the same time interval, the concentrations associated with metal transport and retention differed between the analyzed materials.

KEYWORDS: Soil contamination; heavy metals; lateritic soils; non-lateritic soils; metal mobility; contaminant transport.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Gusmão (2002), as principais formas de contaminação dos solos e das águas subterrâneas estão associadas a: locais projetados para a descarga de substâncias; locais destinados ao armazenamento, tratamento e/ou disposição de substâncias; áreas utilizadas para o transporte de substâncias; locais nos quais há descarga de substâncias como consequência de outras atividades; intervenções que induzem alterações no padrão de fluxo da água subterrânea, como poços de produção e escavações subterrâneas; e ocorrências naturais que podem ser influenciadas pela ação antrópica.

No Brasil, há diversas pesquisas publicadas sobre solos tropicais relacionadas à contaminação de solos e águas subterrâneas. Nesta pesquisa, o enfoque recai sobre estudos comparativos do transporte de contaminantes em solos lateríticos e não lateríticos. Até o momento, os ensaios de contaminação de solos ainda não se encontram normatizados por órgãos brasileiros. Embora existam numerosos trabalhos envolvendo ensaios em coluna com solos de regiões temperadas e também com solos tropicais, muitos deles realizados no Brasil, não foram encontrados estudos comparativos em coluna entre solos lateríticos e não lateríticos.
Portanto, considerando a relevância do meio ambiente para a sociedade, especialmente para as populações futuras, bem como as dificuldades técnicas ainda existentes quanto à compreensão do comportamento das plumas de contaminação, a presente pesquisa busca contribuir para o aprofundamento do entendimento do transporte de contaminantes em solos tropicais lateríticos e não lateríticos.

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar a mobilidade dos metais cádmio, cobre, chumbo e cromo, determinada por meio de ensaios em coluna de parede flexível, empregando solução multiespécie preparada com nitratos desses metais, em amostras de solos laterítico e não laterítico.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foram definidos dois locais para a coleta dos materiais em estudo, correspondentes a um solo não laterítico e a um solo laterítico, contituindo duas amostras. O primeiro local escolhido foi a cidade de Brasília, Distrito Federal, onde se localiza a Universidade de Brasília, cuja rocha mãe é adósia. O segundo local foi a cidade de Rio Paranaíba, em Minas Gerais, onde se localiza um campus da Universidade Federal de Viçosa, cuja rocha mãe é formada pelo embasamento metamórfico da faixa de Dobramentos de Brasília.

No Distrito Federal, predominam latossolos vermelho-escuros e vermelho-amarelos, além de cambissolos em ocorrência secundária. Sondagens realizadas na região do Plano Piloto e em suas proximidades indicam a presença de um manto intemperizado sobre a rocha matriz, constituída por ardósia, situado a profundidades de aproximadamente 10 a 20 m na Asa Sul e de até 10 m na Asa Norte. Assim, pode-se afirmar que os solos predominantes no Distrito Federal são, em sua maioria, lateríticos. Apesar dessa predominância, não é incomum encontrar afloramentos rochosos e cortes nos quais ocorrem solos não lateríticos, como observado em um corte localizado no Setor Noroeste de Brasília. Nessa região, predominam rochas do Grupo Paranoá, com menor grau de metamorfismo, além de alternância de estratos de quartzitos de granulometria fina a média, metassiltitos argilosos, metarritmitos arenosos, metarritmitos argilosos e ardósias. Nesse talude, observou-se uma divisão bastante clara dos horizontes. Na camada superficial, identifica-se um aterro de solo arenoso, sotoposto por uma camada de latossolo vermelho. Na base do talude, encontra-se o solo não laterítico utilizado nesta pesquisa.

O município de Rio Paranaíba está situado no estado de Minas Gerais, a aproximadamente 350 km de Belo Horizonte, na região entre o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba. De acordo com o Mapa de Solos de Minas Gerais, o município está localizado em área de ocorrência de cambissolo háplico distrófico; contudo, há uma região circundante à sede municipal composta por latossolo vermelho distrófico. O solo utilizado foi coletado nas proximidades do laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba.

2.1 Classificação dos Solos

A escolha das amostras submetidas aos ensaios em coluna foi realizada com base na metodologia MCT expedita, também conhecida como método das pastilhas para classificação dos solos. Foram coletadas amostras nos dois locais de estudo e, posteriormente, realizada a classificação MCT, a fim de identificar os materiais com comportamento laterítico e não laterítico, contituindo-se, dessa forma, duas amostras com fins comparativos.

Foram realizados ensaios de limite de liquidez, segundo a NBR 6459; limite de plasticidade, segundo a NBR 7180; análise granulométrica, segundo a NBR 7181; determinação da massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, conforme a NBR 6508; e determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática, conforme a NBR 10838. A curva granulométrica foi determinada seguindo os procedimentos da NBR 7181. A determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s) segui a NBR 6508. A massa específica natural do solo (ρ_n) foi obtida pela relação entre a massa total e o volume total, conforme o método da balança hidrostática, padronizado pela NBR 10838 (ABNT, 1988). Foram realizadas análises químicas em ambas as amostras, correspondentes ao solo laterítico e ao solo não laterítico, apenas em sua condição natural. Assim, não foram realizadas análises químicas nas amostras submetidas aos ensaios em coluna.

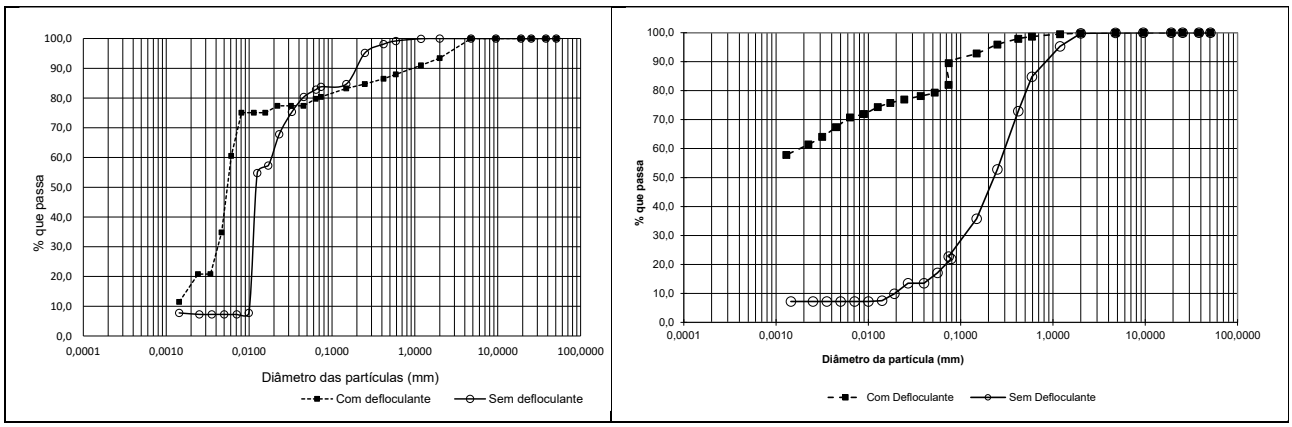


Figura 1 – Curvas granulométricas: solo não laterítico (MG) e solo laterítico (DF).

2.2 Ensaio em coluna

O equipamento utilizado no ensaio em coluna foi do tipo membrana flexível, com pressão de confinamento de 100 kPa. Esse valor de tensão foi estimado com base na profundidade em que a amostra se situava no perfil de solo e foi mantido constante até o final do ensaio.

A solução contaminante foi preparada com concentração de 10 mg/L para todos os metais, utilizando-se fluxo ascendente. O contaminante foi acondicionado em frascos de Mariotte, dos quais percolava para a entrada do corpo de prova (CP). Havia um frasco de Mariotte para cada corpo de prova. Em cada ensaio, todos os CPs foram submetidos ao mesmo gradiente hidráulico, de 10,3 para os corpos de prova de solo laterítico e de 23,2 para os de solo não laterítico. Esse foi o único parâmetro distinto entre os dois solos, sendo necessário em razão da baixa permeabilidade dos corpos de prova não lateríticos, uma vez que a velocidade do ensaio justificou a diferença entre os gradientes. Os corpos de prova foram moldados com 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, a partir de amostras indeformadas, na umidade em que o material se encontrava no momento da coleta. O diâmetro foi limitado pelo equipamento utilizado, enquanto a altura foi definida com o objetivo de

otimizar o tempo de ensaio. A câmara comportava quatro corpos de prova simultaneamente. Cada corpo de prova foi moldado com aproximadamente 5,0 cm de altura e envolto por membrana impermeável de borracha. A câmara do ensaio era preenchida com água de abastecimento e, antes do início do ensaio, aplicava-se pressão de 100 kPa por meio de ar comprimido.

A solução contaminante foi preparada com nitratos de cromo, cádmio, chumbo e cobre, todos com concentração metálica de 10 mg/L, diluídos em água destilada e preparados pouco antes do início do ensaio. A determinação da concentração dos contaminantes no efluente foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica. A análise baseou-se nos resultados experimentais, nos quais a concentração relativa medida nos ensaios em coluna $(c_w/c_0)_m$ foi plotada em função do volume de poros percolado. A mobilidade foi avaliada por meio da análise das curvas de chegada.

Foi necessária uma caracterização adequada do domínio, especialmente quanto à determinação dos índices físicos do material, como porosidade (n), massa específica seca do solo (ρ_d) e grau de saturação (S_r), bem como de suas propriedades hidráulicas, incluindo a condutividade hidráulica do solo (k) e as velocidades médias de percolação (v_p). A ausência de caracterização adequada do material pode resultar em um modelo calibrado para um conjunto de condições não representativas das condições reais. O processo de calibração foi necessário para reduzir a variabilidade dos dados iniciais do modelo, permitindo a determinação dos parâmetros de transporte: fator de retardo (R) e coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h).

Bear & Cheng (2010) recomendam utilizar um procedimento de solução inversa com o qual se obtém a solução ótima, reduzindo ao mínimo a soma dos quadrados dos erros entre as concentrações relativas medidas e as calculadas teoricamente. Esta solução inversa é conhecida como Minimização por Mínimos Quadrados e a formulação é dada por:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[\left(c_w/c_0\right)_m - \left(c_w/c_0\right)_c \right]^2 \tag{1}$$

em que E representa o erro acumulado, correspondente à soma dos quadrados das diferenças entre a concentração relativa calculada $(c_w/c_0)c$ e a concentração relativa medida $(c_w/c_0)m$, para n medições. O processo de calibração foi executado a partir da solução analítica unidimensional proposta por Ogata & Banks (1961):

$$c_w(x,t) = \frac{c_0}{2}\left[e^{\frac{v_{pluma}}{D_{pluma}}x} \operatorname{erfc}\left(\frac{x + v_{pluma}t}{2\sqrt{D_{pluma}t}} \right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x - v_{pluma}t}{2\sqrt{D_{pluma}t}} \right) \right] \tag{2}$$

Onde

$$v_{pluma} = \frac{v_p}{R} \tag{3}$$

$$D_{pluma} = \frac{D_h}{R} \tag{4}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise granulométrica, observou-se que, no caso do solo não laterítico, o uso de defloculante pouco alterou o formato da curva, fato evidenciado pela proximidade entre as curvas. Esse comportamento indica que o solo continuou apresentando textura siltosa mesmo após a desagregação. Para o solo laterítico, por sua vez, o uso de defloculante alterou de forma evidente a textura do material, conforme indicado pelo afastamento entre as curvas granulométricas.

De acordo com a Classificação Rodoviária (TRB-HRB), o solo pertencente à classe A-4 é classificado como siltoso, não plástico ou moderadamente plástico. Já os solos da classe A-7, nessa metodologia, correspondem a misturas argilo-arenosas com alto limite de liquidez. Entretanto, observa-se que nenhum dos dois solos apresentou limite de liquidez elevado (> 50%), o que sugere baixa propensão a grandes variações volumétricas. Ambos apresentaram índice de atividade inferior a 0,75. Na classificação SUCS, os solos CL correspondem a argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade, bem como a argilas arenosas, enquanto os solos ML são siltes inorgânicos de baixa plasticidade. Com base no método MCT de classificação dos solos, a amostra coletada em Rio Paranaíba apresentou comportamento laterítico, com valores de c' = 1,22 e

penetração = 0,0 mm, sendo classificada como LA', isto é, arenosa laterítica. A amostra coletada no Setor Noroeste de Brasília apresentou comportamento não laterítico, com valores de c' = 1,4 e penetração = 2,1 mm, sendo classificada como NA'/NG'-NS'.

A análise química indicou elevada quantidade de cátions, com exceção do magnésio no solo laterítico. O elemento que mais se destacou foi o potássio, presente em maior quantidade em ambos os solos quando comparado aos demais elementos. A capacidade de troca catiônica do solo não laterítico é baixa, enquanto a do solo laterítico é elevada. Quanto maior a capacidade de troca catiônica, maior a facilidade com que os cátions podem ser trocados ou substituídos, uma vez que as ligações são reversíveis e podem ocorrer tanto da superfície da partícula para a solução do solo quanto no sentido inverso. Assim, sob esse aspecto, o solo laterítico apresenta maior capacidade tanto de sorção quanto de dessorção. Outro fator relacionado à capacidade de troca catiônica é o teor de matéria orgânica, diretamente proporcional a essa propriedade. Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos: baixa CTC e baixo teor de matéria orgânica no solo não laterítico, e elevados CTC e teor de matéria orgânica no solo laterítico. Quanto aos valores de pH, os resultados indicam características fracamente ácidas. O pH pode influenciar o tipo de reação entre o solo e o contaminante, sobretudo por afetar a solubilidade de elementos como ferro e alumínio. Contudo, na faixa de pH observada, não se espera alteração significativa na solubilidade desses elementos. A quantificação dos metais pesados (Cu, Mn, Fe, Zn, Cr, Ni, Cd e Pb) indica que ambos os solos não estão contaminados, uma vez que suas concentrações não restringem o uso do solo e permanecem abaixo dos critérios de qualidade estabelecidos pelo CONAMA.

3.1 Resultados dos Ensaios em coluna

Inicialmente, para o solo não laterítico, observa-se na Figura 2 que a permeabilidade medida dos corpos de prova variou entre 2×10^{-6} cm/s e 5×10^{-6} cm/s. Dessa forma, adotou-se, para fins de ajuste, o valor médio correspondente a cada corpo de prova. A estimativa foi realizada com base nas medições obtidas durante a fase de percolação do contaminante no ensaio em coluna. No lado direito da Figura 2, são apresentadas as curvas de chegada de cada metal estudado para o Corpo de Prova 4 (CP4). Nesse gráfico, o eixo das abscissas indica o volume de poros percolado, enquanto o eixo das ordenadas representa a concentração normalizada (c_w/c_0), isto é, a razão entre a concentração final, coletada após a percolação pelo corpo de prova (c_w), e a concentração inicial, antes da passagem pelo solo (c_0).

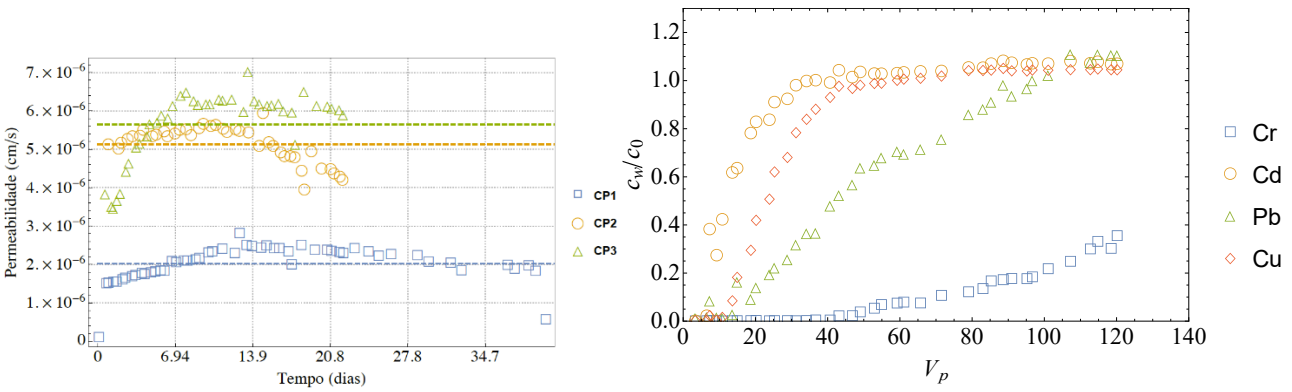


Figura 2 – Variação da permeabilidade com o tempo e curvas de chegada do CP4.

Nos três corpos de prova (CP2, CP3 e CP4), os metais apresentaram comportamentos semelhantes. As curvas do cádmio (Cd) e do cobre (Cu) mostraram formas próximas, indicando comportamentos análogos. Para esses metais, a concentração final igualou-se à concentração inicial após aproximadamente 40 volumes de poros percolados. Nos três corpos de prova, a curva de chegada do chumbo (Pb) indicou menor mobilidade em relação ao cádmio (Cd) e ao cobre (Cu), porém maior mobilidade que o cromo (Cr). Nesse caso, c_w/c_0 atingiu valor unitário somente após a percolação de 100 volumes de poros, evidenciando retardo mais elevado que o observado para cádmio e cobre. Considerou-se que os resultados obtidos nos três ensaios foram satisfatórios, uma vez que apresentaram comportamentos físico-químicos semelhantes entre os metais analisados.

Para a determinação dos parâmetros de transporte, isto é, do coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h) e do fator de retardo (R), utilizou-se o procedimento descrito na metodologia. As curvas de chegada obtidas experimentalmente foram ajustadas a partir do modelo proposto por Ogata & Banks (1961), considerando-se o método dos mínimos quadrados para a minimização dos erros. Com o conhecimento da velocidade média de percolação e da espessura percolada em cada ensaio, aplicou-se o modelo clássico de transporte de contaminantes para calcular a concentração relativa que mais se aproximava da concentração relativa experimental. Representando-se o erro pelo quadrado da diferença entre as concentrações relativas, iniciou-se um processo iterativo de tentativas até a obtenção do menor erro. Com o uso do software Wolfram Mathematica® (Wolfram Research, 2015), foi programado o algoritmo responsável por otimizar os parâmetros — coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardo — e minimizar o erro. As soluções obtidas são apresentadas na Figura 3 para cada corpo de prova (CP2, CP3 e CP4) e para cada metal (cromo, cádmio, chumbo e cobre). Em seguida, realizou-se análise estatística dos parâmetros ajustados para o solo não laterítico, com o objetivo de comparar a mobilidade dos metais ensaiados por meio das curvas de chegada teóricas e dos parâmetros médios ajustados. A partir dos dados de velocidade de percolação e da espessura de solo ensaiada, calculou-se a média amostral entre os valores dos corpos de prova. Para o coeficiente de dispersão e o fator de retardo, a média amostral foi obtida para cada metal, considerando os três corpos de prova de cada tipo de solo. Apenas no caso específico do cromo, em razão do elevado desvio em relação aos demais resultados, o coeficiente de dispersão ajustado para o CP3 e os fatores de retardo ajustados dos CP2 e CP3 foram desconsiderados no cálculo da média amostral.

Para o solo laterítico, foram realizadas as mesmas análises aplicadas ao solo não laterítico. Os resultados das análises estatísticas de mobilidade, obtidos a partir das curvas de chegada teóricas de ambas as amostras, são apresentados na Figura 3.

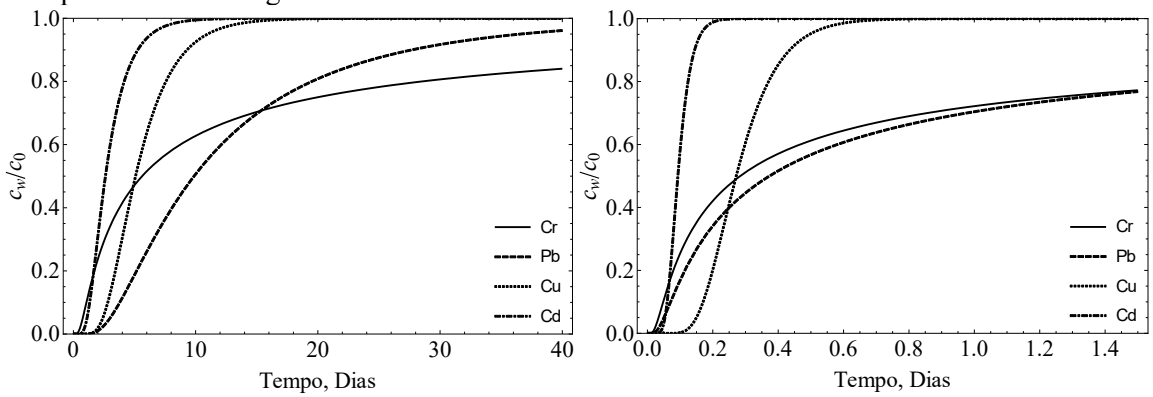


Figura 3 - Análise estatística de mobilidade das curvas de chegada teóricas com solo não-laterítico (lado esquerdo) e solo laterítico (lado direito).

4. CONCLUSÕES

A comparação dos dados experimentais das curvas de chegada dos solos laterítico e não laterítico permitiu identificar as seguintes diferenças principais:

- Observou-se maior dessorção do cádmio no solo laterítico, comportamento não verificado no solo não laterítico.
- O cromo apresentou mobilidade muito baixa, não atingindo $c_w/c_0 = 1$ em nenhum dos dois tipos de solo; contudo, sua mobilidade foi maior no solo laterítico. Posteriormente, observou-se que esse foi o metal mais sorvido pelo solo não laterítico, com base na análise da concentração do contaminante nesse material.
- O chumbo apresentou comportamento distinto em ambos os solos, com retardo significativamente maior no solo não laterítico. Essa conclusão decorre da observação de que, nos ensaios com solo laterítico, o chumbo não atingiu $c_w/c_0 = 1$.

A distribuição de poros varia entre os tipos de solo em função de seu processo de formação e do grau de laterização. Na formação dos solos lateríticos, ocorre intenso processo de eluviação, que gera canais preferenciais bem desenvolvidos, aumenta a porosidade e, consequentemente, a velocidade de fluxo, favorecendo a dispersão hidrodinâmica. A maior intemperização desses solos também resulta em maior complexidade na estrutura dos vazios, o que aumenta a dispersividade do transporte de contaminantes e

favorece o espalhamento do soluto. A dispersão hidrodinâmica é ainda influenciada por uma parcela difusiva, também condicionada pela tortuosidade do meio, o que pode acelerar o fenômeno dispersivo no solo laterítico.

Com base na análise estatística das curvas de chegada teóricas, obtidas com o uso da média amostral dos parâmetros ajustados para os solos laterítico e não laterítico, conclui-se que:

- O cádmio (Cd) foi o primeiro metal a alcançar, na saída, a concentração de entrada c_0, o que ocorreu em poucas horas no solo laterítico e em cerca de 10 dias no solo não laterítico.
- O cobre (Cu) foi o segundo metal a alcançar a concentração de entrada no efluente, tanto no solo laterítico quanto no não laterítico. Esse comportamento ocorreu em poucas horas no solo laterítico e em aproximadamente 15 dias no solo não laterítico.
- O cromo (Cr) e o chumbo (Pb) apresentaram menor mobilidade em ambos os tipos de solo. No solo laterítico, a diferença entre eles foi pequena, enquanto, no solo não laterítico, essa diferença foi mais evidente, com maior mobilidade do chumbo. Em nenhum dos dois solos esses metais alcançaram a concentração de entrada.

A comparação das curvas teóricas obtidas por meio do tratamento estatístico dos parâmetros ajustados para cada metal, nos solos laterítico e não laterítico, evidenciou que:

- Todos os metais apresentaram maior mobilidade no solo laterítico.
- Os metais com maior mobilidade foram o cádmio e o cobre, em ambos os solos.
- O cromo foi o metal de menor mobilidade nos dois tipos de solo, fenômeno explicado por sua elevada sorção.

Esses resultados podem ser atribuídos ao fato de que o solo não laterítico apresentou menor velocidade de transporte dos metais ensaiados em comparação ao solo laterítico. Para um mesmo intervalo de tempo, a concentração no efluente dos ensaios realizados com solo não laterítico foi inferior à observada nos ensaios com solo laterítico. Esse comportamento está relacionado à própria velocidade de percolação do líquido no meio, uma vez que o solo laterítico é mais permeável que o não laterítico, favorecendo maior advecção e dispersão mecânica das partículas no solo laterítico.

Com base na teoria de sorção apresentada na revisão bibliográfica, a ordem de preferência de sorção entre os metais estudados foi: Cr < Pb < Cu < Cd. O Cr foi o metal mais sorvido no solo, o que pode ser justificado por sua maior valência (+3) em relação aos demais metais (+2). A maior preferência de sorção do Pb em relação ao Cu pode ser explicada por sua maior eletronegatividade. O Pb também apresenta maior afinidade de sorção em relação ao Cu, e ambos os metais tendem a formar complexos de esfera interna. De acordo com a revisão bibliográfica, o Cd teria maior preferência de sorção em relação ao Cu com base na ligação eletrostática; entretanto, esse comportamento não foi observado nesta pesquisa.

Em suma, a principal dificuldade na comparação dos parâmetros de transporte de contaminantes em solos distintos reside nas diferenças entre suas propriedades. Nesta pesquisa, buscou-se manter as mesmas condições experimentais, incluindo solução contaminante, concentração inicial, dimensões da amostra e tensão de confinamento. Entretanto, as porosidades das amostras variaram conforme o tipo de material. Outro fator que dificulta a comparação é a mineralogia do solo, que exerce influência significativa sobre as interações químicas e, consequentemente, sobre a interação com o contaminante. Espera-se que esta pesquisa contribua para a compreensão de problemas ambientais envolvendo metais pesados como contaminantes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6502: Solos e rochas — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10838**:** Solo — Determinação de massa específica aparente de amostra indeformada **com** emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras** de **solo** — Preparação para **ensaios de compactação e ensaios** de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508**:** Grãos de solo que passam na **peneira** de 4,**8 mm — Determinação** da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BEAR, J.; CHENG, A. H.-D. **Modeling groundwater flow and contaminant transport**. New York: Springer, 2010.

CHOUDHURY, B. N.; GOSWAMI, D. Chemical characteristics of leachate contaminated lateritic soil. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, v. 2, n. 4, 2013.

GUSMÃO, A. **Águas subterrâneas: aspectos de contaminação e remediação**. Recife: EDUPE, 2002. 193 p.

IJIMDIYA, T. S. The effects of oil contamination on the consolidation properties of lateritic soil. Development and Applications of Oceanic Engineering, v. 2, n. 2, maio 2013.

NAYAK, S.; SUNIL, B. M.; SHRIHARI, S. Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. Engineering Geology, v. 106, n. 1–2, p. 20–25, 2009.

OGATA, A.; BANKS, R. B. Solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, n. 411-A, p. 1–7, 1961.

ONYELOWE, K. C. Pure crude oil contamination on Amaoba lateritic soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, 2015.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/91

Estudo da Influência da Adição de Adubo Orgânico em um Solo Utilizado como Camada de Cobertura de um Aterro Sanitário

Laura Falcão Pereira Costa
Engenheira Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laurafpc04@gmail.com

Laís Roberta Galdino de Oliveira
Professora Adjunto, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

Lana Kainy Torres Souza
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, lana.torres@discente.ufg.br

RESUMO: As camadas de cobertura de aterros sanitários têm como finalidade reduzir a infiltração de águas pluviais e minimizar a emissão de gases de efeito estufa oriundos da decomposição dos resíduos aterrados, sendo frequentemente compostas por solo local. Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivo avaliar a influência da utilização de adubo orgânico como material alternativo em camadas de cobertura de um aterro sanitário. O trabalho comparou as características geotécnicas do solo puro e as características geotécnicas da mistura solo-adubo, na proporção 1,5:1 (solo: adubo) em massa. Foram realizados ensaios de massa específica dos grãos, limites de liquidez e de plasticidade, análise granulométrica e compactação, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Os resultados indicaram uma redução da massa específica dos grãos, aumento do limite de liquidez, intensificação da característica não plástica, aumento da umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca em comparação com o solo proveniente da jazida. Dessa forma, a utilização do adubo orgânico em camadas de cobertura de aterros sanitários constitui uma alternativa para a destinação dos resíduos orgânicos e contribuir para a redução da extração de solo natural para o recobrimento dos resíduos sólidos.

PALAVRAS-CHAVE: Destinação Final, Resíduos Sólidos, Caracterização Geotécnica, Camada Oxidativa.

ABSTRACT: Landfill cover layers are designed to reduce rainwater infiltration and minimize greenhouse gas emissions resulting from the decomposition of buried waste, and are often composed of locally available soil. In this context, the present study aimed to evaluate the influence of using organic compost as an alternative material in landfill cover layers. The study compared the geotechnical properties of natural soil with those of a soil–compost mixture at a mass ratio of 1.5:1 (soil). Tests were conducted to determine specific gravity of soil particles, liquid limit, plastic limit, grain size distribution, and compaction characteristics, in accordance with the standards established by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The results indicated a reduction in the specific gravity of soil particles, an increase in the liquid limit, an enhancement of the non-plastic behavior, an increase in the optimum moisture content, and a decrease in the maximum dry density when compared to the borrow soil. Therefore, the use of organic compost in landfill cover layers represents an alternative for the disposal of organic waste and contributes to reducing the extraction of natural soil for solid waste cover applications.

KEYWORDS: final destination, solid waste, geotechnical characterization, oxidative layer.

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduo sólido se tornou, ao longo do tempo, um atípico indicador de desenvolvimento econômico de uma nação, isso porque o consumismo e a obsolescência programada contribuem para uma geração de resíduos exacerbada (Silva et al., 2023).

De acordo com a Lei nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), a destinação ambientalmente adequada de resíduos sólidos se dá a partir da disposição final ordenada de rejeitos em aterros sanitários, sendo assim, necessário uma pré destinação que vise a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético dos resíduos, visando não sobrecarregar os aterros e melhor aproveitar os resíduos.

Assim, os aterros sanitários podem ser definidos como uma técnica de disposição de resíduos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais (ABNT, 1992). Um aterro sanitário é composto por várias estruturas que visam garantir sua eficiência, como o sistema de camadas de cobertura, que é imprescindível ao seu funcionamento por minimizar o movimento de líquidos e/ou gases entre o ambiente externo e o interior das células de resíduos (Paulino, 2016).

Desta forma, a escolha dos materiais a serem utilizados nas coberturas dos aterros é de extrema importância, uma vez que está diretamente ligada à qualidade do aterro, das camadas e do preço. Os aterros sanitários demandam grande quantidade de material de cobertura, levando a exploração de jazidas de solo a um custo alto para suprir essa alta demanda (Santos, 2019). Nesse sentido, a pesquisa por novos materiais que minimizem os impactos da exploração de jazidas de solos naturais e reutilizem resíduos urbanos pode apresentar soluções viáveis do ponto de vista econômico, técnico e ambiental (Costa, 2015).

O adubo orgânico, especificamente, vem sendo amplamente estudado, pois quando utilizado em camadas de cobertura altera as propriedades específicas do solo, além de possibilitar o aproveitamento e valorização de resíduos, que podem ser compostados e adicionados ao solo como biocoberturas (Santos, 2019). Eles podem carregar bactérias adequadas para o controle da emissão de metano para a atmosfera, despontando como alternativa economicamente atraente para o tratamento de emissões fugitivas de CH_4 em aterros sanitários (Monteiro, 2016).

Dessa forma, a utilização do adubo orgânico em camadas de cobertura de Aterros Sanitários fornece uma alternativa para a destinação dos resíduos orgânicos e contribui com a diminuição de extração de solo natural para o recobrimento dos resíduos sólidos urbanos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste artigo foram necessários dois materiais, sendo eles: o solo utilizado como camada de cobertura de um aterro sanitário e um Adubo orgânico comercializado em floriculturas. A metodologia, por sua vez, seguiu as etapas de coleta das amostras de solo e adubo orgânico; preparo da mistura de solo e adubo orgânico; e caracterização geotécnica.

O solo utilizado na pesquisa foi cedido por um aterro sanitário localizado em Aparecida de Goiânia – GO, sendo este solo usado para a realização das camadas de cobertura diárias, intermediárias e finais. Assim, foi coletado aproximadamenre 400 kg de solo, de acordo com a norma NBR 9604 (ABNT, 2016a), visando à realização de diversas pesquisas com esse mesmo material.

O solo foi coletado na superfície do terreno, onde é armazenado o solo oriundo do preparo de áreas para a disposição final dos resíduos sólidos recebidos no aterro sanitário, sendo desprezado cerca de 5 cm, devido a possibilidade de lixiviação de partículas finas. A coleta da amostra foi realizada com o auxílio de uma pá, desta forma, conserva os constituintes minerais do solo, mas não sua estrutura original (TAYLOR, 1948).

O adubo orgânico, chamado de terra carbono, subtrato orgânico cuja produção foi inspirada no estudo e no conhecimento da Terra Preta dos Povos Indígenas, foi adquirido em uma quantidade de 150L.

Conforme informações fornecidas no rótulo da “Terra Carbono” da Cerrado Alimentos Orgânicos, o adubo orgânico em questão é formado pelo enriquecimento de pó de carvão com microrganismos eficazes, em específico a água de puba de mandioca e urina de vaca. Ainda conforme o rótulo, posteriormente esse carvão é misturado com esterco, matéria orgânica, Yoorin (fertilizante fosfatado) e pó de rocha e, em seguida, passa por uma fermentação anaeróbica de 3 meses em valas.

As amostras de solo e do adubo orgânico passaram primeiramente pelo processo de secagem ao ar e destorroamento, e posteriormente foi feito a separação da quantidade de material necessário para caracterização do solo e da mistura.

A mistura de solo e adubo orgânico foi feita na proporção de 1,5:1 (solo:composto) em massa, tendo em vista o estudo de LIRA (2017), que utilizou as proporções de 2:1 e 1:1 (solo:composto), por considerá-las

potencialmente adequadas para uso em camadas de cobertura para aterros. Sendo assim, no presente estudo utilizou-se a média das proporções da autora supracitada.

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG). O solo e a mistura solo adubo foram caracterizados separadamente. A preparação das amostras seguiram a orientação da NBR 6457 (ABNT, 2016b) e os ensaios realizados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Ensaios geotécnicos realizados

Ensaio	Norma	Informações Complementares
Massa específica dos grãos	ABNT NBR 6458 (ABNT, 2016c)	-
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459 (ABNT, 2017)	-
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180 (2025)	-
Análise Granulométrica	ABNT NBR 7181 (2016d)	Na mistura solo-adubo foi necessário fazer a separação do material boiante do material não boiante no momento de lavagem da parte retina na peneira de 2,0 mm. Uma vez que a matéria orgânica presente no adubo boiava. Assim a matéria orgânica foi levada a estufa de 60º e a mistura não boiante foi levada a estufa de 205º até a constância de massa.
Compactação	ABNT NBR 7182 (2016e)	Realizado com energia de Proctor normal, cilindro pequeno e sem reuso de material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta de forma resumida os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica e na Figura 1 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica do solo e da mistura.

Tabela 1. Resultados da caracterização geotécnica

Ensaio	Solo	Mistura solo-adubo
Massa específica dos grãos	2,71 g/cm³	2,56 g/cm³
Limite de Liquidez (LL)	38	44
Limite de Plasticidade (LP)	NP	NP
Índice de plasticidade (IP)	NP	NP
Análise Granulométrica (SUCS)	ML	OL
Compactação	Umidade ótima: 22,23 %	Umidade ótima: 33,76 %
	$\rho_{d\ máx}$ =19,20 kN/m³	$\rho_{d\ máx}$ = 16,85 kg/m³

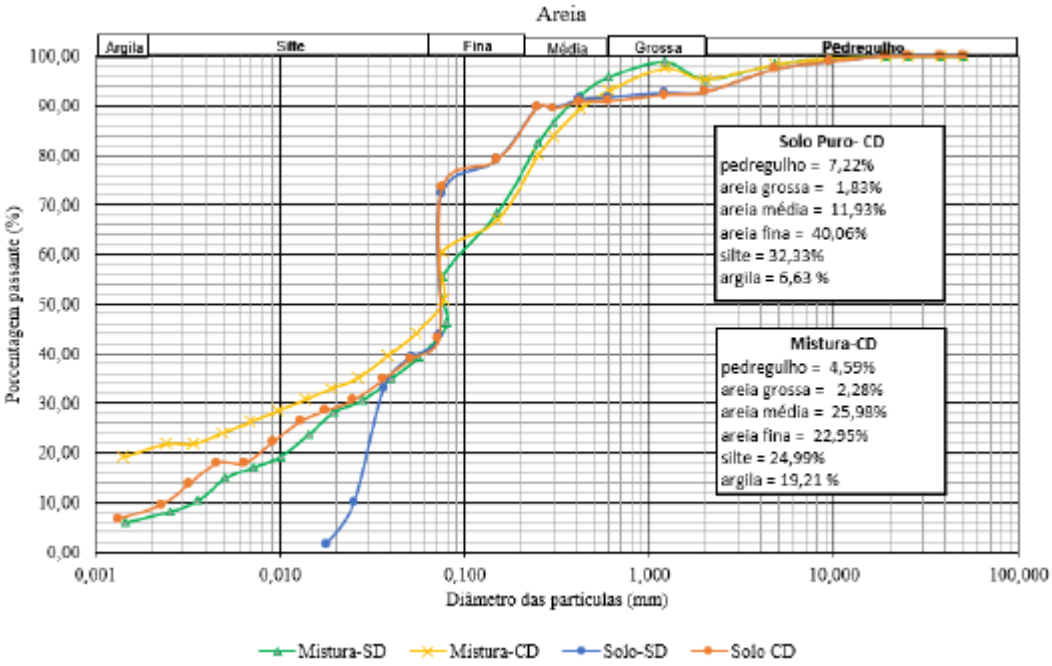


Figura 1. Curvas Granulométricas do solo e da mistura solo-adubo..

Os resultados do ensaio de massa específica dos grãos apresentam uma redução similar à encontrada por Costa (2015), que foi de 2,72 g/cm^3 (solo) para 2,57 g/m^3 (mistura solo-adubo). Corroborando com o comportamento obtido, Santos (2015) aponta que o adubo orgânico possui menor peso específico do que o solo, por isso a adição de adubo orgânico no solo resulta na diminuição do peso específico real dos grãos na mistura.

O solo puro apresentou LL de 38, semelhante ao encontrado na caracterização de solos do mesmo aterro sanitário feito por Santos et al. (2023), valor que se encontra dentro das especificações da CETESB (1993), sendo maior que 30. A mistura, por sua vez, apresentou o LL de 44, acréscimo significativo devido à fração orgânica que apresenta uma capacidade de aumento de umidade.

O limite de plasticidade encontrado tanto na mistura quanto no solo foi de não plástico, sendo assim considerados materiais pouco coesivos. É possível entender o motivo da característica não plástica do solo a partir da análise granulométrica, destacando a grande quantidade de silte e a pequena quantidade de argila. Segundo Cooper (2015), mesmo que o silte possa, no campo, parecer similar a argila, ele apresenta pequena ou nenhuma viscosidade ou plasticidade, portanto não apresenta coesão como a argila. De acordo com o mesmo autor, a baixa plasticidade, coesão e capacidade de absorção das frações de silte é em grande parte devido a filmes de argila aderidos na superfície das partículas.

Além disso, Gomes (2020) e Santos (2019) constataram a perda de plasticidade em misturas de solo e adubo orgânico, devido à natureza não plástica da matéria orgânica. Uma vez que o solo é não plástico a adição de adubo orgânico somente intensificou essa característica. Apesar dessa redução de plasticidade estar ligada a maior taxa de emissão de CH_4 ela favorece o não-surgimento de fissuras num ciclo de umedecimento e secagem e baixa compressibilidade do solo (Maia et al., 2015).

Conforme apontado pela AGEITEC (2019) a adição do adubo orgânico aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), diminuindo a plasticidade como observado no presente trabalho no ensaio de limites de consistência. Segundo a mesma agência esse aumento da CTC promove melhor interação elétrica entre os grãos da mistura de solo e entre a mistura e a água, levando a reter mais quantidade de água.

Dessa forma, ambos os materiais apresentam pequena ou baixa plasticidade, comportamento esperado, já que o controle de consistência está relacionado à fração de argila no solo e a presença de matéria orgânica. Ou seja, quanto mais argiloso, maior a expressão das forças de coesão e adesão e quanto mais matéria orgânica menos plástico é o material, devido a afinidade com água e também devido a sua influência na estrutura e densidade do solo (Resende et al., 2002; Santos, 2019).

A partir da Figura 1 foi possível observar que a composição granulométrica do solo apresentou valores diferentes após a adição de adubo orgânico, sendo o solo puro composto majoritariamente por silte e areia fina,

diferente da mistura, que apresentou uma distribuição mais homogênea entre a areia média, areia fina, silte e argila.

É possível observar um aumento no percentual de areia média semelhante ao estudo de Sena (2022) que trabalhou também com misturas solo-adubo orgânico em aterros sanitários, porém diferente do referido autor houve um aumento na quantidade de finos. Entende-se que esse aumento ocorre devido a composição do adubo orgânico, uma vez que o mesmo utiliza pó de carvão e pó de rocha, ambos materiais com diametro compatível ao da argila. Além disso, Lira (2017) constatou um maior porcentual de areia média na granulometria com a adição do adubo.

Para a classificação SUCS do solo e da mistura solo-composto foram analisados os valores da distribuição granulométrica e dos limites de Atterbeg. No entanto, ambos os materiais são não plásticos. Dessa forma, como indica Flach (2016), desconsiderou-se o Limite de Plasticidade e considerou-se somente o Limite de Liquidez, de modo que o solo puro foi classificado como ML (siltes de baixa compressibilidade), classificação apontada por Ferreira et al. (2022) pela maioria das pesquisas sobre solo de camadas de cobertura. A mistura solo-adubo foi classificada como OL (siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa compressibilidade), devido a adição de matéria orgânica. Como observado por Ferreira et al. (2022) solos caracterizados pela segunda letra "L" do SUCS são favoráveis ao uso na camada de cobertura de aterros devido a baixa compressibilidade.

Considerando os tipos de solo determinados pela CETESB (1993), os materiais não atendem a recomendação para uso em camadas de cobertura de aterros sanitários. Porém, a NBR 13.896 (1997) e a USEPA (2004) não estabelecem uma classificação SUCS para a utilização em camadas de cobertura. Em relação ao percentual de grãos passantes na peneira n° 200, o solo e a mistura se enquadram nas recomendações da CETESB (1993), mas se encontram acima das recomendações da USEPA (2004).

Além disso, ressalta-se que o solo e a mistura solo-composto foram classificados texturalmente respectivamente como franco arenoso e franco argiloso arenoso. O Solo franco arenoso que apresenta condições inferiores de retenção de água e nutrientes quando comparado ao franco argiloso arenoso (COSTA et al., 2018).

Segundo Pascoal e Mesquita (2014), a compactação é um dos mais importantes procedimentos de estudo e controle de qualidade de aterros, uma vez que as camadas dos aterros necessitam de uma redução do índice de vazios e o aumento da densidade do solo que compõe a camada, levando ao aprimoramento de diversas propriedades, como resistência e permeabilidade. O resultado do ensaio pode ser observado a partir da Figura 2. Este que apresentou valores de massa específica aparente seca tanto do solo quanto da mistura dentro das especificações de Kabir e Taha (2004), > 14,22 kN/m^3 para uso em aterros sanitários.

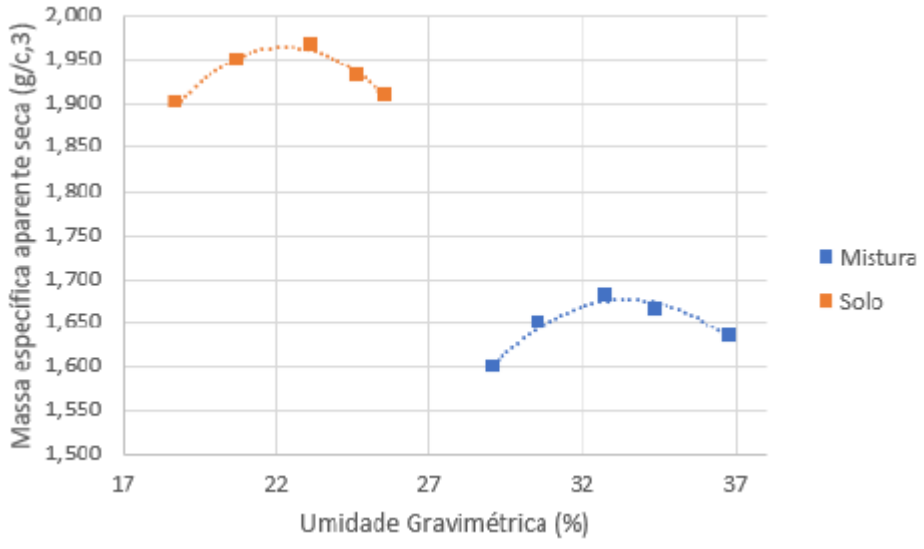


Figura 2. Curvas de compactação do solo e da mistura.

A partir da comparação entre os materiais é possível observar que com a adição do adubo houve um aumento na umidade ótima e uma diminuição na massa específica aparente seca. Ainda, observa-se que o ramo

seco das curvas de compactação do solo puro e da mistura apresenta comportamento semelhante, indicando redução do índice de vazios com a dissipação do ar dos poros, no entanto, nota-se uma divergência no ramo úmido. No caso da mistura, a presença de finos potencialmente ativos pode intensificar fenômenos como adsorção de água e formação de filmes hídricos, alterando o mecanismo de compactação e reduzindo a eficiência de rearranjo estrutural em comparação ao solo puro.

Segundo Costa (2015) isso ocorre devido à capacidade da matéria orgânica de reter maior quantidade de líquido, da redução da fase sólida mineral e pelo aumento das partículas de menor peso. Assim, nota-se uma relação entre densidade e porosidade, pois quanto mais denso o material, menor é sua porosidade, levando a uma redução do fluxo de ar. Cerqueira e Matos (2019) relatam que para cada tipo de solo, sob uma determinada energia de compactação, encontra-se um par de umidade ótima, nos solos com maior presença de argila a densidade é baixa e a umidade ótima é elevada, nos solos mais siltosos, por sua vez, existe uma tendência a valores mais baixos de densidade com curvas mais abatidas. Pinto (2006) definiu diversas curvas de compactação como visto na Figura 2 e, a partir da comparação dessas com a curva obtida para solo e para mistura solo adubo, é possível perceber a semelhança com os solos de silte pouco argiloso e areia silto-argilosa, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de massa específica dos grãos, limites de Atterberg, Análise Granulométrica e Compactação é possível observar a influência da adição de adubos orgânicos em um solo utilizado em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Com relação à granulometria, a mistura levou à uma distribuição granulometrica mais homogênea, aumentando a quantidade de graãos que pertencem a faixa granulométrica de areias médias e de argila, característica que interfere nas demais propriedades do solo. Além disso, foi possível perceber uma redução na massa específica dos grãos com a adição do adubo. Nos limites de Atterberg nota-se um aumento no limite de liquidez, que propicia a retenção de água e a característica não plastica que foi intensificada. Na compactação, observa-se o aumento na umidade ótima e uma diminuição do peso específico aparente seco. Esse aumento na umidade pode ser benéfica, visando manter as camadas mais úmidas, e evitando ressecamentos e fissuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da pesquisa pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG/GO) por meio do projeto Avaliação da influência da adição de materiais alternativos nos parâmetros geotécnicos de um solo empregado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos (Nº 202310267000214).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos; Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9604: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento. Rio de Janeiro, 2016a. 9p

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016b. 10p

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016c. 10p

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d. 12p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Compactação - procedimento. Rio de Janeiro, 2016e. 9p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017. 5p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2025. 3p.

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Adubação orgânica. 2019.

BRASIL (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007- 2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 19 set. 2017.

CERQUEIRA, J. O. F.; MATOS, I. B. Estudo de compactação para confecção de amostras de solo com plantio de capim vetiver. *Seminário Estudantil de Produção Acadêmica*, v. 18, p. 110-128, 2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (1993). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Resíduos Sólidos Industriais. 2ª ed. São Paulo, SP.

COOPER, M. Arquitetura e Propriedades Físicas do Solo. Apostila Parte 1, Universidade de São Paulo, SP, 2015.

COSTA, C. M. C. *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

FERREIRA, R. P. S.; JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H., JÚNIOR, A. I. O. Grupo de Resíduos Sólidos: Camadas de cobertura de aterros sanitários. *Research, Society and Developmente*, v. 11, n. 11, 2022.

FLACH, M. K. *Análise da estabilidade de um talude em solo natural com avaliação dos parâmetros de resistência em diferentes profundidades*, Nova Trento – SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis, 2016.

GOMES, G. J. C. *Análise da adição de composto orgânico para dimensionamento de biocobertura em aterro sanitário*. Dissertação (Pós-graduação). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

KABIR, M. H.; TAHA, M. R. Assessment of physical properties of a granite residual soil as an isolation barrier. *Eletronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 92, 2004, 13 p.

LIRA, B. S. Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2017. 117p.

MAIA, J. P. S.; SOUSA, J. F. M.; CÂMARA JUNIOR, C. L. (2015) Avaliação do comportamento físico mecânico de um solo. *Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*. v. 25, n. 1, p. 57-75.

MONTEIRO, L. S. *Redução das emissões gasosas através da camada de cobertura de aterros sanitários utilizando diversos tipos de materiais*. Tese de doutorado. Fortaleza, 2016.

PASCOAL, P. P. R.; MESQUITA, R. R. S. *Estudo de viabilidade do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2014, 86 p.

PAULINO, R. M. *Estudo geotécnico do uso de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários*. Trabalho de Conclusão de Curso. Natal-RN, 2016.

PINTO, C. S. (2000). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos, 247p.

RESENDE, M.; LANI, J. L.; REZENDE, S. B. Pedossistemas da Mata Atlântica: considerações pertinentes sobre a sustentabilidade. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 261-269, 2002.

SANTOS, G.M. *Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo composto utilizados em camadas de cobertura no Aterro Experimental da Muribeca*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, J. J. N. *Avaliação geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários*. Dissertação. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2019.

SENA, T. S. *Permeabilidade do ar e à água em misturas de solo e composto orgânico para uso em sistemas de cobertura de aterro sanitário*. Dissertação, Pós-graduação. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2022.

SILVA, E.; OLIVEIRA, H. M.; SILVA, P. M. Consumismo, obsolescência programa e a qualidade de vida da sociedade moderna. *Educação Ambiental em Ação*, v. 11, n. 83, 2023.

TAYLOR, D. *Fundaments of soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1948.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers. Office of solid waste an emergency response*. EPA-540-R-04-007. Washington, DC. USEPA, 2004. 421p.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/92

Estudo de caso sobre sondagens SPT para amostragem de RSU de aterros sanitários

Ana Paula do Nascimento
Doutoranda, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, paula.nascimento@unesp.br

Mariana Barbosa Juarez
Professora Auxiliar, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, mariana.juarez@unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti
Professor Titular, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

Giulliana Mondelli
Professora Associada, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Bauru, Brasil, g.mondelli@unesp.br

RESUMO: As técnicas de valorização de resíduos são essenciais para mitigar os impactos ambientais e a saúde associados aos aterros sanitários e para alcançar os objetivos da economia circular. À medida que aumenta o número de aterros encerrados e de passivos ambientais, tornam-se cada vez mais necessárias práticas sustentáveis de disposição final e da gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) aterrados. Este trabalho discute o emprego de sondagens de simples reconhecimento com execução de SPT para amostragem de RSU dispostos em diferentes camadas do aterro de Bauru, Estado de São Paulo. Foram realizadas três campanhas em diferentes locais, SPTs 1, 2 e 3, atingindo profundidades máximas de perfuração de 14,08 m (8 e 20 anos), 9,45 m (8 e 15 anos) e 8,45 m (8 e 15 anos), respectivamente. Amostras de resíduos e de chorume foram coletadas em diversas profundidades. O peso específico obtido a partir do amostrador SPT variou de 9 kN/m³ a 23 kN/m³, com teor de umidade entre 7% e 360%. De modo geral, a média desses resultados confirmam a presença de chorume em bolsões formados no interior do maciço e os pesos específicos apresentam valores superiores ao reportados na literatura. Os resultados foram discutidos quanto à viabilidade e à aplicabilidade dessa abordagem para a amostragem de resíduos, visando a caracterização adicional e a compreensão do comportamento de aterros sanitários em clima tropical.

PALAVRAS-CHAVE: caracterização geoambiental, residuos sólidos urbanos, ensaios de campo, aterros sanitários

ABSTRACT: Waste valorization techniques are essential for mitigating the environmental and public health impacts associated with landfills and for achieving circular economy goals. As the number of closed landfills and environmental liabilities increases, sustainable practices for the final disposal and management of landfilled municipal solid waste (MSW) become increasingly necessary. This study discusses the use of Standard Penetration Test (SPT) borehole investigations for sampling MSW disposed at different landfill layers in the Bauru landfill, São Paulo State, Brazil. Three field campaigns were conducted at different locations, designated as SPT-1, SPT-2, and SPT-3, reaching maximum drilling depths of 14.08 m (8–20 years old waste), 9.45 m (8–15 years old waste), and 8.45 m (8–15 years old waste), respectively. Waste and leachate samples were collected at several depths. The unit weight obtained from the SPT sampler ranged from 9 to 23 kN/m³, while moisture content varied from 7% to 360%. Overall, the average results confirmed the presence of leachate accumulated in localized pockets within the waste mass, and the unit weight values were higher than those reported in the literature. The results were discussed regarding the feasibility and applicability of this approach for waste sampling, aiming to support additional characterization and improve the understanding of landfill behavior under tropical climate conditions.

KEYWORDS: Geoenvironmental characterization; Municipal solid waste; Field testing; Sanitary landfills.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) envolve a avaliação de seu comportamento geotécnico e geoambiental. Essas investigações de campo são essenciais para a valorização de resíduos por meio da mineração de aterros e de estudos de recuperação energética a partir do biogás, bem como para o monitoramento contínuo das variações espaciais e temporais, de modo a subsidiar análises de estabilidade e otimizar o projeto de futuros aterros sanitários.

As propriedades físicas (por exemplo, densidade, porosidade, teor de umidade e grau de saturação) estão diretamente correlacionadas às interações complexas entre as fases sólida (inerte e degradável), líquida e gasosa presentes no RSU. As propriedades mecânicas são influenciadas pela composição dos resíduos, pela distribuição granulométrica das partículas e pelo teor de umidade. O excesso de poropressão decorrente da geração de chorume e de gases durante a decomposição da matéria orgânica pode reduzir a resistência ao cisalhamento, levando a instabilidades de taludes (Zhang et al., 2020).

A determinação de parâmetros confiáveis e a compreensão dos processos hidro-bio-mecânicos acoplados no RSU requerem a integração de diferentes métodos, de forma a superar as limitações individuais de cada um (Juarez et al., 2023). A coleta de amostras é necessária para validar e calibrar ensaios *in situ* e levantamentos geofísicos.

Matasovic e Kavazanjian (1998) analisaram amostras de RSU reconstituídas do aterro Oll, na Califórnia, EUA, utilizando três sondagens com trado caçamba (trado tipo concha), de 840 mm de diâmetro, até a profundidade de 45 m, além de uma trincheira escavada com 6 m de comprimento e 6 m de profundidade. Uma investigação conduzida no aterro Tri-Cities, também localizado na Califórnia, incluiu duas sondagens com trado caçamba de 960 mm, atingindo profundidades entre 10 e 32 m (Zekkos et al., 2010). Abreu e Vilar (2017) empregaram duas técnicas de amostragem: trincheiras para resíduos superficiais e trados helicoidais ocos, com diâmetros de 290 e 350 mm, para resíduos profundos. Owusu-Nimo et al. (2019) coletaram amostras em profundidades variando entre 0,4 e 1,5 m no aterro de Oti, em Kumasi, Gana, por meio da cravação de um tubo cilíndrico metálico de 150 mm de diâmetro no solo, utilizando um martelo.

Este estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da sondagem de simples reconhecimento com execução de SPT para a amostragem de RSU. A breve revisão da literatura revelou informações limitadas sobre esse tema. A ausência de métodos e diretrizes específicas para a amostragem e a mineração de RSU constitui um desafio para o avanço dos estudos de caracterização desses resíduos, ressaltando a necessidade de propor e testar abordagens inovadoras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do estudo

O aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU) de Bauru iniciou suas operações em 1993. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) previu três camadas de resíduos e um sistema de impermeabilização de fundo constituído por solo arenoso argiloso compactado, revestido com emulsão asfáltica (FIPAI, 1992). Presume-se que a primeira e a segunda camadas tenham sido concluídas ao longo de uma década, uma vez que as atividades na terceira camada foram registradas entre 2002 e 2004. Em 2011, o órgão ambiental estadual aprovou o plano de encerramento do local, que limitou a disposição de resíduos até a quinta camada e a uma área adjacente, a qual possui revestimento de fundo com geossintéticos (CETESB, 2011). A desativação oficial ocorreu em 2016, quando o fluxo de resíduos foi redirecionado para o município vizinho de Piratininga.

Durante muitos anos, o chorume foi coletado pelo sistema de drenagem, conduzido a um reservatório inferior e bombeado para um reservatório superior localizado no topo da terceira camada. Parte desse chorume infiltrava-se na massa de resíduos, promovendo a recirculação de fluidos (Lopes, 2007). Em 2007, tanques de sedimentação foram construídos a montante e fora da área de disposição, a fim de atender às exigências ambientais e permitir a expansão das camadas subsequentes. Em 2014, aproximadamente 290 m³ de chorume eram coletados mensalmente e encaminhados para estações de tratamento (BAURU, 2014).

Pesquisas anteriores, integrando ensaios laboratoriais, ensaios *in situ* e métodos geofísicos, delimitaram uma pluma de contaminação deslocando-se ao longo de um caminho de fluxo no sentido leste-oeste (Lago et

al., 2006; Mondelli et al., 2007; Ustra et al., 2012). A geologia nessa direção indica uma transição de solos coluvionares, predominantemente areno-argilosos de coloração marrom-avermelhada, para solos aluvionares com intercalações de camadas de areia e argila. Até o momento, não há registros de ensaios de campo e de laboratório voltados à análise das condições do RSU aterrados.

2.2 Sondagem de simples reconhecimento com execução de SPT

As sondagens de simples reconhecimento com execução de SPT foram realizadas no aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru em 2023 (SPT-1), 2024 (SPT-2) e 2025 (SPT-3), conforme apresentado na Figura 1. Em razão da ausência de procedimentos padronizados específicos para resíduos, os critérios de término do ensaio seguiram aqueles estabelecidos para solos pela NBR 6484 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), ou a profundidade máxima estimada do aterro, de 15 m, de modo a evitar atingir o sistema de impermeabilização de fundo.

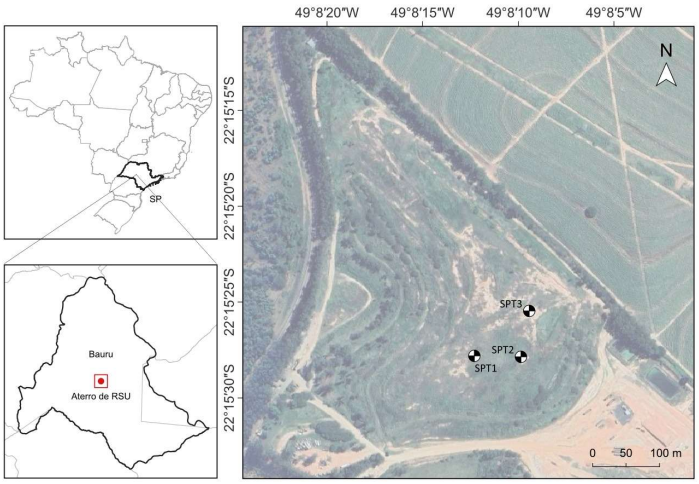


Figura 1. Localização das sondagens SPT (SPT-1, 2023; SPT-2, 2024; SPT-3, 2025) na área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP

2.1.1 Amostragem

A Figura 2 apresenta o equipamento de sondagem de simples reconhecimento com execução de SPT, incluindo o sistema de tripé e o amostrador padrão bipartido SPT com amostras "embuchadas" de RSU, bem como o furo de sondagem SPT com diâmetro de 53 mm jorrando lixiviado de dentro do maciço de RSU. Após a coleta a cada metro, as amostras de RSU foram armazenadas de acordo com as diversas profundidades de coleta, em embalagens plásticas mantidas sob refrigeração, e transportadas para o Laboratório de Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Unesp, campus de Bauru, para a realização de ensaios laboratoriais futuros, incluindo análises físico-químicas do chorume.



Figura 2. Equipamento utilizado, incluindo o sistema tripé, o amostrador padrão bipartido e furo da sondagem SPT jorrando lixiviado do interior do maciço.

2.1.2 *Peso específico do RSU e Teor de Umidade*

Foram realizadas estimativas de peso específico *in situ* (γ) com um total de 15 amostras em duplicadas de RSU (6 amostras SPT-1, 4 amostras SPT-2 e 5 amostras SPT-3), coletadas por meio das sondagens. O volume foi calculado com base no comprimento da amostra de RSU (L_{RSU}), ao invés do comprimento do amostrador padrão SPT (ou seja, levando em consideração o efeito de embuchamento), conforme descrito na Equação 1:

$$\gamma = M_{RSU} / V_{RSU} = M_{RSU} / (0.25\ \pi\ D^2\ L_{RSU}) \qquad (1)$$

onde:
γ – peso específico RSU (kN/m^3);
M_{RSU} – massa total de RSU coletado com amostrador padrão bipartido (kg);
V_{RSU} – volume calculado da amostra de RSU (m^3);
D – diâmetro do amostrador padrão bipartido igual a 34,9 mm (m);
L_{RSU} – comprimento da amostra de RSU medido *in situ* (m).

O procedimento utilizado para calcular o teor de umidade (w) das amostras seguiu a norma ASTM D2216-19 (ASTM International, 2019) e ABNT NBR 6457 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024) utilizada para solos, com adaptações, já que não existe normas específicas para este tipo de material (Nascimento et al., 2025). O teor de umidade (base seca) foi estimado, após secagem em estufa à 105ºC, utilizando a Equação 2:

$$w = [(M - M_{105}) / (M_{105} - M_c)] \times 100 \qquad (2)$$

onde:
w – teor de umidade (%);
M – massa total da amostra de RSU (g);
M_{105} – massa da amostra após secagem à 105ºC (g);
M_C – massa do cadinho (g).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As sondagens foram realizadas no maciço de RSU até atingir o impenetrável, conforme a ABNT NBR 6484/2020. Foram executadas três sondagens, sendo que a profundidade máxima alcançada na primeira sondagem (SPT-1) foi de 14,08 m; na segunda sondagem (SPT-2), de 9,45 m; e na terceira sondagem (SPT-3), de 8,45 m. Em ambos os casos, o impenetrável foi alcançado quando atingiu-se cinco golpes sucessivos com o martelo de 75 kg (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), não havendo possibilidade de cravação do amostrador padrão, em razão da elevada resistência do RSU, provavelmente devido à presença de componentes rígidos.

Como mostrado nao Figura 3, foi observado o efeito do embuchamento durante as coletas de RSU. Este fenômeno foi atribuído à composição heterogênea do material, rigidez e tamanhos variáveis das partículas de RSU dentro do maciço de RSU.



Figura 3. Vista do amostrador padrão bipartido com amostras de RSU embuchadas

A Tabela 1 apresenta as características de todas as amostras coletadas em diversas profundidades durante as sondagens de simples reconhecimento com execução de SPT, tanto pelo amostrador padrão (0,45m), como por trado manual simples (0,55 m).

Tabela 1. Amostragem de RSU em diversas profundidades, quantidade coletada e estimativa da idade aproximada do RSU

Amostragem sondagem SPT	**Prof. (m)**	**Quantidade RSU (g)**	**Idade Estimada aterramento (anos)**	**Peso específico *in situ* γ (kN/m^3)**	**Teor de umidade W_{105} (%)**
SPT-1 (2023)	0,50 – 1,00	316,5	8 – 10	22,42	7,4 ± 0,2
	1,00 – 1,45	458,8	8 – 10	19,32	30,1 ± 5,4
	1,45 – 2,00	1101,4	8 – 10		30,3 ± 1,2
	2,00 – 2,45	377,5	8 – 10	23,34	29,7 ± 3,9
	2,45 – 3,00	1253,1	8 – 10		31,5 ± 0,1
	3,45 – 4,00	153,3	8 – 10		60,8 ± 7,8
	4,45 – 5,00	380,4	10 – 15		94,6 ± 1,8
	5,45 – 6,00	69,4	10 – 15		103,2 ± 5,4
	6,00 – 7,00	155,5	10 – 15	15,91	94,6 ± 1,8
	10,00 – 12,00	28,5	15 – 20		360,6 ± 31,1
	12,00 – 13,00	916,0	15 – 20	19,15	50,9 ± 10,1
	13,00 – 14,08	248,1	15 – 20	17,37	35,7 ± 3,0
SPT-2 (2024)	0,00 – 1,00	2897,1	8 – 10		13,3 ± 0,4
	1,45 – 2,00	1756,8	8 – 10		59,1 ± 3,2
	2,45 – 3,00	99,7	8 – 10		90,1 ± 9,7
	3,00 – 3,45	725,3	8 – 10	19,45	31,0 ± 2,4
	3,45 – 4,00	1405,2	8 – 10		67,8 ± 10,4
	4,00 – 4,45	245,5	10 – 15	14,26	51,8 ± 1,7
	4,45 – 5,00	468,9	10 – 15		74,5 ± 13,6
	5,45 – 6,00	3307,7	10 - 15		51,9 ± 2,8
	8,00 – 8,45	175,0	10 – 15	9,15	68,3 ± 20,5
	9,00 – 9,45	87,5	10 – 15	13,07	50,1 ± 7,2
SPT-3 (2025)	0,00 – 0,50	645,9	8 – 10		31,0 ± 11,3
	0,50 – 1,00	828,4	8 – 10		34,8 ± 9,0
	1,00 – 1,45	398,8	8 – 10	26,07	25,7 ± 6,9
	1,45 – 2,00	304,0	8 – 10		54,2 ± 1,3
	2,45 – 3,00	261,0	8 – 10		142,3 ± 15,0
	3,45 – 4,00	248,6	8 – 10		122,4 ± 15,6
	4,45 – 5,00	288,0	10 – 15		190,0 ± 12,3
	5,00 – 5,45	618,7	10 – 15	24,89	48,8 ± 10,6
	5,45 – 6,00	187,4	10 – 15		188,9 ± 18,2
	6,00 – 6,45	522,8	10 – 15	17,64	54,3 ± 15,7
	6,45– 7,00	1979,4	10 – 15		84,6 ± 19,1
	7,00 – 7,45	163,0	10 – 15	14,21	48,6 ± 15,4
	8,00 – 8,45	305,3	10 – 15	22,81	71,3 ± 6,9

Estima-se que a 5ª camada (4m) de RSU foi aterrada entre 2012 e 2014, a 4ª camada (5m) entre 2008 e 2011, e a 3ª camada (5m) entre 2003 e 2007, o que induz a estimar a idade do RSU, para profundidade de perfuração entre 0 – 4,0 m, idade entre 8 a 10 anos; profundidade entre 4,0 – 9,0 m, estimativa da idade entre 10 a 15 anos, e para camada mais profunda entre 9,0 – 14,0 m, idade entre 15 a 20 anos (Juarez, 2025).

A Tabela 2 apresenta resumidamente a estimativa do peso específico de RSU *in situ*, idade de aterramento do RSU e o teor de umidade à 105ºC para a temperatura de secagem em estufa.

Tabela 2. Síntese dos índices estimados para as amostras de RSU da área de disposição de Bauru-SP

Índices	SPT-1	SPT-2	SPT-3	Média(1)
Peso específico *in situ* (kN/m³)	19,59	13,98	21,12	18,23
Idade estimada de aterramento do RSU (anos)	8-20	8-15	8-15	8-20
Teor de umidade à 105ºC (%)	77,45	55,79	84,38	72,54

(1) Baseado nas amostras da Tabela 1

Com base em dados da literatura, o teor de umidade estimado neste estudo foi superior àqueles determinados em amostras coletadas em aterros sanitários localizados nos Estados Unidos, os quais apresentaram faixa de variação entre 12% e 41% (Matasovic and Kavazanjian, 1998; Zekkos et al., 2010).

Entretanto, segundo dados de aterros sanitários brasileiros (Abreu, 2015; Boscov, 2008; Machado et al., 2018; Takeda et a., 2022), os valores obtidos neste estudo estão de acordo com aqueles reportados em pesquisas anteriores, que variam entre 30% e 94%. Essa característica provavelmente está associada à quantidade significativa de resíduos orgânicos dispostos em aterros no Brasil (SINISA, 2025), bem como às condições climáticas tropicais, caracterizadas por elevados índices de pluviosidade.k

Os estudos realizados por Zekkos et al. (2010) reportaram valores de peso específico variando entre 5,9 e 17,5 kN/m³ para RSU com idade de aterramento entre 0 e 15 anos. Abreu (2015) observou valores entre 8,1 e 15,2 kN/m³ para RSU com idade de 2 a 25 anos, enquanto Abreu e Vilar (2017) reportaram uma faixa de 5,6 a 10,1 kN/m³ para resíduos com a mesma idade de aterramento. Por sua vez, Reddy et al. (2009) encontraram peso específico de 5,9 kN/m³ para RSU jovens, com aproximadamente 1,5 ano de disposição.

Os valores de peso específico obtidos nesta investigação foram superiores aos reportados na literatura. Esse comportamento pode estar associado, em grande parte, às condições operacionais do aterro estudado, especialmente aos procedimentos de compactação dos resíduos e à execução das camadas de cobertura de solo entre as sucessivas etapas de disposição, a idade dos RSU, a degradação avançada e elevada umidade, além do proprio embuchamento das amostras. Tais práticas influenciam diretamente a densificação da massa de resíduos e, consequentemente, os valores de peso específico observados, os quais deverão ser avaliados em profundidade em trabalhos futuros.

4 CONCLUSÕES

Este estudo mostra tanto as vantagens quanto as limitações da sondagem de simples reconhecimento com excecução de SPT para a amostragem de resíduos sólidos urbanos (RSU). O amostrador padrão bipartido possibilitou a coleta de amostras a cada metro de profundidade, sendo apropriada para a avaliação de camadas mais antigas e profundas em maciços de RSU.

Os desafios incluíram o acesso físico restrito ao topo do aterro, em razão do crescimento da vegetação, bem como a composição heterogênea dos resíduos, que inclui plásticos flexíveis, detritos de borracha e materiais têxteis. Esses materiais não apenas representaram risco de danos aos equipamentos, como também interferiram no volume das amostras, devido à ocorrência do efeito de embuchamento.

Durante a segunda e terceira campanhas de ensaios, muito chorume jorrou sob pressão durante a perfuração. Embora esse evento tenha representado um desafio operacional, também forneceu evidências da presença de bolsões do lixiviado sob a pressão de gases no interior do aterro, indicando a fase metanogênica de degradação dos RSU.

Em razão da escassez de relatos sobre amostragem por meio de sondagens de simples reconhecimento com execução de SPT na literatura e da grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados (23,5 kg), o procedimento adotado foi relevante para o avanço do conhecimento do material e maçico investigado. Essa técnica de amostragem de RSU apresenta algumas vantagens, dentre as quais se destacam o baixo custo de instalação e execução da sondagem SPT, a preservação das características dos resíduos, uma vez que as

amostras coletadas com o amostrador padrão possibilitaram investigar grandes profundidades, a coleta de resíduos degradados e o alcance de diferentes camadas do aterro.

De modo geral, a realização das sondagens SPT em aterros sanitários é viável, capaz de fornecer informações valiosas sobre as condições de degradação dos RSU, além de permitir fazer uma estimativa do peso específico de RSU em regiões tropicais, com valores acima dos reportados na literatura, cujo valor médio foi de 18,23 kN/m^3, e elevado teor de umidade, em média 73%.

Muitas são as oportunidades de pesquisa a partir da execução de mais sondagens de simples reconhecimento com execução de SPT no aterro de Bauru para investigar as camadas mais antigas (1 a 3), bem como a integração desse método com outras técnicas de investigação geotécnica e geofísica. Nesse momento a caracterização geoambiental dos RSU em laboratório, incluindo análise gravimétrica, granulometria, perda de massa por combustão e análises químicas vem sendo realizadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru (EMDURB) e à Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA) do Município de Bauru.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, A.E.S. (2015) Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 250p. https://doi.org/10.11606/T.18.2015.tde-03082015-115017.

Abreu, A.E.S., Vilar, O.M. (2017) Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. Waste Management, 68, p.263-274. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.038.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio do Janeiro.

ASTM International (2019). ASTM D2216: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

BAURU, 2014. Plano Municipal de Saneamento Básico Variável Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos. Bauru: PMSB. Disponível em: https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_meioambiente/plano_residuos/PMSB%20Bauru_Vs%20Final.pdf. Acesso em: 11 mar. 2025.

Boscov, M. E. G. Geotecnia Ambiental. Oficina de Textos. São Paulo, 2008. ISBN 978-85-86238-73-4. ISBN 978-85-7975-123-3.

CETESB (2011) Parecer Técnico Nº001/2011/LPGP. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, Brasil.

FIPAI (1992) Aterro Sanitário da Cidade de Bauru-SP. EIA-RIMA (Relatório de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto do Meio Ambiente, 1 - 5. Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial, São Carlos-SP, Brasil.

Juarez, M.B. (2025) Geotechnical and geoenvironmental site characterization of a municipal solid waste landfill by in situ tests. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, UNESP. Brasil

Juarez, M.B., Mondelli, G., Giacheti, H.L. (2023) An overview of in situ testing and geophysical methods to investigate municipal solid waste landfills. Environmental Science and Pollution Research, 30(9), p.24779-24789. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25203-5.

Lago, A.L.; Elis, V.R.; Giacheti, H.L. (2006) Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Revista Brasileira de Geofísica, 24, p.357-374. https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300005.

Lopes, A.A. (2008) Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 394p. https://doi.org/10.11606/T.18.2007.tde-04032008-125517.

Machado, S.L., Carvalho, M.F., Torres, E.A., Santos, A.C, Karimpour-Fard, M. Briefing: Landfill mining for energy recovery in tropical developing countries. Journal of Environmental Engineering and Science 13(4): p. 93–97. https://doi.org/10.1680/jenes.18.00043.

Matasović, N., & Kavazanjian Jr, E. (1998) Cyclic characterization of OII landfill solid waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(3), p.197-210. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:3(197).

Mondelli, G., Giacheti, H.L., Boscov, M.E.G., Elis, V.R., Hamada, J. (2007) Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. Environmental Geology, 52, p.871-887. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0529-1.

Nascimento, A.P., Wilches, J.M.C., WolfDeMattos, P.S.W., Rodrigues, R.A., Mondelli, G. (2025) Combustion mass loss proceedings for solid waste: some results for MSW and CDW in Brazil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 30, p. 1-9. https://doi.org/10.1590/S1413-415220250080.

Owusu-Nimo, F., Oduro-Kwarteng, S., Hellen Essandoh, H., Wayo, F., Shamudeen, M. (2019) Characteristics and management of landfill solid waste in Kumasi, Ghana. Scientific African 3, p.1-9. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00052.

SINISA (2025) Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico. Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_RESIDUOS_SOLIDOS_2025.pdf. Acesso em: 27 jan.2026.

Takeda, C.M., De Godoy Leme, M.A., Romero, D.C. et al. (2022) Variation of the Gravimetric Composition of Landfilled Municipal Solid Waste Over the Time in a Developing Country. Int J Environ Res 16, 83. https://doi.org/10.1007/s41742-022-00463-0.

Ustra, A.T., Elis, V.E., Mondelli, M., Giacheti, H.L. (2012) Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. Environmental Earth Sciences, 66, p. 763-772. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1284-5.

Zekkos, D., Athanasopoulos, G.A., Bray, J.D., Grizi, A., Theodoratos, A. (2010) Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. Waste Management, 30, p.1544-1555. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.024.

Zhang, Z., Wang, Y., Fang, Y., Pan, X., Zhang, J., Xu, H. (2020) Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. Waste Management & Research, 38(12), p.1389-1404. https://doi.org/10.1177/0734242X20953486.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/93

Estudo do Potencial de Erodibilidade do Solo de uma Encosta do Alto da Penha, em Crato – CE

Francisco Wandson Vieira Nelo
Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, wandson.viera@aluno.ufca.edu.br

Maria Luana Pinheiro Pinto
Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil , Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, maria.luana@aluno.ufca.edu.br

Ana Patrícia Nunes Bandeira
Professora Associada, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, ana.bandeira@ ufca.edu.br

RESUMO: Os processos erosivos quando ocorrem de forma descontrolada e sem remediação geram graves impactos ambientais, sociais e econômicos. Os principais efeitos incluem: assoreamento e contaminação de rios e lagos, levando à perda da fauna aquática; perda da fertilidade do solo que resulta na diminuição da produção de alimentos; e deslizamentos de terra que podem causar a perda de vidas e bens materiais. Em áreas urbanas, os processos erosivos são intensificados pelo escoamento das águas pluviais e servidas. A erodibilidade do solo é determinada por características como textura, estabilidade de agregados, estrutura, permeabilidade, compactação e sucção. O presente trabalho tem como foco o estudo do potencial de erodibilidade de uma encosta localizada no bairro Alto da Penha, na cidade de Crato (CE), que apresenta erosão intensa. Esta encosta possui aproximadamente 28 m de altura, 35% de declividade e uma extensão média de 81 m, contendo dois pontos críticos de erosão que ameaçam moradias e a população local. Para o conhecimento das propriedades do solo, o estudo foi conduzido por meio de ensaios básicos de caracterização geotécnica e de técnicas indiretas de avaliação do potencial de erodibilidade do solo. Os resultados indicaram que o solo é predominantemente arenoso (78%), sendo classificado como Areia Siltosa (SM). Os ensaios no equipamento de cisalhamento direto revelaram uma redução significativa nos parâmetros de resistência do solo sob condições de inundação: a coesão do solo reduziu de 7,85 kPa para 0 kPa e o ângulo de atrito reduziu de 37° para 26°. Os resultados obtidos através dos ensaios de Crumb Test, Desagregação e Estabilidade de Agregados classificaram o solo como não dispersivo e de alta resistência à erosão pluvial, contudo a imprecisão e a especificidade do que cada um avalia devem ser consideradas. Durante o ensaio de Inderbitzen, percebeu-se que tanto a amostra na condição previamente inundada quanto na condição de umidade natural, a perda de solo ocorreu com facilidade, com o aumento da vazão. Já a amostra compactada apresentou resistência à perda de solo. A avaliação combinada dos ensaios de caracterização, resistência ao cisalhamento, Inderbitzen e a comparação com estudos prévios (Lloppis Trillo, 1999; Bastos, 1999) indicam uma elevada suscetibilidade do solo à erosão. O resultado crítico dos ensaios de resistência (cisalhamento) sob inundação é determinante. Conclui-se, portanto, que o solo estudado é potencialmente erodível. Este resultado confirma a necessidade urgente de medidas mitigadoras para reduzir o risco de erosão e proteger a área.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, Encosta, Degradação Ambiental.

ABSTRACT: Uncontrolled and unremediated erosive processes generate severe environmental, social, and economic impacts. The main effects include: siltation and contamination of rivers and lakes, leading to the loss of aquatic fauna; loss of soil fertility resulting in decreased food production; and landslides that can cause loss of life and property. In urban areas, erosive processes are intensified by stormwater and wastewater runoff. Soil erodibility is determined by characteristics such as texture, aggregate stability, structure, permeability, compaction, and suction. This study focuses on the erodibility potential of a slope located in the Alto da Penha neighborhood, in the city of Crato (CE), which exhibits intense erosion. This slope is approximately 28 m high, has a 35% gradient and an average length of 81 m, containing two critical erosion points that threaten housing

and the local population. To understand the soil properties, the study was conducted through basic geotechnical characterization tests and indirect techniques for evaluating soil erodibility potential. The results indicated that the soil is predominantly sandy (78%), classified as Silty Sand (SM). Direct shear tests revealed a significant reduction in soil strength parameters under flooded conditions: soil cohesion dropped from 7.85 kPa to 0 kPa, and the friction angle decreased from 37° to 26°. Results obtained through the Crumb Test, Disaggregation, and Aggregate Stability tests classified the soil as non-dispersive and highly resistant to rainfall erosion; however, the imprecision and specificity of each test must be considered. During the Inderbitzen test, it was observed that in both the pre-flooded and natural moisture conditions, soil loss occurred easily as the flow rate increased. In contrast, the compacted sample showed resistance to soil loss. The combined evaluation of characterization tests, shear strength, Inderbitzen tests, and comparison with previous studies (Lloppis Trillo, 1999; Bastos, 1999) indicates high soil susceptibility to erosion. The critical outcome of the shear strength tests under flooding is the determining factor. It is concluded, therefore, that the studied soil is potentially erodible. This result confirms the urgent need for mitigating measures to reduce erosion risk and protect the area.

KEYWORDS: Erosion, slope, Environmental Degradation.

1 INTRODUÇÃO

A erosão caracteriza-se pelo desgaste natural de solos e rochas, sob a influência de agentes naturais e atividades antrópicas. Na ausência de medidas mitigadoras, os processos erosivos desencadeiam severos impactos socioambientais e econômicos. Entre as principais consequências desses processos, destacam-se o assoreamento e a poluição de corpos hídricos, a degradação da biodiversidade local, a perda da produtividade agrícola, danos a infraestrutura viária e o aumento do potencial de deslizamentos de taludes, que colocam em risco a vida das pessoas e os patrimônios.

Em ambientes de clima tropical, de média a elevada pluviometria, os processos erosivos hídricos são mais intensos. O conhecimento do clima, relevo, tipo do solo, forma do uso e ocupação são determinantes no entendimento desses processos. Para a análise da erodibilidade do material, é importante conhecer o tipo de solo, textura, estrutura e a permeabilidade, além do teor de umidade e, consequentemente, da sucção, que interfere na perda de massa e na desestruturação devido aos processos erosivos (MASCARENHAS *et al.,* 2023).

Nesse contexto, foi investigado por meio de ensaios de laboratório, o solo de uma encosta, que vem apresentando focos de processos erosivos intensos e colocando em riscos a vida da população.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo, de uma encosta situada no município do Crato, no interior do Ceará, que apresenta processos erosivos (Figuras 1 e 2). A encosta apresenta dimensões geométricas estimadas em: altura de 28 m; extensão de 80 m; e declividade de 35%; e localiza-se especificamente no bairro Alto da Penha, nas proximidades do Parque de Exposição, sendo georreferenciada pelas coordenadas UTM 454577.28 E / 9199489.27 S (Zona 24 M).



Figura 1. Encosta da Área de Estudo
(Autores, 2025)



Figura 2. Dtalhe de Ravina
(Autores, 2025)

Para o desenvolvimento do trabalho, realizou-se as seguintes atividades: a) Coleta de amostras de solo deformado e indeformado; b) Carecterização básica do solo; c) Ensaios de resistência ao cisalhamento do solo; d) Estudos Indiretos da erodibilidade; e) Ensaios de Inderbitzen.

2.1 Coleta de amostras de solo deformado e indeformado

A coleta das amostras foi realizada no terço inferior da amplitude da encosta, em uma área com baixo potencial de riscos de desmoronamento. O procedimento seguiu as diretrizes da ABNT NBR 9604/2024 - Abertura de poço e trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Foram extraídos blocos indeformados, destinados aos ensaios de resistência ao cisalhamento, aos estudos indiretos de erodibilidade e de Inderbitzen. Também, coletaram-se amostras deformadas para os ensaios de caracterização geotécnica. Durante a amostragem, percebeu-se que o solo, embora umedecido, apresentava elevada resistência à moldagem dos blocos.

2.2 Ensaios de laboratório para o estudo da erodibilidade por meio de métodos indiretos

Inicialmente foram realizados os ensaios básicos de caracterização geotécnica, de acordo as normas técnicas brasileiras mais atualizadas. Os ensaios foram: Análise granulométrica; Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm; Determinação do limite de plasticidade; Determinação do limite de liquidez.

A fim de obter os parâmetros de resistência do solo, nas condições de umidade natural de saturado; e estimar o potencial de erodibilidade, de acordo com a proposta de Bastos (1999), foram realizados ensaios de cisalhamento direto, de acordo com a norma técnica internacional ASTM D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Durante o procedimento, os corpos de prova foram submetidos a tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa.

Para avaliação do potencial de erodibilidade dos solos, por meio de técnicas indiretas, foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de desagregação, *crumb test* e estabilidade de agregados. O ensaio do *Crumb Test*, foi empregado seguindo as diretrizes da ABNT NBR 13601/2020. O ensaio de desagregação e a avaliação da estabilidade de agregados (em aparelho de Yoder) foram realizados seguindo a proposta de Mascarenha *et al*. (2023). Na avaliação de estabilidade dos agregados utilizou-se duas porções de 25g de amostras de solo do mesmo bloco, com teores de umidade de 2,12%, e massas secas de 24,481 g.

2.3 Estudo da erodibilidade por meio de Ensaios de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen é um método direto de quantificar a erodibilidade do solo (Figura 4). Por meio da simulação do escoamento superficial sobre um corpo de prova cilíndrico (10 cm de diâmetro e altura de 13,5 cm), a perda de solo é quantificada, em um tempo e velocidade pré-estabelecidas, ou seja, a erodibilidade do solo é quantificada diretamente do ensaio.

Devido a este ensaio não ser normatizado, utilizou-se para o desenvolvimento deste trabalho a metodologia descrita por Fácio (1991, *apud* MASCARENHA *et al*., 2023), com algumas adaptações. Foram realizados ensaios em três condições da amostra: i) indeformada e pré-inundada por 24 horas; ii) amostra indeformada na umidade natural; iii) amostra compactada com parâmetros ótimos da energia normal (densidade seca máxima de 1,82 g/cm³, e umidade ótima de 14%).

Os ensaios foram realizados com as seguintes vazões de escoamento: 3 L/min, 5 L/min e 7 L/min; quanto ao tempo mínimo de ensaio, foi de 20 minutos; a inclinação utilizada na rampa foi de aproximadamente 35°, se assemelhando a da encosta em estudo. A Figura 5 representa o corpo de prova de solo no aparelho de Inderbitzen, durante a realização do ensaio.

Através dos resultados obtidos nos ensaios, também foi possível obter a classificação da erodibilidade, através da proposta de Bastos (1999), que qualifica a potencialidade da erodibilidade de acordo com o valor da taxa de erodibilidade (K). Para Bastos (1999), o solo pode se enquadrar como de; i) Alta erodibilidade (K> 0,1g/cm²/min/Pa); ii) Média erodibilidade (0,1≥ K≥ 0,001g/cm²/min/Pa); ou iii) Baixa erodibilidade (K< 0,001g/cm²/min/Pa).

Para a determinação da taxa de erodibilidade (K) montou-se um gráfico de tensão cisalhante hidráulica *versus* perda de solo (por unidade de área e tempo de ensaio), em que K é o valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajuste os pontos desse gráfico.



Figura 4. Aparelho de Inderbitzen
(Autores, 2025)



Figura 5. Realização do ensaio de Inderbitzen
(Autores, 2025)

(1)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados dos ensaios básicos de caracterização geotécnica

A distribuição granulométrica do solo, obtida por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação com uso de defloculante, encontra-se ilustrada na Figura 6.

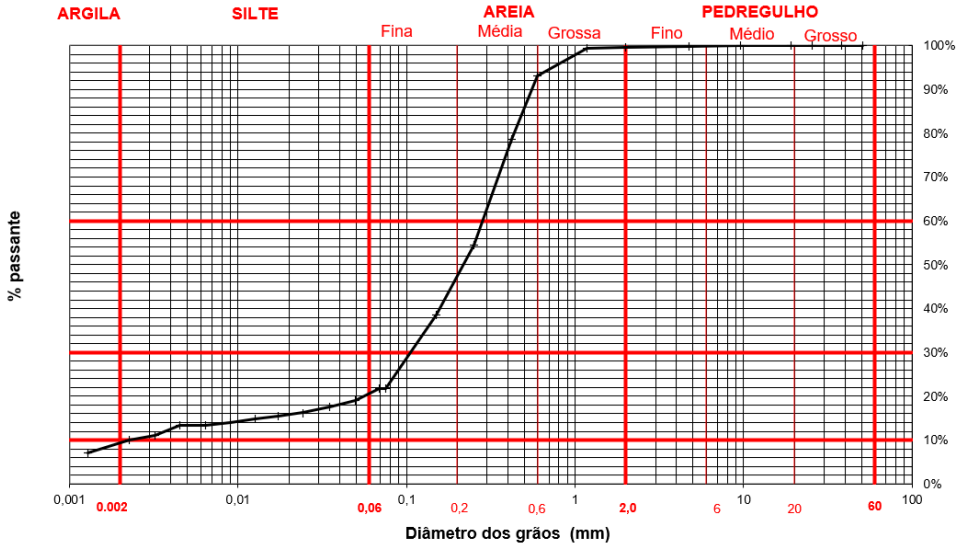


Figura 6. Curva granulométrica do solo (Autores, 2025)

O solo caracteriza-se como predominantemente arenoso, sendo composto por 78% de areia (fina, média e grossa). A fração passante na peneira de 0,075 mm representa 22% da amostra, sendo composta por 11% de silte e 10% de argila. A massa específica dos sólidos foi estimada em 2,63 g/cm³.

Os ensaios de consistência indicaram que o solo é não plástico (NP), uma vez que a amostra não apresentou a maleabilidade necessária para a moldagem durante os testes de Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL). Combinando os dados da análise granulométrica aos Limites de Atterberg, o solo foi classificado como SM (Areia Siltosa), segundo o SUCS. De acordo com a relação entre erodibilidade e textura do solo, proposta por Lloppis Trillo (1999, *apud* LAFAYETTE, 2006), os solos SM são considerados de elevada suscetibilidade à erosão. Segundo Bastos (1999), a amostra é considerada potencialmente erodível, visto que apresenta menos de 55% do material passante na peneira 0,075mm e IP menor que 10%.

3.2 Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento do solo

Através dos dados obtidos no ensaio de cisalhamento direto, foram elaboradas as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo para as condições natural e inundada, conforme ilustrado na Figura 7. Estas envoltórias permitem a comparação direta da influência do grau de saturação na resistência ao cisalhamento do solo.

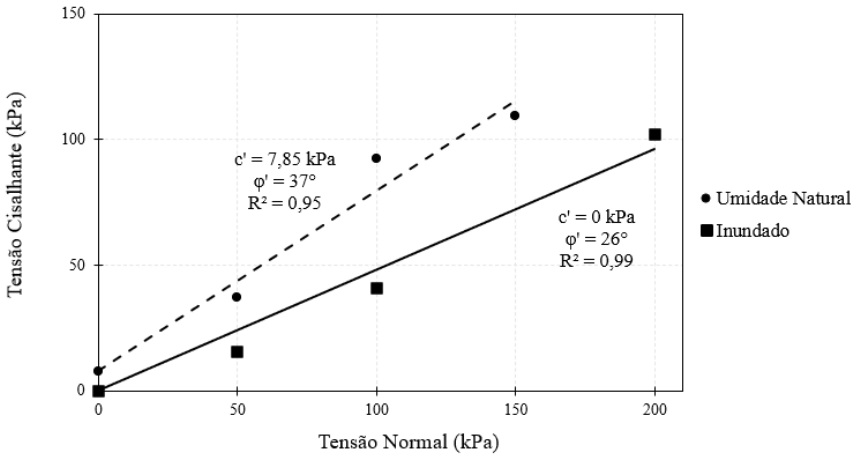


Figura 7. Envoltórias de resistência ao cisalhamento (Autores, 2025)

Observa-se na Figura 7 que os parâmetros de resistência do solo sofreram variação, quando se compara os resultados do solo na umidade natural (c’ = 7,85 kPa e φ’ = 37°) com o solo inundado (c’ = 0 kPa e φ’ = 26°). A redução dos valores de intercepto de coesão e atrito com a inundação indica que o solo perde resistência em contato com água, sendo um fator que contribui para as ocorrências de erosões. De acordo com a proposta de Bastos (1999), solos que apresentam variação de mais de 85% no intercepto de coesão, com a inundação, são considerados potencialmente erodíveis.

3.3 Resultados dos ensaios indiretos para o estudo da erodibilidade

Os resultados dos ensaios de *Crumb Test* indicaram que preservação da forma da amostra, sem a ocorrência de turvação na água; podendo enquandrao o solo, de acordo com a ABNT NBR 13601 (2020), como de grau 1 de dispersão, ou seja, solo não dispersivo.

Quanto ao ensaio de desagregação, percebeu-se nas etapas de inundação da amostra, que não ocorreram mudanças significativas na forma dos corpos de prova, apenas pequenas desagregações. Porém notou-se a saída de muitas bolhas de ar. A resposta deste ensaio pode indicar um solo de comportamento sem resposta, de acordo com Holmoren e Flanagan (1977, *apud* MASCARENHA *et al*, 2023).

Os resultados dos ensaios de estabilidade dos agregados estão apresentados na Tabela 1. Os diâmetros médios ponderados (DMP) obtidos foram 1,776 e 1,838. Esses valores próximos permitem enquadrar o solo como não erodível, pelo critério de Alcântara (1997), que considera erodível o solo que apresenta DMP < 1,5 mm. Considerando o material retido nas peneiras de diâmetro igual ou inferior a 0,25 mm foi de 0,739 g para a Amostra A e 0,497 g para a Amostra B, os índices de estabilidade de agregado são, respectivamente, 96,98% e 97,97%. Com esses valores, pode-se dizer que o solo possui estabilidade entre os grãos.

Tabela 1. Porcentagens retidas em cada peneira (Autores, 2025).

Abertura da Peneira (mm)	Amostra A				Amostra B			
	Cápsula	MS (g)	%	DP	Cápsula	MS (g)	%	DP
2,00	10	20,821	85,05%	1,701	10-2	22,110	90,31%	1,806
1,00	18	1,114	4,55%	0,046	18-2	0,298	1,22%	0,012
0,50	35	1,115	4,55%	0,023	35-2	0,743	3,03%	0,015
0,25	60	0,614	2,51%	0,006	60-2	0,415	1,70%	0,004
0,15	100	0,125	0,51%	0,001	100-2	0,082	0,33%	0,01
	DMP (Σ DP)			1,776	DMP (Σ DP)			1,838

3.4 Resultados dos Ensaios de Inderbitzen

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen, realizados nas três condições da amostra, estão apresentados na Figuras 11. Essa figura apresenta a relação da massa erodida acumulada e a tensão cisalhante hidráulica.

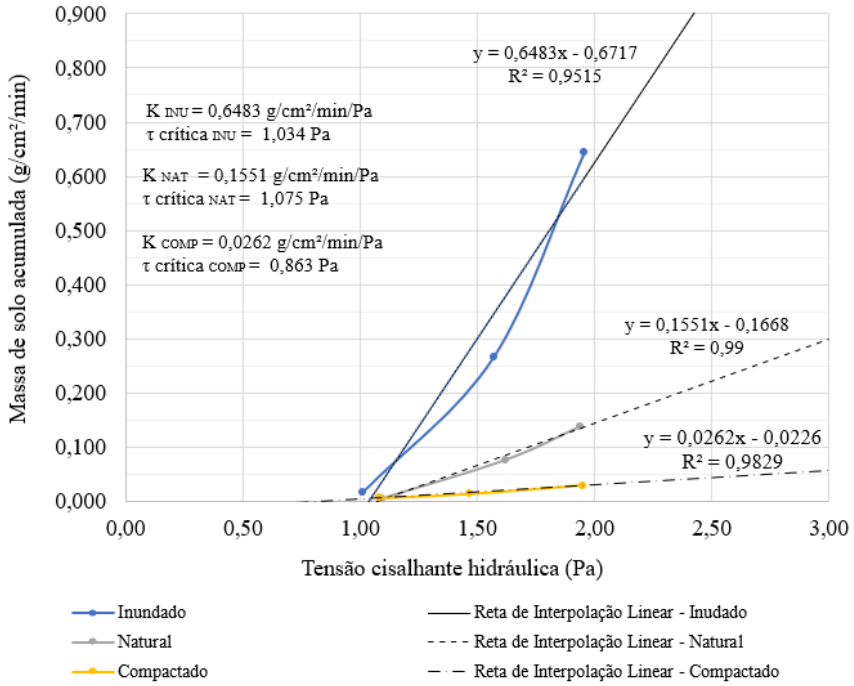


Figura 11. Massa erodida acumulada *versus* Tensão cisalhante hidráulica das amostras natural, inundada e compactada na umidade ótima (Autores, 2025)

Durante o ensaio de Inderbitzen, percebeu-se que tanto a amostra na condição previamente inundada quanto na condição de umidade natural, a perda de solo ocorreu com facilidade, com o aumento da vazão. A amostra inundada indicou um valor de K = 0,6483 g/cm²/min/Pa; e a amostra em umidade natural indicou K = 0,1551 g/cm²/min/Pa. Segundo a proposta de Bastos (1999), essas condições dos corpos de prova permitem enquadrar o solo como de alta erodibilidade. Já a amostra compactada apresentou resistência à perda de solo. A taxa de erodibilidade (K) deste corpo de prova foi de 0,0262 g/cm²/min/Pa, permitindo classificá-lo como de mediana erodibilidade, pelo critério de Bastos (1999).

4 CONCLUSÃO

O solo analisado apresenta textura predominantemente arenosa com baixo teor de finos. A avaliação da erodibilidade, fundamentada na caracterização geotécnica e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, corrobora os estudos de Llopis Trillo (1999) e Bastos (1999), indicando elevada suscetibilidade a erosão. Embora os ensaios indiretos de erodibilidade (*Crumb Test*, desagregação e estabilidade de agregados) sugiram potencial baixo de erodibilidade do solo, deve-se considerar a especificidade e as limitações desses métodos laboratoriais. Os ensaios de Inderbitzen indicaram elevadas perdas de solo e enquadramento como de alta erodibilidade do solo indeformado. Conclui-se, portanto, que o solo é potencialmente erodível, demandando medidas mitigadoras para redução do risco de erosão/deslizamentos na área. Ressalta-se que os processos erosivos locais são agravados por ações antrópicas inadequadas, como o descarte de águas servidas, a supressão da vegetação e o lançamento indiscriminado de lixo, fatores que agravam a situação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CNPq pelo apoio à realização deste trabalho através da concessão de bolsa de iniciação científica e tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, M. A. T. (1997). *Estudo da erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 129 p. Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-18072024-123116/publico/Alcantara_Marcelo_ME.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2026.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 13601. *Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (Crumb test)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 9604. *Solo - Abertura de poço ou trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 17212. *Solo – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

ASTM International (2011). ASTM D3080: *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*

Bastos, C. A. B. (1999). *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 303 p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2978/000242000.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

Lafayette, K. P. V. (2006). *Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, UFPE, 358 p. Disponível em: < https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5359/1/arquivo6543_1.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2026.

Mascarenha, M. M. A.; Mahler, C.; Lafayette, K. P. V.; Nacinovic, M. G. G.; Bandeira, A. P. N.; Almeida, J. G. R. Erosão. *In*: CARVALHO, José Camapum de *et al*. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2a ed. - São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, 2023. p. 825 - 860. *E-book*. Disponível em: <https://abms.com.br/livros/arquivos/Ebook_Solos%20N%C3%A3o%20Saturados%20no%20Contexto%20Geot%C3%A9cnico_2023.pdf>. Acesso em: 01 fev 2026.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/94

Estudo Geoambiental e Avaliação da Proposta de Reabilitação: O Caso do Aterro Controlado em Santa Luzia/MG

Raquel Cristina de Souza Otone
Graduanda em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, raquelsouzac18@gmail.com

Diogo Reis Passos Sana Morais
Graduando em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, diogosanna@gmail.com

Rosa Maria Matos Aguiar
Graduanda em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, rosamariamatosagui@gmail.com

Emanuelle Vitoria Menezes Magalhães
Graduanda em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, emanuellemagalhaes414@gmail.com

Gustavo Ferreira Simões
Professor, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, gustavo@desa.ufmg.br

RESUMO: O licenciamento ambiental de aterros sanitários exige a apresentação de informações relativas ao projeto, implantação, operação, monitoramento, plano de encerramento e uso futuro da área após o término de sua vida útil. O aterro sanitário analisado neste estudo, localizado no município de Santa Luzia (MG), atendeu a essas exigências durante a fase de concepção e solicitação das licenças ambientais. Entretanto, ao longo de sua vida útil, diversas alterações foram propostas e submetidas aos órgãos ambientais. A análise do histórico do empreendimento no Sistema Integrado de Informação Ambiental de MG revelou incompatibilidades entre as intervenções executadas e o projeto original aprovado. Este trabalho apresenta um estudo geoambiental com o objetivo de avaliar a condição atual do aterro em comparação ao projeto inicial, incluindo a verificação da implantação e do desempenho de elementos essenciais ao encerramento, com destaque para a camada de cobertura final, os sistemas de drenagem interna e superficial, o isolamento físico da área e o programa de monitoramento ambiental. A avaliação, baseada em análise documental e visitas de campo, identificou potenciais riscos ambientais e socioeconômicos, incluindo exsudação de lixiviados, indícios de compactação inadequada, processos erosivos localizados e evidências de acesso de animais à área. Também é apresentada uma análise crítica das propostas de encerramento do empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros controlados, Resíduos Sólidos Urbanos, Recuperação de áreas degradadas, Diagnóstico geoambiental.

ABSTRACT: Environmental licensing of landfills requires the submission of technical information related to their design, construction, operation, monitoring, closure plan, and post-closure land use. The landfill analyzed in this study, located in Santa Luzia, Minas Gerais, Brazil, met these requirements during the environmental licensing process at the design stage. However, throughout its operational life, several modifications were proposed and submitted to environmental agencies. An analysis of its historical records in the Integrated Environmental Information System of Minas Gerais revealed multiple inconsistencies with the original design. This study presents a geoenvironmental assessment aimed at evaluating the current condition of the landfill in comparison with the original project. The analysis includes verification of the implementation and performance of essential closure components, such as the final cover system, internal and surface drainage structures, physical isolation measures, and the environmental monitoring program. Based on document analysis and field inspections, the assessment identified potential environmental and socioeconomic risks. The main issues observed include leachate seepage at multiple locations, evidence of inadequate waste compaction, localized erosion processes, and signs of animal access to the disposal area. A critical evaluation of the proposed closure measures is also presented, considering the geoenvironmental conditions of the site.

KEYWORDS: Controlled landfills, Municipal solid waste, Degraded area recovery, Geoenvironmental diagnosis.

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) traz como um de seus objetivos a disposição final ambientalmente correta de resíduos sólidos urbanos (RSU), que deve ocorrer de maneira organizada em aterros, seguindo normas técnicas e operacionais, com o propósito de reduzir impactos ambientais e proteger a saúde pública. Um aterro sanitário é, portanto, a técnica da engenharia para se dispor tais resíduos no solo, confinando-os e cobrindo-os com uma camada de terra a cada jornada de trabalho (ABNT, 1992).

Nessa perspectiva, essas estruturas são fundamentais para a manutenção dos centros urbanos e da vida em sociedade, proporcionando destinação final àqueles materiais cuja utilidade já foi esgotada e mantendo as cidades livres do acúmulo de lixo. Entretanto, caso os aterros não sejam bem projetados e/ou executados, sua função pode ser prejudicada e consequências socioambientais podem ser ocasionadas, tais como contaminação de corpos hídricos e favorecimento de ambientes favoráveis à proliferação de vetores de doenças.

Diante disso, toda a vida útil de um aterro sanitário deve seguir pré-requisitos para a garantia de sua função primordial, exigindo-se que seja bem projetado, executado e, ao final do cumprimento de seu papel, seja encerrado de maneira a preservar sua estanqueidade no ambiente.

Trabalhos como de Santos e Jucá (2023) e Silva *et al.* (2024) apresentam diagnósticos geoambientais realizados em dois lixões desativados no nordeste do Brasil, em Alagoas e na Bahia, apresentando levantamentos topográficos, estudos de parâmetros físico-químicos do solo e águas superficiais, análises de estabilidade de taludes, avaliação da drenagem superficial e monitoramento das estruturas, além da proposição de medidas à serem executadas a fim de viabilizar o correto encerramento dos empreendimentos. Essas obras demonstram a possibilidade de um eficiente gerenciamento de ambientes de disposição final de RSU e despertam alternativas para serem propostas a estruturas similares em outros locais.

À luz desses princípios, esse artigo versa sobre um diagnóstico geoambiental realizado no Aterro de RSU do Barreiro do Amaral, localizado no município de Santa Luzia/MG, desativado em 2018, bem como uma avaliação da proposta de reabilitação da área, realizada no ano de 2022 por meio de um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), com fim de validar as medidas propostas e analisar sua viabilidade e atendimento aos critérios necessários para um eficiente encerramento do empreendimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem adotada para a realização do estudo geoambiental contemplou a análise da área de estudo, a caracterização geral do local, o levantamento de dados regionais, a consulta a documentos técnicos e a realização de visitas técnicas para inspeção e avaliação visual da estrutura em análise.

As informações técnicas e dados utilizados neste estudo foram extraídas do Parecer Técnico DISAN nº 542423/2006 do Processo COPAM nº 00201/1990/005/2006 (DISAN, 2006), que constitui a principal fonte documental desta análise.

2.1 Área de Estudo

O aterro controlado em estudo localiza-se no município de Santa Luzia, Minas Gerais, na região do Barreiro do Amaral, a aproximadamente 27 km da capital do estado. O município possui área territorial de 235,079 km² e população estimada em 219.132 habitantes, segundo o Censo 2022 do IBGE.

A imagem aérea da área evidencia a configuração geométrica do maciço, a disposição dos taludes e sua inserção no relevo local (Figura 1). Verifica-se que a estrutura está implantada em área delimitada por talvegues adjacentes, com desenvolvimento longitudinal condicionado pela morfologia natural do terreno.



Figura 1. Vista atual do aterro.

Segundo entrevistas realizadas com moradores da região e servidores públicos vinculados à gestão municipal, a área funcionou como lixão entre 1992 e 2001, quando medidas operacionais adequadas tiveram início. A partir de 2005 a área começou a operar como aterro controlado, com os resíduos dispostos em células compactadas e cobertas com solo. O aterro teve suas atividades encerradas no ano de 2018. De acordo com DISAN (2006), o local recebia, durante sua operação, em média cerca de 80 t/dia de RSU.

2.2 Materiais Avaliados

Com o objetivo de compreender o histórico, a concepção e a evolução do aterro, foram analisados documentos técnicos e administrativos relacionados ao empreendimento, incluindo pareceres técnicos, termos de composição judicial e informações vinculadas ao processo de licenciamento ambiental.

Além disso, foram realizadas visitas técnicas à área, conversas com servidores públicos e levantamento aéreo por drone, os quais subsidiaram a compreensão da situação atual do local e a caracterização da morfologia e topografia do terreno.

2.3 Critérios de Avaliação

A avaliação da condição atual do aterro considerou a ocorrência de escorregamentos e processos erosivos, integridade dos sistemas de drenagem superficial e da camada de cobertura final, bem como indícios de exsudação de lixiviados.

A estabilidade dos taludes não pode ser avaliada, pois não foram obtidas informações sobre a topografia inicial, composição dos RSU, níveis internos de poro-pressões de líquidos e gases e dados sobre o processo de compactação utilizado.

3 RESULTADOS

3.1 Condições gerais

O mapa com curvas de nível permite analisar a compartimentação topográfica e a variação altimétrica do sítio (Figura 2). As curvas indicam a adaptação do corpo do aterro ao relevo preexistente, bem como os

gradientes associados aos taludes e às áreas adjacentes. O desnível máximo observado entre o topo do aterro e a região mais baixa, próxima ao Rio das Velhas (situado na porção norte da Figura 2) é de aproximadamente 80 m. Essa proximidade exige atenção ambiental, pois fluxos superficiais e subterrâneos podem representar aportes pontuais adicionais de contaminantes. Embora a qualidade do rio já se encontre comprometida por usos a montante, conforme relatórios do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), destaca-se a importância do monitoramento para avaliação de possíveis contribuições locais.

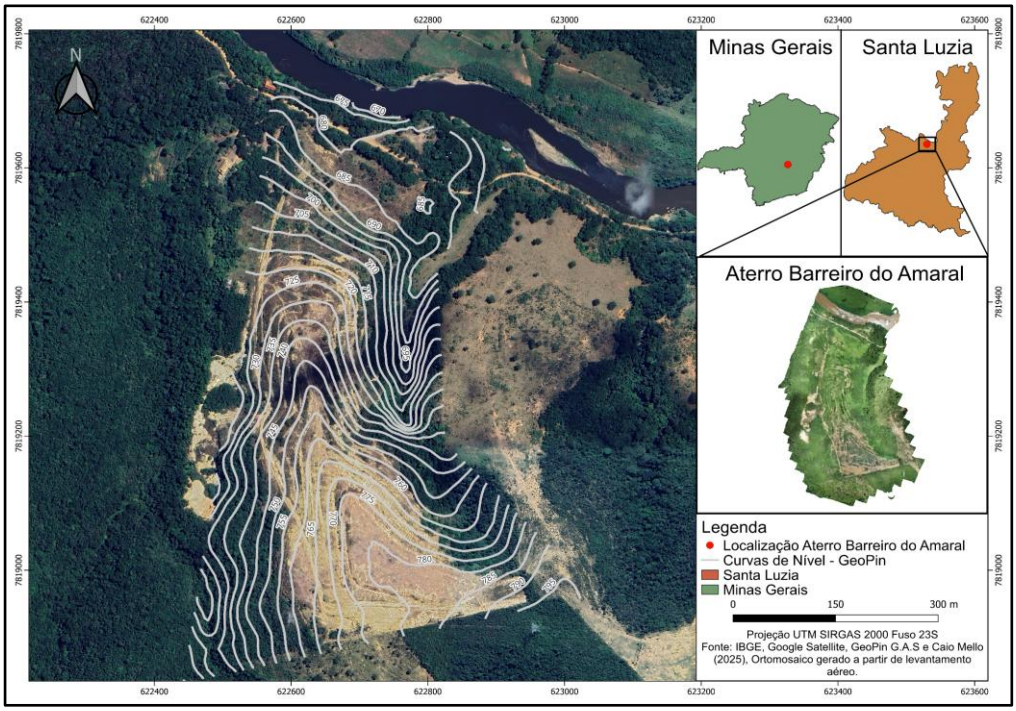


Figura 2. Curvas de nível da área do aterro.

3.2 Caracterização geotécnica do subsolo - Dados preexistentes

Como referência técnica, foram utilizados dados de investigações geotécnicas realizadas em setembro de 2005, constantes no parecer DISAN/2006, que contemplaram 16 sondagens SPT com profundidades de até 10,8 m, nas quais o subsolo foi descrito como composto por solo argiloso superficial, camada siltosa intermediária e filito muito alterado em profundidade, sem registro de nível d'água.

A partir dos valores de SPT, concluiu-se que a resistência da fundação, associada à altura prevista do aterro, seria suficiente para não condicionar possíveis superfícies de ruptura, motivo pelo qual foram dispensados ensaios de cisalhamento direto e adensamento, sob a justificativa de que os recalques seriam pouco significativos. Embora essas condições tenham sido consideradas satisfatórias pelos projetistas, não foram localizados documentos técnicos que evidenciem tais verificações.

Adicionalmente, também foram executados ensaios de granulometria, limites de consistência, umidade, compactação e permeabilidade. Na análise de condutividade hidráulica, resultados indicaram coeficientes da ordem de 10^{-4} cm/s (in situ) e entre $8{,}46 \times 10^{-7}$ e $7{,}38 \times 10^{-7}$ cm/s (laboratório) e essa divergência pode estar associada a fatores metodológicos e às próprias condições do maciço. Ensaios in situ tendem a captar a influência de heterogeneidades, fissuras e caminhos preferenciais de fluxo existentes no solo natural, o que pode resultar em coeficientes mais elevados, como os da ordem de 10^{-4} cm/s, compatíveis com materiais siltoso-arenosos, mais drenantes. Por outro lado, os ensaios laboratoriais, realizados em amostras coletadas, podem refletir de forma mais restrita a matriz do solo, além de estarem sujeitos a alterações decorrentes da amostragem, manuseio e recomposição do corpo de prova, contribuindo para valores significativamente menores, como os da ordem de 10^{-7} cm/s, característicos de solos argilosos, naturalmente mais impermeáveis.

3.3 Geometria e Inclinação dos taludes

Conforme o parecer DISAN/2006, a geometria projetada para o aterro previa 7 maciços, altura total de 38,35 m, taludes com inclinação 1:2,5 (V:H), ou 40%, e bermas de 4,0 m de largura. Entretanto, o Mapa de Declividade (Figura 3) e a vistoria de campo indicam que a configuração atual não mantém essa uniformidade. Na porção leste predominam classes ondulado (30% a 47%) e forte ondulado (47% a 100%), distribuídas de maneira irregular ao longo dos taludes, evidenciando ausência de padronização geométrica na disposição e conformação dos resíduos.

Na região central do aterro prevalecem declividades suaves (0 a 30%). Ainda assim, a presença de áreas com declividade superior a 40% demonstra a ocorrência de inclinações localmente mais elevadas que a prevista em projeto. Essa heterogeneidade pode estar relacionada a recalques diferenciais e/ou à falta de controle técnico nas etapas de alteamento, favorecendo concentrações de tensões e possíveis instabilidades localizadas, sobretudo sob a influência da água.

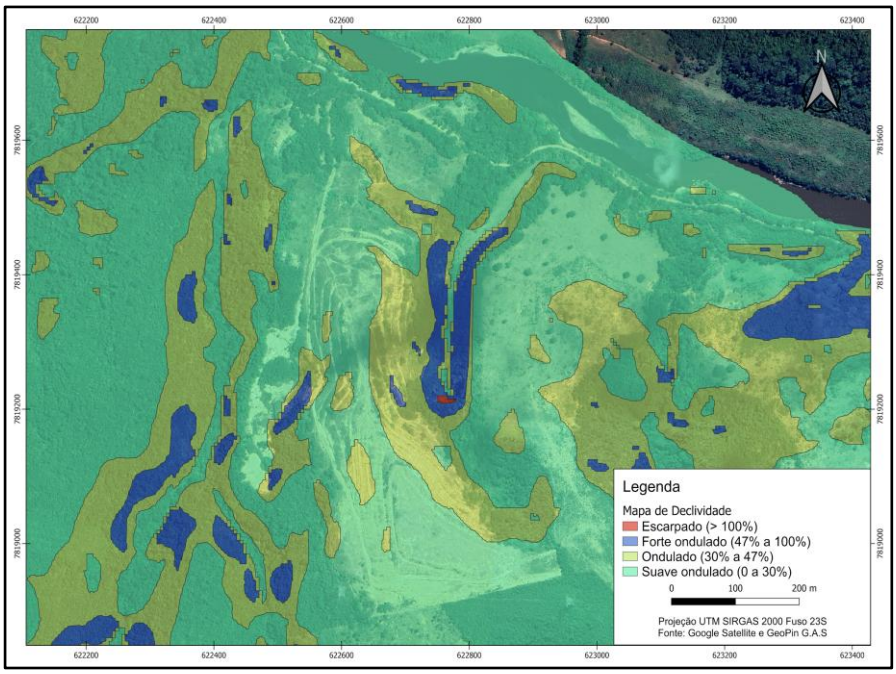


Figura 3. Mapa de declividade do aterro.

3.4 Manifestações de instabilidade superficial

Durante a inspeção de campo, conforme evidenciado nas imagens apresentadas (Figura 4), constataram-se erosões superficiais expressivas, com formação de ravinas profundas resultantes do escoamento concentrado, além de escorregamentos rasos e rupturas localizadas de talude, caracterizadas pela exposição de solo recentemente mobilizado e pela presença de cicatrizes de ruptura bem definidas. Observam-se ainda indícios de movimentação do maciço em setores específicos, evidenciados pela desagregação do material superficial e pela alteração da geometria original do talude.

Registrou-se também a ocorrência de vegetação arbórea arrancada e inclinada, com sistema radicular exposto, indicando deslocamento do material e perda de suporte superficial. Destaca-se que a presença de espécies vegetais de porte médio e principalmente com sistema radicular profundo, observada em diversos pontos da área, não é recomendada, pois compromete o desempenho da camada de cobertura final.

Ressalta-se que, embora distintos das instabilidades estruturais profundas do maciço, os processos erosivos identificados contribuem indiretamente para sua degradação, ao intensificar a remoção de material, favorecer a exposição de resíduos e potencializar a exsudação de líquidos lixiviados, além de acelerar a progressão de mecanismos de instabilidade superficial.



Figura 4. Ravina e escorregamento.

3.5 Drenagem e emissão de gases

O paracer DISAN (2006) descreve o sistema de drenagem superficial do aterro, composto por canaletas de concreto que conduzem as águas pluviais para caixas de passagem, descidas d'água, dissipadores e bacias de infiltração. Na última plataforma, a drenagem seria feita por canaleta moldada in loco, com caimento mínimo de 1,5% em direção ao eixo do aterro. A drenagem interna de líquidos lixiviados previa o sistema em "espinha de peixe", com tubos perfurados de PEAD envoltos em brita e geomembrana, conduzindo o lixiviado a uma bacia temporária para posterior envio à ETE da Copasa.

Durante a visita técnica, foram identificados problemas relacionados aos sistemas de drenagem e aos processos de percolação no maciço. Em trechos das bermas do lado leste, foram observados dispositivos de drenagem superficial desalinhados ou tombados, em decorrência de movimentações nos taludes. Além disso, próximo às manilhas, foi encontrado um líquido de origem não caracterizada, possivelmente associado à água pluvial e/ou líquidos lixiviados. Em outros pontos, observa-se o afloramento de lixiviado oriundo do interior dos taludes que, por vezes, apresenta odor desagradável e se propaga pelas bermas (Figura 5).



Figura 5. Manilha tombada e ponto com afloramento de lixiviado.

Em várias regiões, o pisoteio de animais provoca exsudação de líquidos, evidenciando elevada umidade e provável saturação localizada. Adicionalmente, observaram-se dois pontos de empoçamento de água no topo do maciço, que podem contribuir para a infiltração e consequente geração de lixiviados. Quanto à drenagem de gases, o parecer DISAN (2006) previa drenos verticais de concreto perfurado com queima na superfície, distribuídos em 100 unidades interligadas por rede horizontal, formando sistema contínuo de extração e queima dos gases. Durante a visita, esse sistema não foi identificado, possivelmente devido ao crescimento da vegetação ao longo dos anos ou a outras circunstâncias.

3.6 Presença de pessoas e animais

A ausência de sinalização e controle de acesso favorecem a entrada de pessoas e animais que, como foi constatado, circulavam pela área (Figura 6). A presença de animais de grande porte ao longo da estrutura evidencia não só a falta de gerenciamento da estrutura após encerramento das atividades, bem como os riscos associados à presença de resíduos expostos, líquidos potencialmente contaminantes, superfícies irregulares e áreas com instabilidade superficial.

O parecer DISAN/2006 previa o isolamento total da área com mourões de concreto e cerca de arame farpado, além de portão para veículos e pedestres e guarita para controle de acesso. Também propunha a implantação de um cinturão verde de cerca de 20 m de largura, com cerca-viva de sansão-do-campo e cortina de árvores nativas plantadas, a ser executado simultaneamente às obras do empreendimento. Em campo, verificou-se a existência de cercamento em condições precárias, com trechos danificados que comprometem sua efetividade. Não foram observados controle formal de acesso nem a implantação do cinturão verde conforme previsto, evidenciando atendimento apenas parcial às medidas estabelecidas.



Figura 6. Presença de animais de grande porte na estrutura.

4 DISCUSSÃO

A proposta de encerramento apresentada no parecer DISAN/2006 mostra-se tecnicamente adequada frente às manifestações geotécnicas, hidráulicas e ambientais identificadas em campo, ao prever encapsulamento dos maciços, implantação de camada de cobertura final impermeabilizante, manutenção da drenagem e controle de lixiviados e gases. Tais diretrizes estão alinhadas aos processos observados — infiltração, surgências de lixiviados, erosões superficiais e instabilidades localizadas — indicando coerência entre diagnóstico e medidas propostas. A associação entre a cobertura final e a drenagem superficial tende a mitigar a infiltração pluvial e a degradação do maciço, enquanto a implantação de vegetação contribui para estabilização superficial, minimizando processos erosivos.

Entretanto, as condições atualmente verificadas evidenciam significativa desconformidade entre o previsto e o existente. Observa-se comprometimento da camada de cobertura final, ausência ou irregularidade de cobertura vegetal e praticamente inexistência de dispositivos de drenagem superficial. Esse cenário favorece a intensificação de processos erosivos, com exposição de resíduos e exsudação de lixiviados nos taludes. A coexistência de erosões ativas, surgências, acúmulos de água e instabilidades superficiais caracteriza situação de vulnerabilidade ambiental e estrutural, agravada pela proximidade de residências e de corpo hídrico, que ampliam o potencial de exposição a contaminantes.

Embora não tenham sido observadas manifestações críticas iminentes no momento da inspeção, as condições verificadas evidenciam um quadro de instabilidade potencial, passível de agravamento na ausência de monitoramento sistemático e gestão pós-encerramento. Ademais, a limitação de registros e informações técnicas disponíveis restringe a compreensão da evolução do maciço e dificulta análises mais consistentes.

Essa deficiência documental, recorrente em antigos locais de disposição de resíduos no Brasil, compromete diagnósticos mais precisos e a definição de medidas corretivas técnica e ambientalmente mais fundamentadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagnóstico da situação atual do aterro sanitário desativado evidenciou que, embora as operações tenham sido encerradas, a área ainda apresenta condições que demandam atenção sob os aspectos geotécnicos, ambientais e de segurança. A inspeção de campo, caminhamento e sobrevoo de drone, associados às informações técnicas disponíveis, permitiram identificar processos erosivos superficiais, falhas no sistema de drenagem superficial, surgências de lixiviados e acúmulo de água, indicando ausência ou ineficiência de medidas de conservação pós-encerramento.

A caracterização geotécnica do subsolo e do maciço mostrou-se bastante limitada e superficial, não sendo suficiente para subsidiar uma avaliação consistente da estabilidade global, das condições de percolação ou do comportamento mecânico dos materiais. A escassez de investigações e de registros técnicos compromete análises mais robustas e evidencia a necessidade de campanhas complementares de sondagens, ensaios laboratoriais e integração com estudos hidrogeológicos, de modo a permitir diagnóstico mais confiável e tecnicamente fundamentado.

Os resultados demonstram que a simples desativação do aterro não garante estabilidade e segurança a longo prazo. Torna-se imprescindível a implementação de ações sistemáticas de manutenção, incluindo recomposição de taludes, recuperação da cobertura final, readequação dos sistemas de drenagem superficial e monitoramento contínuo das condições hidráulicas e geotécnicas.

Conclui-se que a elaboração e execução de um plano estruturado de conservação, investigação complementar e reabilitação são fundamentais para mitigar as vulnerabilidades identificadas, reduzir incertezas técnicas e assegurar condições mínimas de estabilidade e conformidade com as normativas vigentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Caio César de Sousa Mello, a Flávio Henrique Vieira de Resende, a Christian Novy e a Sarah Otoni pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419. *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro.

BRASIL. Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 de agosto de 2010.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Boletim Anual de Qualidade das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte: Igam, 2021.

Santos, M. M. B.; Jucá, J. F. T. (2023). *Estudo de caso sobre a investigação geoambiental e elaboração de projeto conceitual para encerramento do lixão no município de Itacaré - BA.* Anais X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023), ABMS, Salvador, Bahia.

Silva, E. L.; Marques, S. K. J.: De Souza, R. F. M. (2024). *Análise ambiental do antigo lixão no povoado Algodãozinho em Palmeira dos Índios, Alagoas, Brasil.* Revista Geo Ambiente, Universidade Federal de Jataí, Jataí, Goiás.

MINAS GERAIS. Parecer Técnico DISAN nº 542423/2006. Processo COPAM nº 00201/1990/005/2006. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), 2006.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/95

Estudo Mecânico da Adição de Lodo de ETA e Cinza de Caldeira em Solo para uso em Barreiras Minerais

Ingrid Leticia Andrusczak
Discente do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, 22012721@uepg.com.br

Maitê Milléo Almeida
Discente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, maitemilleo12@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus
Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Lautenschläger
Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

RESUMO: Nos processos de tratamento convencional da água para torná-la potável, é gerado um material semissólido, denominado Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA). Este material é classificado como resíduo, cuja forma de descarte adequada ocorre em aterros sanitários. A natureza do lodo de ETA dificulta seu emprego em aplicações de engenharia, de forma que pesquisas vêm sendo desenvolvidas para estudar formas de reutilizar esse material e reduzir a sobrecarga em aterros sanitários. Além do lodo, os aterros sanitários podem receber diariamente outros tipos de resíduos, como cinzas de processos industriais. Nesta pesquisa foram estudadas composições de lodos de ETA e cinza volante com solo, buscando soluções de engenharia com aproveitamento destes materiais em camadas de fundo e cobertura de barreiras minerais, componentes do sistema de isolamento em aterros sanitários. Para uma aplicação viável no contexto em estudo, uma das características que as misturas devem apresentar é uma resistência ao cisalhamento adequada aos esforços decorrentes do alteamento do aterro. Para essa análise mecânica, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica dos materiais, bem como ensaio de cisalhamento direto, a fim de conhecer suas características e sua resistência, avaliando a viabilidade técnica para a aplicação proposta. Os resultados indicaram que as misturas contendo lodo e cinza volante apresentaram bons resultados, destacando-se a mistura com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza, que apresentou o melhor desempenho mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de Estação de Tratamento de Água, Cinza Volante de Caldeira, Ensaio de Caracterização, Cisalhamento Direto.

ABSTRACT: In conventional water treatment processes to make it potable, a semi-solid material is generated, called Water Treatment Plant Sludge (WTPS). This material is classified as waste, and its proper disposal method occurs in sanitary landfills. The nature of WTP sludge hinders its use in engineering applications, so research is being developed to study ways to reuse this material and reduce the burden on landfills. In addition to sludge, landfills can receive other types of waste daily, such as ash from industrial processes. In this research, compositions of WTP sludge and fly ash with soil were studied, seeking engineering solutions with the utilization of these materials in bottom and cover layers of mineral barriers, which are components of landfill containment systems. For a viable application in the context under study, one of the characteristics that the mixtures must present is a shear strength adequate to the stresses resulting from the landfill lifting. For this mechanical analysis, geotechnical characterization tests of the materials were performed, as well as direct shear tests, to know their characteristics and strength, evaluating technical feasibility for the proposed application. The results indicated that the mixtures containing sludge and fly ash showed good results, highlighting the mixture with 80% soil, 10% sludge, and 10% ash, which presented the best mechanical performance.

KEYWORDS: Water Treatment Plant Sludge, Boiler Fly Ash, Characterization Test, Direct Shear.

1 INTRODUÇÃO

Para que a água seja considerada potável, ela precisa atender aos padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que trata do processo de controle e vigilância da qualidade da água para consumo. O tratamento é realizado em Estações de Tratamento de Água (ETA) e depois distribuída à população pelas companhias de saneamento. O processo de tratamento de água mais utilizado é o Convencional (de ciclo completo), que possui os processos de aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (Florençano, 2011). No processo de decantação o material mais denso, conhecido como lodo, sedimenta até o fundo do decantador, onde posteriormente é retirado e descartado.

A destinação correta dos lodos de estação de tratamento de água (LETA) é o aterro sanitário, mas muitas vezes este material é descartado incorretamente em corpos hídricos. Pensando em formas de evitar o descarte incorreto e a ocupação de grandes volumes em aterros sanitários, pesquisas buscam formas de reutilizar este material, bem como muitos outros resíduos descartados, como é o caso da cinza volante de caldeira. As cinzas volantes de caldeira são produzidas diariamente através da queima de carvão mineral para produção de energia, sendo as usinas termoelétricas uma das principais indústrias geradoras desse material, utilizando, em sua maior parte, madeira na queima para combustão, devido a disponibilidade e custo desse material (Bobato e Borges, 2023).

Muitos estudos buscam formas de utilizar esses materiais na construção civil, como é o caso do estudo de Ruviaro et al. (2020) e Vasconcelos *et al*. (2004), que estudaram a utilização de lodo como material cimentício e cinza volante em argamassas e misturas asfálticas, respectivamente. Também são amplamente utilizados na geotecnia, em mistura com solos, como nos estudos de Fiedler (2023) e Almeida (2024) que incorporaram lodo em solo para utilização em barreiras minerais. Dessa forma, o presente estudo fundamenta-se nas pesquisas dessas autoras, propondo a incorporação do lodo em solo com a adicão de cinza volante de caldeira para uso em barreiras minerais, como os próprios aterros sanitários no qual ambos são descartados.

2 Materiais e métodos

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG), localizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) em Ponta Grossa (PR). O lodo foi coletado na estação de tratamento de água da SANEPAR em Iraí – Curitiba (PR). A cinza volante foi produzida e coletada pela empresa Cargill. As amostras foram armazenadas em tambores e levadas até o laboratório para serem utilizadas nas pesquisas.

Baseando-se em pesquisas anteriores com a incorporação de lodo em solo, visando uma melhor avaliação da influência da cinza volante, o lodo foi fixado em uma adição de 10% nas misturas, em relação à massa seca total, variando a porcentagem de cinza em 5, 10 e 15%. Para bom desempenho da análise foram consideradas misturas com e sem a adição de lodo, como também misturas de solo-lodo e análise de cada componente separadamente.

Foram realizados ensaios de caracterização das amostras de solo, lodo, cinza e das misturas de solo-cinza e solo-lodo-cinza, para os diferentes teores em estudo. Os ensaios realizados para conhecer as características dos materias foram: a determinação do teor de umidade (conforme a norma da ABNT NBR 6457/2024), o peso específico real dos grãos (conforme a DNER-ME 093/1994), a granulometria (conforme a norma da ABNT NBR 7181/2025), os Limites de Atterberg (limite de liquidez - conforme a norma da ABNT NBR 6459/2025 e limite de plasticidade – conforme a norma da ABNT NBR 7180/2025) e a compactação (conforme a ABNT NBR 7182/2025).

Após a obtenção das características dos materiais e das misturas, foram realizados ensaios de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resitência das amostras. Os ensaios foram realizados na condição saturada utilizando o equipamento MS100 – Cisalhamento Automático, da marca Owntec, sob três níveis de tensão normal: 50, 100 e 200 kPa, para obtenção da envoltória de resistência indicativa do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo representativo de cada condição estudada.

3 Resultados

Primeiramente as amostras foram preparadas seguindo a NBR 6457/2024, na qual o solo foi seco ao ar livre e destorroado a fim do material ficar com sua umidade natural e sem torrões. As amostras de lodo e cinza foram utilizadas *in natura*.

O primeiro ensaio de caracterização realizado foi o teor de umidade na condição natural, onde o solo apresentou 2%, a cinza 6,2% e o lodo utilizado para a caracterização apresentou valores entre 305,47% e 342,87%. Segundo a análise granulométrica realizada por Bloinski *et al.* (2020), o solo pertencente o Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) foi classificado como uma argila areno-siltosa com baixa plasticidade pela análise granulométrica e pelo método SUCS como um silte de baixa plasticidade. O lodo, em sua forma natural, foi classificado como um silte orgânico (OH) e a cinza volante com sua maior porcentagem de areia, após o peneiramento grosso e fino. Os dados completos da caracterização dos materiais constam na Tabela 1.

Os ensaios de caracterização das amostras confirmam a alta plasticidade do lodo e baixa plasticidade do solo, assim como a baixa plasticidade da cinza. Também pode ser observado que a cinza é um material de baixa densidade, levando as amostras que possuem maior porcentagem de cinza a um peso específico real dos grãos com menores valores, sendo o solo seguido do lodo os materiais mais densos.

Tabela 1. Caracterização das amostras de solo, lodo, solo-lodo, solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Amostras			Peso esp. real dos grãos (gf/cm³)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Peso específico aparente seco (γ_d) (gf/cm³)	Umidade Ótima (%)
Solo	Lodo	Cinza						
100%	0%	0%	2,669	37	-	NP	1,498	24,55
0%	0%	100%	1,159	-	-	NP	-	-
95%	0%	5%	2,695	36	31	5	1,365	27,70
90%	0%	10%	2,639	39	34	5	1,033	32,00
85%	0%	15%	2,343	38	-	NP	1,222	35,90
0%	100%	0%	2,051	487	392	95	-	-
90%	10%	0%	2,566	34	-	NP	1,079	46,30
85%	10%	5%	2,331	43	39	4	1,0325	35,00
80%	10%	10%	2,054	47	41	6	1,119	40,00
75%	10%	15%	1,993	52	-	NP	1,200	37,30

Devido ao excesso de vazios da amostra de cinza e característica semissólida do lodo, não foi possível realizar o ensaio de compactação com essas amostras. Dessa forma, para a moldagem dos demais corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto, foi adotada como referência a umidade ótima da mistura de solo-lodo já estudada pelo grupo em estudos anteriores, conforme determinado por Almeida (2024).

Por fim, realizou-se o ensaio de cisalhamento direto com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras estudadas. Os ensaios foram realizados com as amostras na condição inundada, permitindo o preenchimento dos vazios da amostra, visando diminuir eventuais efeitos de sucção que poderiam interferir na análise dos resultados. Os parâmetros de resistência analisados foram definidos pelo critério de Mohr-Coulomb através do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno resultante da construção das envoltórias de resistância, obtidos através do gráfico de tensão normal versus tensão cisalhante. Os gráficos podem ser observados nas Figuras 1, 2 e 3, bem como os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito na Tabela 2.

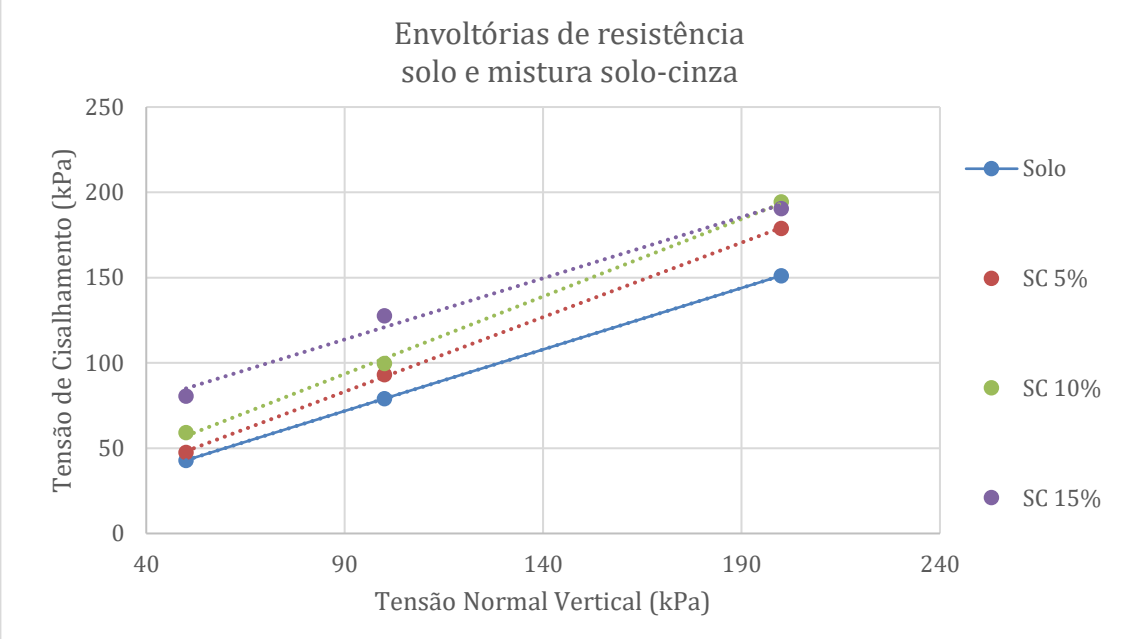


Figura 1. Tensão normal x tensão cisalhante das amostras de solo e solo-cinza.

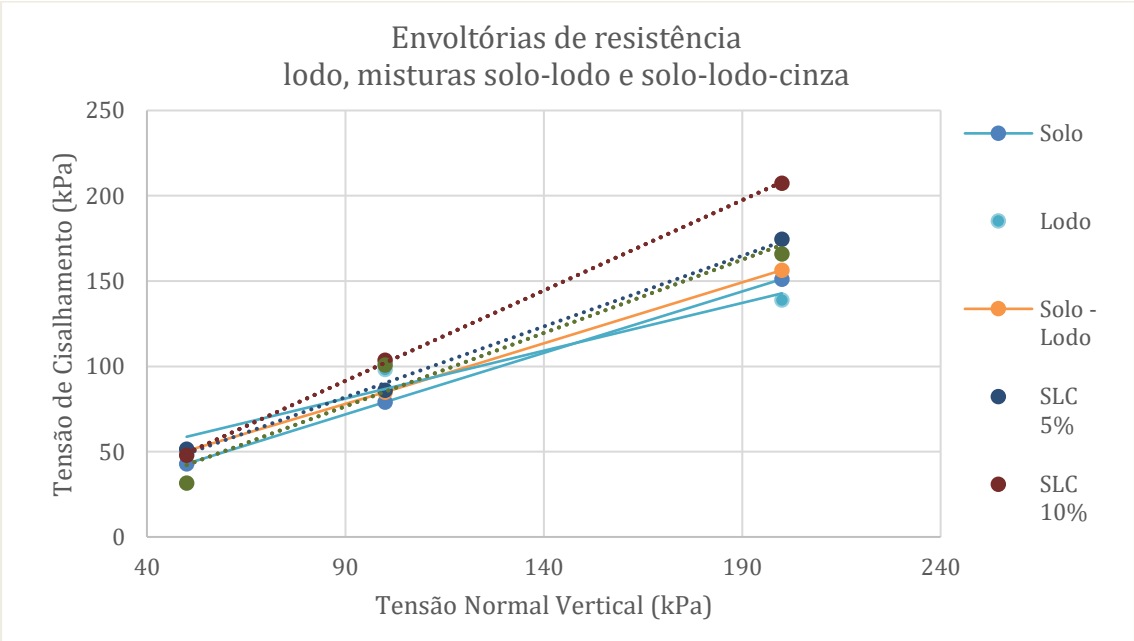


Figura 2. Tensão normal x tensão cisalhante das amostras de solo, lodo, solo-lodo e solo-lodo-cinza.

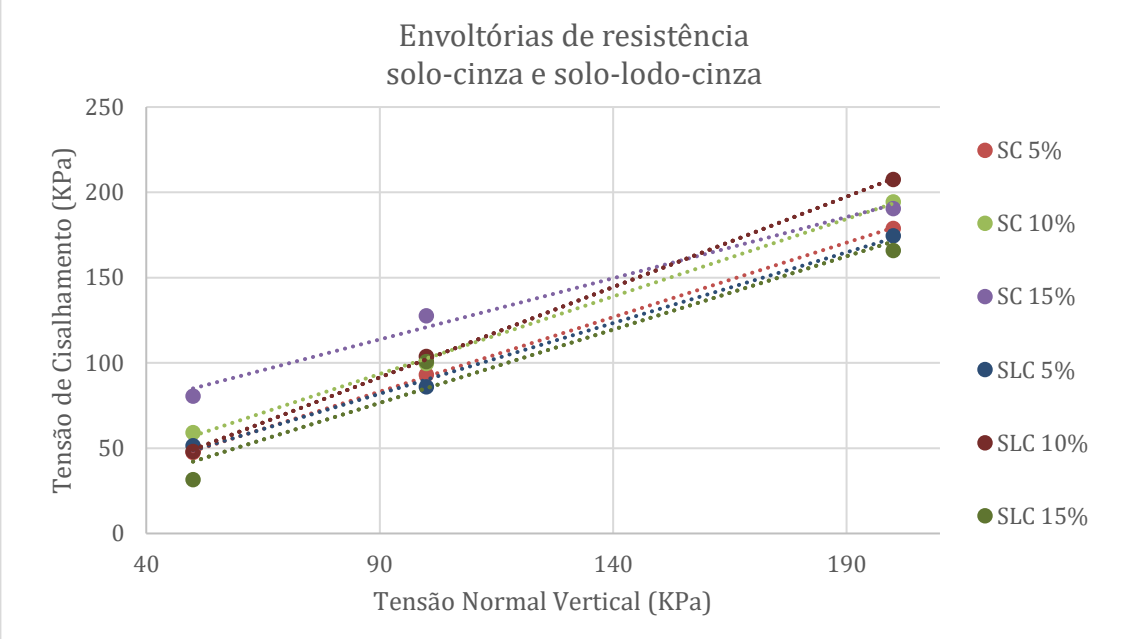


Figura 3. Tensão normal x tensão cisalhanete das amostras de solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Para melhor visualização os gráficos foram divididos em gráfico do solo e solo-cinza (Figura 1), gráfico de solo, lodo, solo-lodo e solo-lodo-cinza (Figura 2) e solo-cinza e solo-lodo-cinza (Figura 3). Devido às carcterísticas das cinza no estado puro, que dificultam a compactação e o controle do peso específico em relação a um valor objetivo, não foi possível realizar o ensaio com corpos de prova compostos apenas de cinza.

Na Tabela 2 podem ser observados os valores de intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito das amostras (ϕ), onde as porcentagens apresentadas são referentes a amostra de cinza, o lodo fixado em 10% e o solo apresentando a diferença desses valores.

Tabela 2. Parâmetros de resistência das amostras de solo, lodo, solo-lodo, solo-cinza e solo-lodo-cinza.

Amostra			Coesão	Ângulo de atrito
Solo	Lodo	Cinza	(KPa)	(º)
100%	0%	0%	6,85	35,8
0%	100%	0%	30,69	29,3
90%	10%	0%	14,7	35,3
95%	0%	5%	4,56	41,1
90%	0%	10%	32,38	40,4
85%	0%	15%	49,11	35,7
85%	10%	5%	7,25	39,7
80%	10%	10%	0	45,9
75%	10%	15%	0	40,5

Com as curvas dos gráficos e resultados dos parâmetros de resistência das amostras, pode ser observado que as amostras de solo incorporadas com lodo de ETA e cinza volante apresentaram bom desempenho de resistência, com valores de ângulo de atrito interno maiores que as amostras com 100% de solo e 100% de lodo.

As misturas de solo que contém os teores de 5% e 10% de cinza tiveram resultados mais satisfatórios que a mistura com 15% de cinza, já as misturas que contém teores de lodo e cinza, tiveram melhores resultados com os maiores teores de cinza, sendo a amostra com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza a amostra com o melhor resultado de todos os ensaios. Com isso, pode ser observado que a adição conjunta do lodo e da cinza exige proporções específicas para o melhor desempenho das misturas.

Observou-se ainda que algumas misturas apresentaram intercepto coesivo próximo de zero, sendo as amostras com presença de lodo e maior porcentagem de cinza as amostras com este resultado. Esse comportamento indica que estas amostras apresentam menores resistências sob baixos níveis de confinamento, quando comparado com outras amostras em estudo.

Além disso, os resultados mostram que, mesmo apresentando elevada umidade e plasticidade, a incorporação do lodo em solo não comprometeu o desempenho mecânico das misturas quando utilizado em proporções reduzidas, assim como a volumetria da cinza volante. Dessa forma, os resultados indicam que a combinação entre solo, lodo de ETA e cinza volante pode contribuir para melhorar o comportamento mecânico do material, ao mesmo tempo em que possibilita o aproveitamento de resíduos que normalmente seriam descartados.

4 Conclusão

As misturas de solo-lodo-cinza apresentaram resultados satisfatórios, melhorando a resistência do solo, sendo viável a utilização das misturas. A amostra de solo-lodo-cinza, com 80% de solo, 10% de lodo e 10% de cinza, apresentou a maior resistência das amostras analisadas, com ângulo de atrito de 45,95°. A amostra não possui valor de intercepto coesivo, assim como a amostra de solo-lodo-cinza com 15% de cinza, ou seja, as amostras não apresentaram resistência antes da aplicação de tensões. Como o material resiste principalmente ao atrito entre as partículas, ele tende a apresentar maior resistência quando submetido a maiores tensões normais.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o uso de lodo de ETA e cinza volante incorporados em solo é uma alternativa tecnicamente viável para utilização em barreiras minerais, pois além da contribuição mecânica e geotécnica, há também a contribuição para uma destinação mais adequada desses resíduos, reduzindo seu volume em aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

A equipe agradece à Fundação Araucária pela bolsa de estudos e incentivo à realização de pesquisas científicas, à SANEPAR pela disponibilização do lodo de ETA, à Cargill pela disponibilização da cinza volante, bem como a Universidade Estadual de Ponta Grossa, por abrir portas e oferecer oportunidades aos estudantes. Os autores agradecem também à equipe de Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da UEPG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solo -Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Almeida, M. M. (2024) *Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em solo reforçado com geossintéticos: influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, 103 p.

Bloinski, M. H. Q.; Tonus, B. P. A.; Lautenschlager, C. E. R.; Olavo, L. H. F.; Faro, V. P. (2020) Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. In: COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. ABMS. v. 1, p. 01-08.

Bobato, G. T.; Borges, M. (2023). *Avaliação da viabilidade técnica da utilização de cinza de caldeira em misturas de solo-cimento para aplicações em construção civil.* Ponta Grossa, PR, Paraná.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 093: *Solos - Determinação do peso específico real dos grãos*. Rio de Janeiro.

Florençano, J. C. (2011) *Saneamento básico: sistemas de tratamento e distribuição de água.* São Paulo, SP, 118 p.

Ruviaro, A. S.; Silvestro, L.; Scolaro, T. P.; Pelisser, F.; Gleize, P. J. P. (2020). *Incorporação do lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar.* Porto Alegre, RS, Rio Grande do Sul.

Vasconcelos, C. B; Leal, C. L. D.; França, M. P.; Castro, P. F. (2004). *Aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil*. Campos dos Goytacazes, RJ, Rio de Janeiro.

FIEDLER, D. T. (2023) *Análise da incorporação do lodo de uma estação de tratamento de água (ETA em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa/ UEPG, 89 p.

OWNTEC Soluções em Engenharia Ltda. MS 102 – CISALHAMENTO AUTOMÁTICO (2024). *Manual de instruções.* Santa Cruz do Sul: Owntec.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/96

Gestão de resíduos na Geotecnia: análise da condutividade hidráulica de solos reforçados com agregado lenhoso residual

Diogo Reis Passos Sana Morais
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, diogosanna@gmail.com

Isabella Isis Lima dos Santos
Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, isabellaisisil98@gmail.com

Sofia Araújo Lima Bessa
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, sofiabessa@ufmg.br

Fernando do Couto Rosa Almeida
Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, fernando@demc.ufmg.br

Giovanna Monique Alelvan
Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

RESUMO: A indústria moveleira e a supressão vegetal para infraestrutura de transportes ocasionam a geração de grandes quantidades de material lenhoso residual que, caso não tenham sua destinação bem planejada, podem derivar problemas ambientais e de saúde pública. Em outra esfera, considera-se que é fundamental que o solo possua as características necessárias a depender do projeto que nele será executado para garantia de sua adequação e, em alguns casos, ele pode ser estabilizado para garantir as propriedades mínimas. Por conseguinte, enxerga-se a oportunidade de aliar ambos materiais a fim de se mitigar tais problemáticas por meio de soluções regionalizadas que atendam aos critérios de engenharia, como em estruturas de contenção temporárias, barreiras acústicas e na estrutura de pavimentação. À luz desses princípios, este trabalho tem como objetivo analisar os compósitos formados pela mistura de diferentes agregados lenhosos residuais (ALR) derivados de marcenarias e carpintarias, como pó de MDF (*Medium Density Fiberboard*) e aparas de serragem, com amostras de solo, pela condução de ensaios de caracterização e avaliação de suas propriedades geotécnicas hidráulicas. Resultados sustentam a hipótese de viabilidade nessa proposição da gestão de ambas problemáticas, solucionando-as de maneira inteligente.

PALAVRAS-CHAVE: Solos. Agregado Lenhoso Residual. Estabilização. Permeabilidade. Gestão de Resíduos. Geotecnia Ambiental.

ABSTRACT: The furniture industry and vegetation clearing for transport infrastructure generate large quantities of residual woody material which, if not properly managed, may lead to environmental and public health issues. In another context, it is essential that soils meet the requirements of the projects in which they are applied to ensure their suitability. When these materials do not exhibit the minimum required properties, soil stabilization may be performed to guarantee adequate performance. This creates an opportunity to combine both materials in order to mitigate these issues through regionally adapted engineering solutions, such as temporary retaining structures, acoustic barriers, and pavement structures. In light of these principles, this study aims to analyze composites formed by mixing different residual woody aggregates (RWA), derived from joinery and carpentry waste—such as Medium Density Fiberboard (MDF) powder and sawdust—with soil samples, through characterization tests and the evaluation of their hydraulic geotechnical properties. The results support the hypothesis that this approach is viable for addressing both issues simultaneously, providing an efficient and sustainable solution.

KEYWORDS: Soil. Residual Woody Aggregate. Stabilization. Permeability. Waste Management. Environmental Geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

O solo, por ser base da maior parte das intervenções da engenharia, demanda características mínimas para resistir e distribuir esforços, permanecer estável e preservar a integridade das estruturas que suporta. Em cenários nos quais essas especificidades não são atendidas, intervenções em sua composição tornam-se alternativas para garantir a viabilidade do projeto.

Dentre as formas de melhorar as propriedades do solo, destacam-se a estabilização granulométrica, o uso de geossintéticos e a incorporação de aditivos que conferem características desejáveis ao sistema, seja por reações químicas ou por peculiaridades do próprio material. Essa última abordagem tem sido amplamente pesquisada e representa uma alternativa sustentável para suprir a carência de materiais convencionais (ANBURUVEL, 2024). Contudo, alguns aditivos tradicionais apresentam limitações: o cimento, por exemplo, gera impactos ambientais relevantes em sua fabricação; enquanto outros perdem viabilidade pelos custos elevados de produção, abrindo espaço para soluções ambientalmente corretas e financeiramente acessíveis.

Em outra esfera, a geração de resíduos das diversas atividades humanas desperta preocupação quanto à sua destinação, instigando a busca por alternativas menos poluentes e tecnicamente adequadas. Corrêa e Policarpo (2019) apontam que grande parte das indústrias moveleiras ainda destinam seus resíduos a aterros sanitários, queima a céu aberto ou forração de granjas, alertando para os riscos associados à disposição inadequada, especialmente em proximidade a indústrias e centros urbanos. Johansson (2016) reforça essa problemática ao destacar os altos custos de destinação enfrentados por pequenos empresários, fator que contribui para o descarte incorreto, além dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente decorrentes da queima do MDF (*Medium Density Fiberboard*) e da contaminação de águas subterrâneas dada disposição incorreta.

Cerca de 10% a 13% do volume de toras de madeira são transformados em serragem (KHAN, 2016), demonstrando a oportunidade (e necessidade) de reinserir esse resíduo na cadeia produtiva. Medina-Martinez et al. (2023) classificam os resíduos derivados da madeira em aparas de serragem, pó de serragem e cinzas de serragem, e apontam diversos ganhos com sua incorporação para estabilização de solos, entre eles o aumento da permeabilidade de solos finos com pó de serragem. Os autores ressaltam ainda que a espécie de madeira, vinculada à oferta regional, pode influenciar os resultados e o teor ótimo do resíduo, e enfatizam a escassez de estudos sobre o tema na América Latina.

Aliando as questões supracitadas, enxerga-se a oportunidade de aplicar esses resíduos em associação para majorar os ganhos técnicos e reduzir seus impactos ambientais. Assim, este trabalho analisa os possíveis benefícios da implementação de Agregado Lenhoso Residual (ALR) em misturas com solo tropical, por meio de ensaios em compósitos formados por amostras de solo e aparas de serragem e pó de MDF, visando propriedades geotécnicas favoráveis aliadas a uma gestão mais sustentável do resíduo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa, de caráter exploratório, consistiu na análise laboratorial do comportamento hidráulico de compósitos formados por amostra de solo areno-siltosa com distintas amostras de ALR. Para tal, realizou-se ensaios de caracterização e, em seguida, ensaios de permeabilidade à carga variável com os materiais.

2.1 Materiais

2.1.1 Amostras de Agregado Lenhoso Residual (ALR)

As amostras de ALR foram cedidas por três empresas distintas localizadas no município de Belo Horizonte. A amostra A, apresentadas na Figura 1a, compreende pó de MDF gerado por uma indústria moveleira com uso majoritário de maquinários de corte mais sofisticados, sua massa é fina e homogênea. A amostra B, na Figura 1b, representa serragem produzida por uma marcenaria de médio porte, que trabalha com madeiras do tipo Angelim, Pinus e Cumaru, e consiste em um material heterogêneo, tanto do ponto de vista

das espécies (como dito), quanto granulometricamente (dado diferentes tamanhos de partículas, desde mais finas e pulverulentas a lascas de maiores dimensões e pedaços maciços). Por fim, na Figura 1c tem-se a amostra C, que tem origem uma carpintaria artesanal, na qual se utiliza como matéria prima MDF e Pinus, e gera material mais fino e homogêneo com eventual presença de pequenas lascas (não representativas) e grandes pedaços de madeira (que não serão abordados nesse trabalho).



(a) (b) (c)

Figura 1. Amostras de ALR – Análise Visual.

Na Tabela 1 apresenta-se os valores de massa específica das partículas para as amostras de ALR realizado de acordo com a NBR 17212 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024), com redução de massa ensaiada para viabilidade do ensaio. Para a amostra B, procedeu-se com a utilização de proveta graduada em substituição do picnômetro para acondicionamento das partículas maiores.

Tabela 1. Amostras de ALR – Massa Específica das Partículas.

Amostra	Massa Específica dos Sólidos – ρs (g/cm³)
A (Pó de MDF)	1,15
B (Aparas de Serragem)	1,45
C (Pó de MDF + Espécies)	1,33

Na Figura 2 e 3 podem ser visualizadas as curvas granulumétricas das amostras de ALR via peneiramento, seguindo procedimento símile ao disposto na NBR 7181 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024) com redução de quantidade de amostra para viabilidade do ensaio de peneiramento; e granulometria à laser, respectivamente.

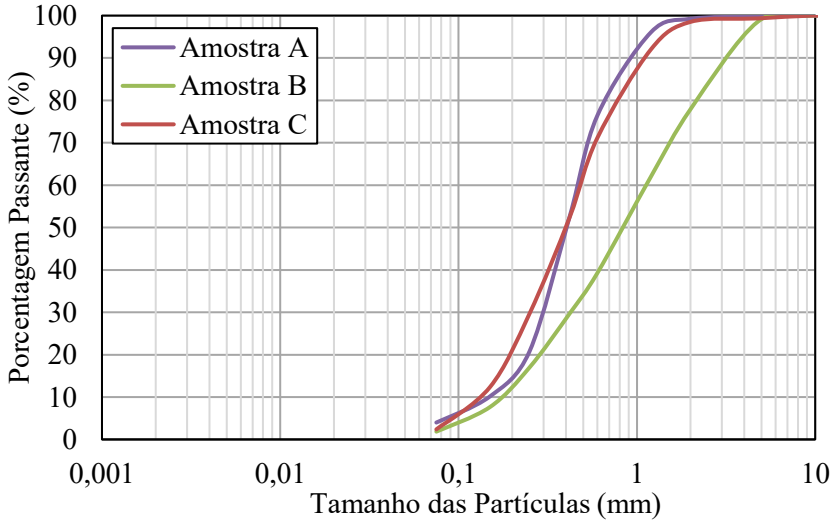


Figura 2. Amostras de ALR – Análise Granulométrica - Peneiramento.

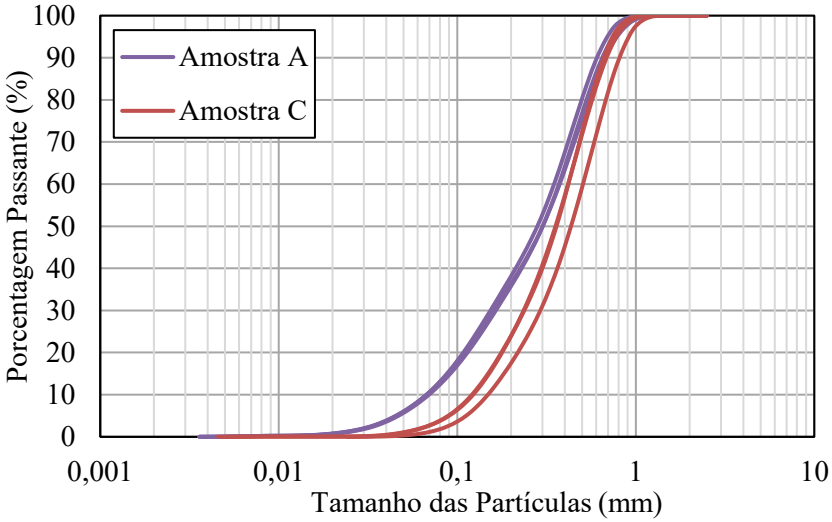


Figura 3. Amostras de ALR – Análise Granulometria à Laser.

2.1.2 Amostras de Solo

As amostras de solo foram coletadas em propriedade rural localizada no município de Santo Antônio do Rio Abaixo (MG). Por meio da simples escavação com utilização de pás, enxadas e carrinhos de mão, removeu-se a camada de 30 cm superficial, compreendendo um primeiro horizonte majoritariamente orgânico, e coletou-se o material em profundidade superior a esse estrato. Na Figura 4 se apresenta fotografia de uma dessas amostras.



Figura 4. Amostra de solo – Análise Visual.

À partir do ensaio de massa específica dos grãos, seguindo o prescrito na norma NBR 17212 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024), alcançou-se o valor de 2,52 g/cm³. Na Tabela 2 e na Figura 5 pode-se observar a composição e a curva granulométrica das amostras de solo seguindo o disposto na NBR 7181 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024).

Tabela 2. Amostras de Solo – Composições Granulométricas.

Fração	Intervalo (ABNT NBR 6502/2022)	Quantidade de Solo (%)
Argila	< 0,002mm	12,1
Silte	0,002mm - 0,06mm	30,1
Areia Fina	0,06mm - 0,20mm	27,2
Areia Média	0,20mm - 0,60mm	24,5
Areia Grossa	0,60mm - 2,00mm	3,4
Pedregulho	2mm - 60mm	2,7
Classificação		Areno Siltoso

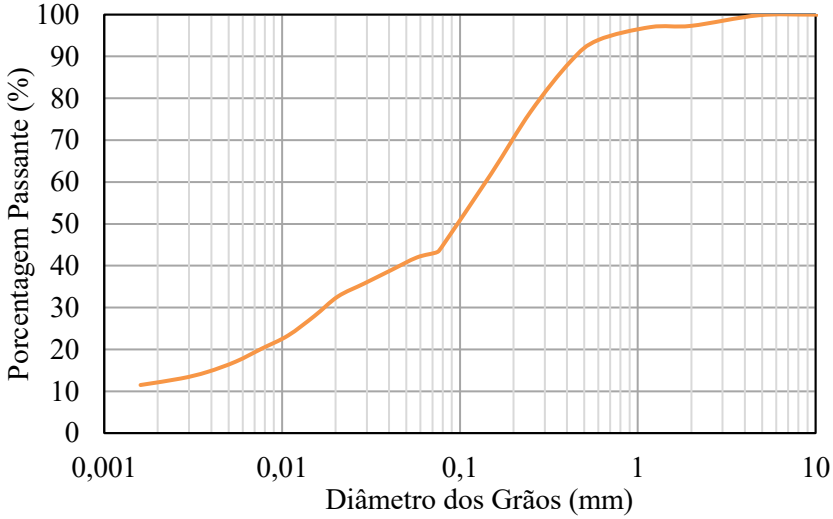


Figura 5. Amostra de solo – Análise Granulométrica.

Visualmente, nota-se uma curva granulométrica bem graduada, com frações equilibradas e bem distribuídas na amostra, observável pela inclinação suave. Pela parcela significativa de finos (42,2%), o parâmetro Cu (Coeficiente de Uniformidade) não se torna um bom balizador para avaliar a distribuição granulométrica do solo, pois o valor de D_{10} (diâmetro no qual 10% do material é passante) se localiza na parcela fina, elevando significativamente o valor do coeficiente, que é mais adequado para se classificar, portanto, parcelas mais grossas. Pelo mesmo motivo, o parâmetro Cc (Coeficiente de Curvatura) também não foi calculado.

A Figura 6 apresenta a Carta de Plasticidade de Casagrande com o ponto referente aos resultados dos ensaios de Limites de Attemberg para a amostra de solo.

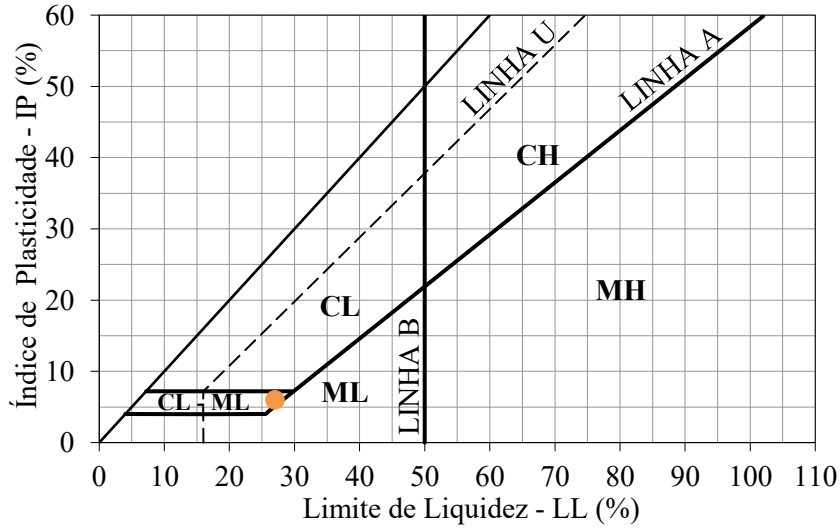


Figura 6. Classificação do solo - Carta de Plasticidade de Casagrande.

Observa-se que o ponto se localiza no intervalo CL-ML, compreendendo uma zona de transição entre solos com características intermédias entre argila e silte de baixa plasticidade, demonstrando que por mais que pela análise granulométrica o solo se configure como arenoso, dada parcela preponderante de areia fina e média, a presença de silte e argila em fração significativa resulta na dominância do comportamento do material nesse caso, em critérios de plasticidade e compressibilidade. Não obstante, tal característica pode afetar a maneira como o solo se comporta hidraulicamente, indicando valores para o coeficiente de permeabilidade que se assemelhem à solos mais finos.

2.2 Métodos

O teor de 5% de ALR foi adotado para produção dos compósitos por ser um valor intermediário em acordo com a revisão de literatura – Medina-Martinez et al. (2023) e Niyomukiza; Wardani; Setiadji (2021). Assim, para análise do comportamento do material, foram realizados ensaios de compactação e permeabilidade.

2.2.1 Ensaio de Compactação

Para realização do Ensaio de Compactação, tomou-se o previsto pelas normas NBR 7182 (ABNT, 2025) e NBR 6457 (ABNT, 2024), utilizando-se 3 kg de amostra seca em estufa, solo destorroado, homogeneizado e passante pela peneira de 4,8 mm, o cilindro pequeno, reuso de material e energia de compactação normal, realizando três camadas com 26 golpes cada para moldagem do corpo de prova.

2.2.2 Ensaio de Permeabilidade

Para obtenção dos coeficientes de permeabilidade dos compósitos, procedeu-se com o Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável, conforme estabelecido pela norma NBR 14545 (ABNT, 2021). Para tal, moldou-se o corpo de prova no cilindro de compactação pequeno à energia normal, no teor de umidade ótimo obtido via ensaio de compactação.

3 RESULTADOS

Na Figura 7 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação dos compósitos solo-ALR.

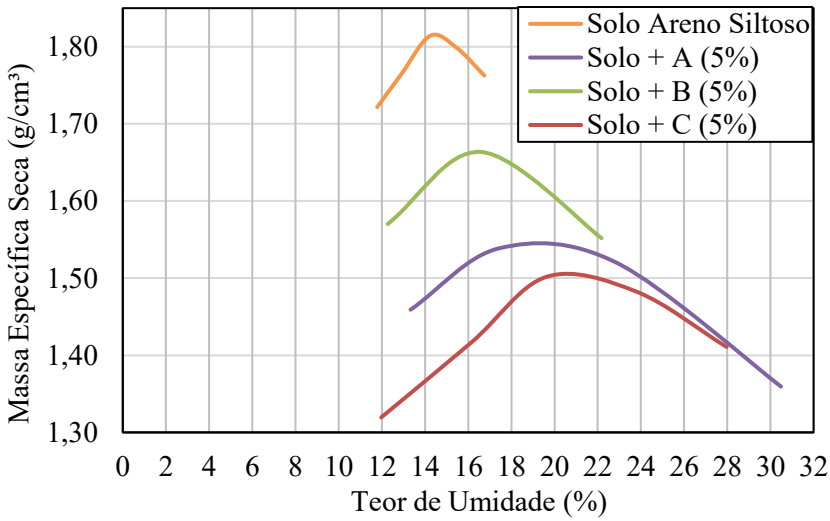


Figura 7. Compósitos Solo-ALR – Curvas de Compactação.

Por meio do ensaio de compactação, observou-se o deslocamento das curvas para a direita e para baixo com a adição de ALR (Figura 7), indicando a redução do peso específico seco máximo e o aumento do teor de umidade ótimo. A redução do peso específico seco máximo pode ser atribuída à menor massa específica das partículas do ALR em relação aos grãos do solo, resultando em menores valores para o compósito. Por sua vez, o aumento do teor de umidade ótimo pode estar relacionado à elevada capacidade de absorção de água das fibras de madeira, à maior demanda de água necessária para sua lubrificação em razão da maior superfície específica ou, ainda, a alterações na estrutura de vazios da mistura.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do ensaio de permeabilidade realizados, onde nota-se comportamentos distintos dos compósitos em relação às amostras sem nenhuma adição. Conforme dito no tópico 1, a variabilidade de espécies de madeira presente nas amostras de ALR podem conferir diferentes manifestações para o material, como por exemplo, diante uma análise de condutividade hidráulica. Baseando nos resultados, observou-se leves variações para o coeficiente de permeabilidade, mas que podem indicar uma

tendência e ensaios adicionais com diferentes teores e distintas amostras de agregado lenhoso residual viabilizariam uma avaliação mais certeira diante desse cenário.

Tabela 3. Compósitos Solo-ALR – Ensaio de Permeabilidade.

Compósito	Coeficiente de Permeabilidade – k_{20} (cm/s)
Solo sem adição de ALR	$9{,}0x10^{-6}$
Solo + A (5%)	$1{,}4x10^{-5}$
Solo + B (5%)	$1{,}4x10^{-5}$
Solo + C (5%)	$1{,}0x10^{-5}$

Apesar disso, considerando-se realmente tratar-se de uma tendência, enxerga-se que a incorporação de ALR no solo analisado induziu uma discreta elevação da permeabilidade, o que pode ser consequência do aumento de vazios por conta da granulometria (principalmente abordando a amostra B, que possui partículas maiores); por propiciar a conexão entre vazios, viabilizando o fluxo de água entre eles; e pelo formato lamelar das partículas, podendo ocasionar uma região de fluxo preferencial caso estejam em posição favorável.

Em caráter exploratório, observou-se que pode existir interferência na condutividade hidráulica dada adição desse tipo de resíduos em amostras de solo, cabe verificar se para teores maiores e/ou menores a alteração do comportamento hidráulico se torne mais representativa.

4 CONCLUSÕES

Após as análises realizadas, foi possível concluir que a adição de 5% de ALR em amostras de solo areno-siltoso alterou as curvas de compactação, o que pode ser positivo a depender das aplicações desejadas. Com relação à comportamento hidráulico, os resultados indicaram uma discreta elevação do coeficiente de permeabilidade (k) nos compósitos em relação ao solo natural, com variação da ordem de 10^{-6} cm/s para 10^{-5} cm/s, sendo esse comportamento consistente entre os três tipos de ALR avaliados.

Num primeiro momento, baseando-se no referencial teórico e no levantamento de hipóteses, esperava-se que a incorporação do resíduo em matrizes de solo ocasionasse um aumento mais expressivo no coeficiente de permeabilidade. Embora a variação observada não tenha sido suficiente para confirmar uma tendência estatística robusta, a consistência dos resultados entre os três tipos de ALR avaliados aponta para uma inclinação nesse sentido, o que está alinhado à hipótese central do trabalho e sustenta o potencial da técnica proposta. Essa limitação de magnitude pode ser consequência de uma possível interferência do tempo de saturação das fibras lenhosas, da variabilidade das espécies disponíveis localmente e da necessidade de investigação do teor ótimo do aditivo, demandando análises adicionais para isolamento desses fatores e consolidação da tendência identificada.

No que diz respeito à compatibilidade do comportamento hidráulico observado com as aplicações propostas, considera-se que a elevação de k representa um indicativo promissor, cujas implicações variam conforme o uso pretendido.

Para barreiras acústicas, a permeabilidade é um critério secundário, e a viabilidade do compósito se apoia sobretudo nas propriedades mecânicas e na destinação ambientalmente adequada do resíduo, não sendo o comportamento hidráulico um fator limitante nesse contexto. Para estruturas de contenção temporárias, o aumento da condutividade hidráulica pode favorecer o alívio de pressões intersticiais, contribuindo para a estabilidade da estrutura; contudo, esse efeito deve ser avaliado com cautela, reforçando a necessidade de estudos com teores variados de ALR.

Em estruturas de pavimentação, o raciocínio merece atenção especial. Em solos de baixa permeabilidade natural, como o areno-siltoso estudado, o aumento de k favorece a drenagem interna das camadas, reduzindo o tempo de saturação e mitigando a perda de capacidade de suporte associada à retenção prolongada de água. A aplicação se mostra promissora não apenas em sistemas de pavimento drenante, mas também em camadas de regularização e reforço do subleito, sendo potencialmente mais relevante em regiões de alta precipitação. Caso teores superiores de ALR elevem ainda mais a permeabilidade, esse efeito tenderia a ampliar as oportunidades descritas, desde que acompanhado de avaliação criteriosa das propriedades mecânicas dos compósitos.

Não obstante, a pesquisa abre a discussão para a aplicabilidade dessa técnica numa perspectiva regional, pautando estudos futuros que investiguem teores variados de ALR, o efeito do tempo de saturação das fibras, diferentes granulometrias do resíduo e uma gama mais ampla de tipos de solo, a fim de consolidar critérios de projeto para as aplicações vislumbradas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Federal de Minas Gerais, ao Laboratório de Geotecnia (LabGEO), ao Laboratório de Água na Mineração do Departamento de Engenharia de Minas e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica (LMEV) do Instituto de Geociências (IGC) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANBURUVEL, Arulanantham. The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review. Geotechnical and Geological Engineering, v. 42, n. 1, p. 1–42, 1 jan. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: Solos: Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17212: Solos: Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459: Solos: Determinação do limite de liquidez. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180: Solo: Determinação do limite de plasticidade. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Solos: Ensaio de compactação. 3ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14545: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6502: Solos e rochas: Terminologia. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

CORRÊA, Glaucinei Rodrigues; POLICARPO, Alessandro de Oliveira. Ligno: material compósito com resíduo de madeira. 2019.

JOHANSSON, Fernando. Alternativas de destinação de resíduos de MDF. bachelorThesis—[S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 8 nov. 2016.

KHAN, Haziq. Improvement of Mechanical Properties by Waste Sawdust Ash Addition into Soil. Jordan Journal of Civil Engineering, 1 jan. 2016.

MEDINA-MARTINEZ, Carlos J. et al. Use of Sawdust Fibers for Soil Reinforcement: A Review. Fibers, v. 11, n. 7, p. 58, jul. 2023

NIYOMUKIZA, J. B.; WARDANI, S. P. R.; SETIADJI, B. H. Recent advances in the stabilization of expansive soils using waste materials: A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 623, n. 1, p. 012099, jan. 2021.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/97

Improving Cities' Resilience through Nature-Based Solutions (NbS)

Carina Silvani
Adjunct Professor, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brazil, carina.silvani@professor.ufcg.edu.br

Zhenxing Zhang
Associate Research Scientist, University of Illinois Urbana-Champaign, Champaign, USA, zhang538@illinois.edu

Wuhuan Zhang
Scientific Specialist, University of Illinois Urbana-Champaign, Champaign, USA, wz54@illinois.edu

Sha Luo
Honorary Research Fellow, University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom, s.luo@bham.ac.uk

Rosa Sanchez-Lucas
Postdoctoral Fellow, University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom, r.sanchez-lucas@bham.ac.uk

RESUMO: A intensificação das mudanças climáticas tem aumentado a frequência e a severidade de eventos extremos, como a onda de calor de 2025 na Europa e as inundações no sul do Brasil, em 2024. As Soluções Baseadas na Natureza (NBS) oferecem um caminho promissor para aumentar a resiliência da infraestrutura urbana por meio do sequestro de carbono e da restauração de ecossistemas naturais e modificados. Para examinar os benefícios da aplicação de NBS no nexo solo–água–planta no desenvolvimento de cidades resilientes, este estudo baseia-se em uma revisão da literatura e na troca de conhecimentos entre pesquisadores das áreas de recursos hídricos, biologia e geotecnia da Europa, América do Sul e América do Norte. A síntese deste trabalho demonstra que as NBS fortalecem a resiliência urbana por meio da regulação do carbono e dos processos hidrológicos, da redução dos riscos de inundações e secas, da mitigação da poluição da água e do aumento da estabilidade das encostas. O nexo solo–água–planta representa as interações dinâmicas entre a saúde do solo, os processos hidrológicos e o desempenho da vegetação, fundamentais para a eficácia das NBS na mitigação dos impactos climáticos e na construção de uma infraestrutura urbana mais resiliente.

PALAVRAS-CHAVE: Nexo Solo–Água–Planta; Cidades Sustentáveis; Impactos das Mudanças Climáticas; Restauração Hídrica; Estabilidade de Encostas

ABSTRACT: The intensification of climate change has increased the frequency of extreme events, such as the heatwave that struck Europe in 2025 and the flooding in Rio Grande do Sul, Brazil, in 2024. Therefore, there is an increased need for resilient cities. Nature-based Solutions (NBS) can enhance the resilience of urban infrastructure through carbon sequestration and the restoration of natural and modified ecosystems. Aiming to explore the advantages of utilising NBS within the Soil-Water-Plant nexus for the development of resilient cities, this research was carried out based on a literature review and on the exchange of knowledge among researchers in water resources, biology, and geotechnics from three regions of the world (Europe, South America, and North America). The synthesis presented in this review shows that NBS enhance urban resilience by supporting climate action, particularly through carbon regulation, improved water regulation, reduced flood and drought risks, mitigation of water pollution, and increased slope stability via plant root systems that

strengthen soil cohesion. The soil-water-plant nexus reflects the dynamic interactions among soil health, hydrological processes, and vegetation performance, which are essential to the success of NBS in mitigating climate impacts and creating a more resilient urban infrastructure.

KEYWORDS: Soil-Water-Plants Nexus, Sustainable Cities, Climate-related changes, water restoring, slope stability

1 INTRODUCTION

The current trend of climate change increases the frequency of extreme hydrometeorological events, significantly affecting natural systems and human infrastructure (Igwe and Una, 2019). Events such as the heatwave that struck Europe in 2025 and the flooding in Rio Grande do Sul, Brazil, which left the city of Porto Alegre underwater for more than two weeks in May 2024 and caused severe infrastructure damage across southern Brazil, are becoming more intense and more frequent. Reflecting the urgency of these impacts, the Paris Agreement promotes the incorporation of urban resilience and adaptation strategies into countries' Nationally Determined Contributions (NDCs) (Dodson et al., 2022).

Conventional strategies for resilient cities often focus on lowering surface temperatures or enhancing urban aesthetics; however, Nature-based Solutions (NBS) deliver broader environmental benefits by fostering evapotranspiration, strengthening stormwater control, and sustaining urban biodiversity. Introduced by the International Union for Conservation of Nature (IUCN) at COP15 in 2009, NBS refer to interventions that conserve, sustainably manage, and rehabilitate natural or altered ecosystems in order to address societal challenges in an effective and adaptive manner, while at the same time enhancing human well-being and supporting biodiversity (Berg et al., 2024; Choi et al., 2023). By working in harmony with ecological processes, NBS represent a holistic and effective pathway for urban climate mitigation.

The increasing uptake of NBS in policy, research, and development reflects a shift toward more holistic strategies to enhance climate resilience and urban sustainability. However, for this momentum to be translated into meaningful outcomes, NBS must be supported by rigorous, systematic, and multidisciplinary research. Positioning NBS as an effective climate action aligned with the Sustainable Development Goals and the Paris Agreement depends on strong scientific evidence of their effectiveness, social equity outcomes, and long-term durability. Nature-based solutions (NBS) rely on the interactions among soil, water, and vegetation. Accordingly, this study aims to review the application of NBS from a soil–water–plant nexus perspective, highlighting their potential as a strategy to enhance urban resilience.

2 METHODOLOGY

This research is based on a literature review and exchange of knowledge among researchers in water resources, biology, and geotechnics from three regions of the world (Europe, South America, and North America) from the universities of the University of Illinois Urbana-Champaign (UIUC), University of Birmingham (UoB), and the Federal University of Campina Grande (UFCG). The literature was obtained from several well-established databases, including Scopus, Springer, Elsevier, and Taylor & Francis Group, to explore the advantages of utilising NbS within the Soil-Water-Plant nexus, with a focus on climate, water restoration, and slope stability resilience.

3. NATURE-BASED SOLUTION FOR CLIMATE-RESILIENT URBANS

3.1 Climate Resilience Benefits of NBS

Nature-based solutions contribute to climate change mitigation by conserving, sustainably managing, and restoring natural and altered ecosystems, thereby strengthening ecosystem resilience while delivering co-benefits for human well-being and biodiversity. Current estimates indicate that NBS could provide 30–40% of the necessary CO_2 mitigation by 2030 and that natural climate solutions have a probability greater than 66% of limiting global warming to below 2 °C (Cotrell 2022).

Ground vegetation cover plays a central role in regulating the carbon balance, with direct consequences for both regional and global carbon budgets (Mendes et al., 2025). Evidence from Oliveira et al. (2023) indicates that vegetated areas exhibit greater water availability and carbon sequestration potential, reinforcing the importance of sustainable strategies such as Nature-Based Solutions (NBS).

Although not all NBS exhibit the same capacity for carbon sequestration. Carbon stocks vary considerably across urban green infrastructure types, with tree groups and woodlands storing the most carbon, whereas grassed areas, green roofs, and street trees generally store substantially less. (Jones et al. 2022)

Nature-based solutions may also increase certain ecosystem negative services that must be accounted for in planning and design. For example, lakes and constructed wetlands can act as sources of methane emissions, potentially offsetting part of their climate benefits (Pereira et al. 2023). Camacho-Caballero et al. (2024) showed that the expansion of urban agriculture can unintentionally increase heat vulnerability and may fail to lower nighttime temperatures in sensitive urban areas such as Barcelona. Consequently, inadequately planned NBS may intensify, rather than mitigate, climate-related risks.

Therefore, climate-resilience NBS depend on how well they are tailored to their intended function and local environmental conditions (Pereira et al., 2024). Such context-specific design is essential to maintain stable carbon storage over the long term, even under changing climatic conditions. At the same time, embedding these regulating services within a wider ecosystem-services framework enables meaningful comparison and the identification of potential trade-offs (Keith et al., 2021)

3.2 NBS in the improvement of water restoration

In water management, NBS encompasses a range of measures, including the protection and enhancement of water resources and associated ecosystems; the mitigation of impacts from natural hazards such as floods and droughts, as well as from urbanisation and human-induced pollution; and the conservation or enhancement of biodiversity. Wetlands, for example, can be restored to reduce the risks of flooding and water scarcity; they can also mitigate climate change impacts through carbon sequestration, while simultaneously delivering benefits to ecosystems and society. Similarly, restoring a channelised river to a more natural state can increase biodiversity and strengthen ecosystem resilience, while reducing flow velocity and limiting the impacts of potential flooding. The revegetation of civil engineering structures along riverbanks can also be regarded as an NBS(Rey et al. 2026).

NBS enables the natural treatment of stormwater and supports aquifer and stream recharge. They can reduce the required capacity of collection and conveyance systems, as well as of associated wastewater treatment plants, thereby lowering costs (Lafforgue, 2016). A case study from Bozcaada (Türkiye), conducted by Şamiloğlu et al. (2025), showed that strategically located rainwater ponds, a type of NBS, enhance seasonal water availability, reduce reliance on external water sources, and provide year-round support for native species. Lafforgue (2016) says that the interaction among soil, vegetation, root systems, and associated mycorrhizae enables the retention and/or remediation of a wide range of pollutants (Lafforgue, 2016). In this way, Engelke et al.(2025) evaluated Constructed Floating Wetlands (CFWs) on two urban waterways in Seattle, Washington, USA, over four years. Monitoring data from the organic plant root substrate showed that the CFWs efficiently removed heavy metals and nutrients from water under both freshwater and brackish conditions, whereas results for carbon sequestration were mixed.

Additionally, according to Ramírez-Agudelo et al. (2020), natural elements in urban environments can help control surface runoff and mitigate the impacts of drought by enhancing infiltration capacity, providing temporary water storage, increasing evapotranspiration, and supporting urban biodiversity.Therefore, well-designed water NBS can enhance resilience to water scarcity and pollution, mitigate hydrological problems, and promote biodiversity and quality of life.

3.3 NBS in the improvement of slope stability

Landscapes have become increasingly vulnerable to extreme events, a condition further intensified by changes in land use and management practices, particularly in fragile environments such as agricultural and forested areas. The abandonment of these territories has led to the loss of traditional land management practices,

especially water and vegetation control systems (e.g., dry-stone walls, channels, drains, and drainage networks), which were essential for maintaining stability in these areas.(Tarolli et al., 2014)
Soil bioengineering that employs vegetation has proven to be an ecologically sound, environmentally sustainable, and cost-effective approach for mitigating shallow landslides. (Mickovski et al., 2005; Yan et al., 2010). Therefore, according to Leug et al. (2023), NBS have been recognised as sustainable and environmentally friendly approaches for enhancing slope performance through root reinforcement and changes in soil matric suction induced by plant transpiration.
Sonnenberg et al. (2010) were among the first to investigate how willow roots of different ages influence soil pore-water pressure and slope deformation under varying groundwater levels. Their results showed that vegetated slopes exhibited less progressive failure than bare slopes. Similarly, Askarinejad and Springman (2015) demonstrated that slopes reinforced by *Avena sativa* roots present higher infiltration capacity and greater resistance to deformation when compared with unvegetated slopes.
Prasetyaningtiyas et al. (2024), in a centrifuge study evaluating the effect of Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) on slope stability, observed that slope failure initiated at the crest, where root density was low. In contrast, near the slope toe, where a denser root network was present, little to no failure occurred. This behavior was likely due to the effective mobilisation of root–soil interfacial resistance and the tensile strength of the roots, which enhanced resistance to shear and sliding mechanisms. The same author also showed that, for a numerical model to realistically represent failure, the change in soil properties induced by the root should be considered.
Li et al. (2024) also studied the influence of vetiver root on soil properties using triaxial tests. They found that roots improve soil cohesion more effectively than the soil friction angle, resulting in a higher safety factor for grass-covered slopes than for bare slopes. Similar results were obtained by Rahim and Naveed (2026) using Festuca arundinacea (tall fescue), alone and with symbiosis with mycorrhizal fungi (MF)
Kang et al. (2026) showed, using direct shear tests and numerical simulations, that the roots of herbaceous vegetation reduce progressive failure by increasing soil strength and altering the shallow subsurface hydrological regime, thereby improving slope stability.Therefore, the integration of vegetation properties into the engineered design of green infrastructure, such as slopes, is essential for improving the stability and resilience of green infrastructure.

3.4 Soil-water plant nexus

The soil–water–plant nexus provides an integrated, interdisciplinary lens for designing and evaluating urban NBS (Negm et al., 2019). It can be interpreted through the combined perspectives of hydrology, hydropedology, ecohydrology, and hydrogeomechanics, because this nexus integrates soil hydromechanical behaviour, plant water-uptake strategies, evapotranspiration, and nutrient cycling into a tightly coupled system governed by reciprocal feedbacks.
Vegetation alters soil structure and moisture dynamics, while soil properties determine how effectively plants can access water and nutrients. Within this system, root development reshapes soil pore networks and aggregation, plant physiology regulates transpiration, and water is continuously redistributed through the soil profile. Together, these interacting processes promote nutrient retention, improve infiltration, improve soil strength, and preserve soil structure, thereby strengthening overall resilience. Therefore, this nexus has the potential to regulate urban microclimates, sequester carbon, support biodiversity, contribute to land restoration by limiting soil erosion and landslides, and promote social equity through improved access to urban green spaces and green infrastructure (Figure 1).

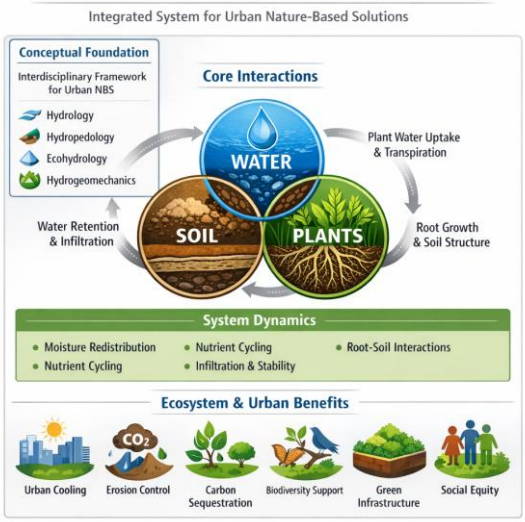


Figure 1- NBS in the optic of the Soil-Water-Plant nexus

Its functions are synergistic: healthy soils retain more water and provide a solid base for infrastructure; dynamic hydrologic processes, especially soil moisture, improve soil health and support vegetation; robust plant systems provide cooling through evapotranspiration and shade, stabilise soils, and promote infiltration. Additionally, plants propagate and expand their root systems, creating favourable conditions for biodiversity growth, and as the root systems develop, they also enhance soil resistance and cohesion over time, thereby increasing the resilience of human infrastructure (DiBiagio et al., 2024)

From a climate-resilience perspective, the soil–water–plant nexus acts as a key stabilising system against hydrological extremes. It supports drought resistance by maintaining soil moisture, reduces flood impacts by regulating runoff, and promotes ecosystem functioning through improved nutrient cycling.

Therefore, by capturing the interdependence of soil properties, water dynamics, and vegetation function, this framework underpins the effectiveness of NBS in reducing climate-related stresses. (Aboelata and Sodoudi, 2020; Morakinyo et al., 2020).

4. FINAL CONSIDERATIONS

Nature-Based Solutions (NBS) represent an innovative approach to urban resilience because they promote “design with nature” rather than “design against nature.” The synthesis presented in this review highlights several key findings. (i) Soil structure and root system dynamics play a decisive role in regulating ecosystem responses, particularly with respect to soil erosion and slope stability. (ii) Although NBS can support climate-resilience strategies through carbon sequestration and climate regulation, their effectiveness depends on being carefully planned and designed according to local environmental and socio-ecological conditions. (iii) The increasing occurrence of landslides under climate change can be mitigated through NBS, as plant root systems enhance soil cohesion and infiltration capacity. (iv) NBS can naturally reduce flood and drought risks, improve water quality, and enhance infiltration, thereby promoting aquifer and stream recharge. (v) More broadly, nature-based solutions demonstrate how soil–water–plant interactions can be harnessed for both climate mitigation and adaptation.

The soil–water–plant nexus, therefore, provides a fundamental basis for climate-resilient land and water management, as it governs water fluxes, nutrient cycling, and vegetation dynamics that underpin ecosystem services essential to both human well-being and ecological integrity.

Nevertheless, deploying NbS is complex due to the need for upfront capital, multidisciplinary expertise, and coordinated actions to enable integrated resource management.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to thanks the BRIDGE Project from University of Illinois Urbana-Champaign (UIUC) and University of Birmingham (UoB).

REFERENCES

Igwe, Ogbonnaya, Una, Chuku Okoro, 2019. Landslide impacts and management innanka area, Southeast Nigeria. *Geoenviron. Disasters* 6 (1). https://doi.org/10.1186/s40677-019-0122-z.

Dodson, J., Dérer, P., Cafaro, P., Götmark, F., 2022. Population growth, family planning and the Paris Agreement: an assessment of the nationally determined contributions (NDCs). Int *Environ Agreements* 22, 561–576. https://doi.org/10.1007/s10784-022-09573-8

Berg, M., Spray, C.J., Blom, A., Slinger, J.H., Stancanelli, L.M., Snoek, Y., Schielen, R.M.J., 2024. Assessing the IUCN global standard for nature-based solutions in riverine flood risk mitigation. *Environmental Development* 51, 101025. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101025

Choi, E., Kim, R., Chae, J., Yang, A.-R., Jang, E., Lee, K.Y., 2023. Analysis of Nature-Based Solutions Research Trends and Integrated Means of Implementation in Climate Change. *Atmosphere* 14, 1775. https://doi.org/10.3390/atmos14121775

C. Cottrell, Avoiding a new era in biopiracy: including indigenous and local knowledge in nature-based solutions to climate change, *Env. Sci. Policy.* 135 (2022) 162–168, https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.05.003.

de Oliveira, M.L.; dos Santos, C.A.C.; Santos, F.A.C.; de Oliveira, G.; Santos, C.A.G.; Bezerra, U.A.; de B. L. Cunha, J.E.; da Silva, R.M. Evaluation of Water and Carbon Estimation Models in the Caatinga Biome Based on Remote Sensing. *Forests* 2023, 14, 828. https://doi.org/10.3390/f14040828

Oliveira,S.; Cunha,J.Nóbrega, R. L.B.;Gash, J. H.; Valente,F. Enhancing global rainfall interception loss estimation through vegetation structure modeling, *Journal of Hydrology*, 631,2024,130672https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130672.

L. Jones, S. Anderson, J. Læssøe, E. Banzhaf, A. Jensen, D.N. Bird, J. Miller, M. G. Hutchins, J. Yang, J. Garrett, T. Taylor, B.W. Wheeler, R. Lovell, D. Fletcher, Y. Qu, M. Vieno, M. Zandersen, A typology for urban Green Infrastructure to guide multifunctional planning of nature-based solutions, *Nat.-Based Solut.* 2 (2022) 100041, https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100041

P. Pereira, C. Yin, T. Hua, Nature-based solutions, ecosystem services, disservices, and impacts on well-being in urban environments, Curr. Opin. Environ. Sci. *Health* 33 (2023) 100465, https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100465.

D. Camacho-Caballero, J. Langemeyer, R. Segura-Barrero, S. Ventura, A.M. Beltran, G. Villalba, Assessing nature-based solutions in the face of urban vulnerabilities: a multi-criteria decision approach, *Sustain. Cities Soc*. 103 (2024) 105257, https:// doi.org/10.1016/j.scs.2024.105257.

Paulo Pereira, Fang Wang, Miguel Inacio, Marius Kalinauskas, Katažyna Bogdzevič, Igor Bogunovic, Wenwu Zhao, Damia Barcelo, Nature-based solutions for carbon sequestration in urban environments,*Current Opinion in Environmental Science & Health*, 37, 2024,100536, https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100536.

Heather Keith, Michael Vardon, Carl Obst, Virginia Young, Richard A. Houghton, Brendan Mackey, Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting, *Science of The Total Environment,* 769 ,2021, 144341, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144341.

Khaing Su Lwin, Ridhi Saluja, Sushmita Mandal, Chayanis Krittasudthacheewa,Effectiveness of nature-based solutions to address water challenges in the Greater Mekong Subregion: a systematic mapping, *Nature-Based Solution*s,8, 2025, https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100283.

Tarolli, P.;, Preti, F.;, Romano, N. 2014. Terraced landscapes: from an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. *Anthropocene* 6, 10–25.

Mickovski, S., Van Beek, L., Salin, F., 2005. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (Vetiveria zizanioides). *Plant Soil* 278 (1), 33–41. https://doi.org/ 10.1007/s11104-005-2379-0

Yan, Z., Yan, C., Wang, H., 2010. Mechanical interaction between roots and soil mass in slope vegetation. *SCIENCE CHINA* Technol. Sci. 53, 3039–3044.

Leung, A.K., Liu, J., Jiang, Z., 2023. When nature meets technology: AI-informed discovery of soil-water-root physical interaction. In*: 8th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2023)*. EDP Sciences, 382, p. 21001. https://doi.org/ 10.1051/e3sconf/202338221001.

Sonnenberg, R., Bransby, M., Hallett, P., Bengough, A., Mickovski, S., Davies, M., 2010. Centrifuge modelling of soil slopes reinforced with vegetation. *Can. Geotech. J.* 47 (12), 1415–1430. https://doi.org/10.1139/T10-037

Askarinejad, A., Springman, S.M., 2015. Centrifuge modelling of the effects of vegetation on the response of a silty sand slope subjected to rainfall. In: *Proceedings of the 14th International Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanic*s, pp. 1339–1344. https://doi.org/10.1201/ b17435-236.

Gayuh Aji Prasetyaningtiyas, Viroon Kamchoom, Anthony Kwan Leung, Suched Likitlersuang, Hydromechanical behaviour of a slope reinforced by grass roots under rainfall conditions, *Ecological Engineering,*209,2024,https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107427.

Li, Z., Wang, M., Yu, S., Liu, J., 2024. Effects of the root's distribution on the stability of slope. Geotech. *Geol. Eng*. 42 (2), 1009–1019. https://doi.org/10.1007/s10706-023- 02601-7.

Xuan Kang, Shun Wang, Xuan Zou, Barbara Świtała, Wei Wu, Hydro-mechanical response of herbaceous root-reinforced soils and its implications for vegetated-slope stability, *Engineering Geology,*361,2026, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108501.

Negm, A.M., Omran, E.-S.E., Abu-hashim, M., 2019. Update, Conclusions, and Recommendations for Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: Soil–Water–Plant Nexus, in: Negm, A.M., Abu-hashim, M. (Eds.), Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: *Part II: Soil-Water-Plant Nexus. Springer International Publishin*g, Cham, pp. 397–415. https://doi.org/10.1007/698_2018_340

DiBiagio, A., Capobianco, V., Oen, A. et al. State-of-the-art: parametrization of hydrological and mechanical reinforcement effects of vegetation in slope stability models for shallow landslides. *Landslides* 21, 2417–2446 (2024). https://doi.org/10.1007/s10346-024-02300-1

Aboelata, A., Sodoudi, S., 2020. Evaluating the effect of trees on UHI mitigation and reduction of energy usage in different built up areas in Cairo. *Building and Environment* 168, 106490. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106490

Morakinyo, T.E., Ouyang, W., Lau, K.K.-L., Ren, C., Ng, E., 2020. Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of The Total Environment* 719, 137461. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/98

Influência da adição do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) na resistência de solos

Emily Anne Ferreira Ledo Lima
Discente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, emilyanne@discente.ufg.br

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Docente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, marciamascarenha@ufg.br

Carlos Alberto Lauro Vargas
Docente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, carloslauro@ufg.br

Daniella Ferreira de Castro
Mestranda, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, daniella.castro@discente.ufg.br

Laís Roberta Galdino de Oliveira
Docente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

RESUMO: A disposição final do lodo de estação de tratamento de água (LETA) representa um desafio ambiental relevante, uma vez que esse resíduo é gerado em grandes volumes e sua destinação inadequada pode causar impactos ao solo e aos recursos hídricos. Nesse contexto, o reaproveitamento do LETA em aplicações geotécnicas surge como alternativa sustentável, especialmente em misturas com solos utilizadas em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão comparativa da literatura, a influência da incorporação do LETA nas propriedades geotécnicas e no comportamento mecânico de misturas solo–lodo, com ênfase na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento. Foram avaliados estudos nacionais e internacionais que investigaram diferentes proporções de solo-lodo, principalmente em faixas de 20% a 40% em massa seca. Os resultados indicam que o LETA apresenta granulometria predominantemente fina, contribuindo para o aumento do teor de finos e alterações nos limites de consistência. Observou-se que, em teores moderados, o lodo pode aumentar a coesão aparente e melhorar o desempenho mecânico, enquanto teores excessivos tendem a reduzir a resistência. Conclui-se que o reaproveitamento do LETA apresenta potencial técnico e ambiental, desde que sejam definidos teores ótimos que proporcionem melhor desempenho estrutural sem comprometer características mecânicas relevantes.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA, Cisalhamento direto, Resistência ao cisalhamento, RCS, Materiais alternativos.

ABSTRACT: The final disposal of water treatment plant sludge (WTPS) represents a significant environmental challenge, as this residue is generated in large volumes and its improper disposal may cause impacts on soil and water resources. In this context, the reuse of WTPS in geotechnical applications emerges as a sustainable alternative, especially in mixtures with soils used in landfill cover systems. This study aims to analyze, through a comparative literature review, the influence of incorporating WTPS on the geotechnical properties and mechanical behavior of soil–sludge mixtures, with emphasis on unconfined compressive strength and shear strength. National and international studies investigating different soil–sludge proportions were evaluated, particularly within the range of 20% to 40% by dry mass. The results indicate that WTPS presents predominantly fine-grained particle size distribution, contributing to an increase in fines content and changes in consistency limits. It was observed that, at moderate contents, sludge may increase apparent cohesion and improve mechanical performance, whereas excessive contents tend to reduce strength. It is concluded that the reuse of WTPS shows technical and environmental potential, provided that optimal contents are defined to ensure improved structural performance without compromising relevant mechanical characteristics.

KEYWORDS: WTPS, Direct shear test, Unconfined Compressive Strength, Shear RCS, Alternative materials.

1 INTRODUÇÃO

A expansão dos sistemas de abastecimento de água e o crescimento populacional têm impulsionado o aumento da produção de água potável, resultando também na geração de grandes volumes de resíduos provenientes das estações de tratamento de água (ETAs). Entre esses resíduos, destaca-se o lodo de estação de tratamento de água (LETA), subproduto gerado principalmente nas etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Esse material apresenta elevada umidade e predominância de partículas finas, além de conter compostos associados aos coagulantes utilizados no tratamento, como hidróxidos de alumínio e ferro (Montalvan, 2016). A disposição final do LETA representa um desafio ambiental significativo, pois seu descarte inadequado pode provocar impactos ao solo e aos recursos hídricos, além de elevar custos operacionais devido à necessidade de transporte e destinação controlada (Caniani et al., 2013).

De acordo com Lima et al. (2026), a geração de LETA, entre 2021 e 2022, em uma única ETA de Goiânia, foi estimada em cerca de 4.500 toneladas. Esse volume, sem mistura com o solo, é suficiente para construir em torno de 1.000 m² de uma camada de cobertura de 60 cm de altura. Caniani et al. (2013) apontam que a reutilização do lodo em obras geotécnicas pode representar uma solução ambientalmente adequada, reduzindo o volume destinado a aterros sanitários e promovendo a economia de materiais naturais. No contexto específico de coberturas de aterros sanitários, a aplicação do LETA tem recebido atenção devido ao potencial de melhoria em propriedades hidráulicas e mecânicas quando misturado a solos naturais (Prim, 2011).

Entretanto, a incorporação do LETA pode alterar significativamente parâmetros geotécnicos essenciais, como massa específica seca máxima, umidade ótima, granulometria, limites de consistência, influenciando diretamente no desempenho mecânico das misturas. Prim (2011) observou que o aumento do teor de lodo tende a elevar a fração fina, resultando em mudanças nos limites de Atterberg e na capacidade de compactação do material. De forma semelhante, Mazzutti et al. (2023) verificaram que o comportamento hidromecânico de misturas solo–LETA varia conforme o teor de substituição e o tipo de solo, sendo comum a existência de proporções ótimas que proporcionem melhor desempenho estrutural sem comprometer características hidráulicas relevantes.

Além disso, em solos tropicais, especialmente lateríticos, o comportamento geotécnico pode ser distinto daquele observado em solos sedimentares, devido à presença de estrutura agregada e cimentação natural. Roque et al. (2022) avaliaram misturas de solo laterítico com lodo de ETA e constataram que, embora os parâmetros de resistência efetiva permaneçam próximos aos do solo natural em determinadas proporções, ocorreu tendência de redução da coesão e incremento do ângulo de atrito em misturas com maiores teores de lodo. Esses resultados reforçam a importância de considerar as particularidades estruturais dos solos tropicais ao analisar a viabilidade técnica do reaproveitamento do LETA.

Assim, torna-se essencial consolidar e comparar os resultados disponíveis na literatura, buscando identificar tendências e fatores que influenciam o desempenho mecânico de misturas solo–LETA. A análise comparativa de estudos permite compreender de maneira mais robusta os efeitos do teor de lodo sobre a resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento, contribuindo para avaliar a aplicabilidade dessas misturas em camadas de cobertura de aterros sanitários e outras obras geotécnicas. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão comparativa entre a literatura e análises realizadas com material próprio, sobre o comportamento geotécnico do LETA incorporado a solos naturais, com ênfase nos parâmetros de resistência e no potencial de reaproveitamento sustentável desse resíduo.

2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica comparativa com foco no comportamento geotécnico do lodo de estação de tratamento de água (LETA) aplicado em misturas com solos naturais para uso em obras geoambientais, especialmente em camadas de cobertura de aterros sanitários.

A busca por referências na literatura foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados científicas e repositórios acadêmicos, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, como *lodo de estação de tratamento de água (LETA)*, *soil–sludge mixtures*, *shear strength* e *unconfined compressive strength*. Foram priorizados estudos que investigaram a incorporação de lodo em solos e seus efeitos nos parâmetros geotécnicos, especialmente na resistência ao cisalhamento e na resistência à compressão simples. A seleção dos trabalhos considerou a relevância dos resultados, a metodologia empregada e a disponibilidade

de dados experimentais que permitissem a comparação com os resultados obtidos neste estudo, assim, foram adotados como principais referências os estudos de Caniani et al. (2013), Prim (2011), Roque et al. (2022), Mazzutti et al. (2023), Castro (2025) e Lima et al. (2026). Vale ressaltar que Castro (2025) e Lima et al. (2026) utilizaram os mesmos materiais.

Para complementar os dados fornecidos por Castro (2025) e Lima et al. (2026) foram realizados os seguintes ensaios de caracterização geotécnia do lodo: massa específica dos grãos (ABNT NBR 6458:2016), limites de consistência (ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016) e análise granulométrica (ABNT NBR 7181:2016), permitindo a identificação das principais características do material.

O LETA foi obtido diretamente da lagoa de secagem da Estação de Tratamento de Água Meia Ponte, situada no bairro Floresta, em Goiânia – GO, unidade com capacidade aproximada de tratamento de 2.000 L/s, responsável pelo abastecimento das regiões Norte, Noroeste, Oeste e Sudoeste do município (SANEAGO, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no levantamento bibliográfico e os ensaios de caracterização do LETA, apresentado na Tabela 1, nota-se que a incorporação do lodo, em geral, reduz a massa específica dos grãos, uma vez que o lodo de ETA apresenta composição predominantemente formada por hidróxidos metálicos e matéria fina floculada, frequentemente associada a valores de massa específica inferiores aos minerais do solo natural (Caniani et al., 2013; Prim, 2011).

Tabela 1. Parâmetros Físicos dos Materiais Avaliados.

Referência	Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Massa Esp. Dos Grãos (g/cm³)
Roque et al. (2021)	LETA	536	236	300	2,42
Roque et al. (2022)	Solo	24	18	7[1]	2,80
Roque et al. (2022)	Mistura 5:1	39	22	18[1]	2,72
Roque et al. (2022)	Mistura 4:1	44	25	19	2,70
Roque et al. (2022)	Mistura 3:1	52	29	23	2,68
Mazzutti (2023)	Solo	55	35	20	3,00
Mazzutti (2023)	15% LETA	56	35	21	2,94
Mazzutti (2023)	30% LETA	58	37	21	2,69
Mazzutti (2023)	50% LETA	58	37	21	2,59
Montalvan (2016)	Solo	25	14	11	2,69
Montalvan (2016)	LETA	239	81	158	2,90
Montalvan (2016)	Mistura 3:1	33	17	16	2,70
Montalvan (2016)	Mistura 4:1	32	17	15	2,70
Montalvan (2016)	Mistura 5:1	32	18	14	2,69
Lima et al. (2026)	Solo	43	28	15	2,59
Lima et al. (2026)	20% LETA	43	33	10	2,49
Lima et al. (2026)	40% LETA	47	40	7	2,32
Elaboração própria	LETA	60	NP	NP	2,06

Nota: LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade e NP: Não Plástico

[1]As pequenas divergências observadas entre os valores calculados e os IP) apresentados por Roque et al. (2022) podem estar relacionadas a arredondamentos adotados pelos autores nos resultados originais. Neste trabalho, os dados foram mantidos conforme publicados nas respectivas referências, visando preservar a consistência e a fidelidade às informações apresentadas nos estudos consultados.

Observa-se que a adição de LETA altera os limites de consistência do solo, porém sem apresentar uma tendência única para todos os casos. Roque et al. (2021; 2022) verificaram que o aumento do teor de lodo promoveu elevação significativa do LL, do LP e do IP, indicando incremento da plasticidade das misturas. Os elevados valores de plasticidade observados para o LETA puro podem ser atribuídos à sua composição

química, uma vez que lodos provenientes do tratamento de água com sulfato de alumínio apresentam maior plasticidade em comparação aos gerados com outros tipos de coagulantes. Esse comportamento está relacionado à presença de aluminatos de cálcio e sulfato de alumínio hidratados, compostos que aumentam a capacidade de retenção de água do material. Entretanto, quando o ensaio de limites de consistência foi realizado após secagem do LETA em estufa a 110 °C, o material apresentou comportamento não plástico. Em Mazzutti (2023), verificou-se apenas um aumento discreto de LL e LP, enquanto o IP permaneceu praticamente constante. Os resultados de Montalvan (2016) mostram que o LETA apresenta limites de consistência muito superiores aos do solo natural, com LL de 239% e IP de 158%, evidenciando seu caráter altamente plástico e elevada capacidade de retenção de água. Quando incorporado ao solo nas proporções analisadas (3:1, 4:1 e 5:1), observa-se aumento moderado dos limites de liquidez e do índice de plasticidade das misturas, indicando que o lodo influencia as propriedades de consistência do material. Já no estudo de Lima et al. (2026), a adição de LETA manteve ou elevou levemente o LL, aumentou expressivamente o LP e reduziu o IP. Dessa forma, conclui-se que o efeito do lodo sobre os limites de Atterberg depende das características do solo e do LETA, especialmente da granulometria e da composição da fração fina, que controlam a interação entre partículas e a plasticidade das misturas.

A análise da Tabela 2 indica que a incorporação de LETA tende a modificar significativamente a composição granulométrica do solo, principalmente pelo aumento da fração fina. Em geral, observa-se elevação dos teores de argila e/ou silte e redução proporcional da fração areia, uma vez que o lodo de ETA apresenta predominância de partículas finas decorrentes dos sólidos retidos no processo de tratamento.

Tabela 2. Composição Granulométrica.

Referência	Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Montalvan (2016)	Solo	24,4	5,10	70,40	0,10
Montalvan (2016)	LETA	69,30	25,20	5,50	0,00
Montalvan (2016)	Mistura 3:1	27,10	7,10	65,80	0,00
Montalvan (2016)	Mistura 4:1	27,50	4,50	68,00	0,00
Montalvan (2016)	Mistura 5:1	26,80	4,70	68,50	0,00
Mazzutti (2023)	Solo	17,00	53,00	27,00	3,00
Mazzutti (2023)	Solo + LETA (50%)	22,00	31,00	18,00	29,0
Lima et al. (2026)	Solo	53,00	3,10	36,10	7,80
Lima et al. (2026)	Solo + LETA (20%)	62,10	4,00	32,40	1,50
Lima et al. (2026)	Solo + LETA (40%)	42,00	17,00	25,00	16,00
Elaboração própria	LETA	44,46	2,01	35,74	17,79

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros de resistência ao cisalhamento,coesão efetiva (c’), ângulo de atrito efetivo (φ’) e de resistência à compressão simples (RCS) de misturas solo-LETA obtidos pelos diferentes autores, determinados por ensaios triaxiais, cisalhamento direto e compressão simples.

Tabela 3. Parâmetros de resistência.

Referência	Material	Ensaio	c' (kPa)	φ' (°)	RCS (kPa)
Roque et al. (2022)	Mistura 5:1	Triaxial	22,2	33,7	
Roque et al. (2022)	Mistura 4:1	Triaxial	6,2	38	
Montalvan (2016)	Lodo	Triaxial	10	37	
Knierim (2023)	LETA 15%	Cisalhamento direto	22,5	25,3	
Knierim (2023)	LETA 50%	Cisalhamento direto	16,9	41,9	
Mazzutti (2023)	LETA 15%	RCS (7 dias de cura)	-	-	343
Mazzutti (2023)	LETA 30%	RCS (7 dias de cura)	-	-	399
Mazzutti (2023)	LETA 50%	RCS (7 dias de cura)	-	-	364
Castro (2025)	Solo	RCS (0 dias de cura)	-	-	150
Castro (2025)	LETA 20%	RCS (0 dias de cura)	-	-	220
Castro (2025)	LETA 40%	RCS (0 dias de cura)	-	-	390

Observa-se que a adição de LETA influencia diretamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a resistência à compressão simples das misturas, porém esse efeito não ocorre de forma linear, variando conforme o teor incorporado, o tipo de solo e o método de ensaio adotado (Figura 1).

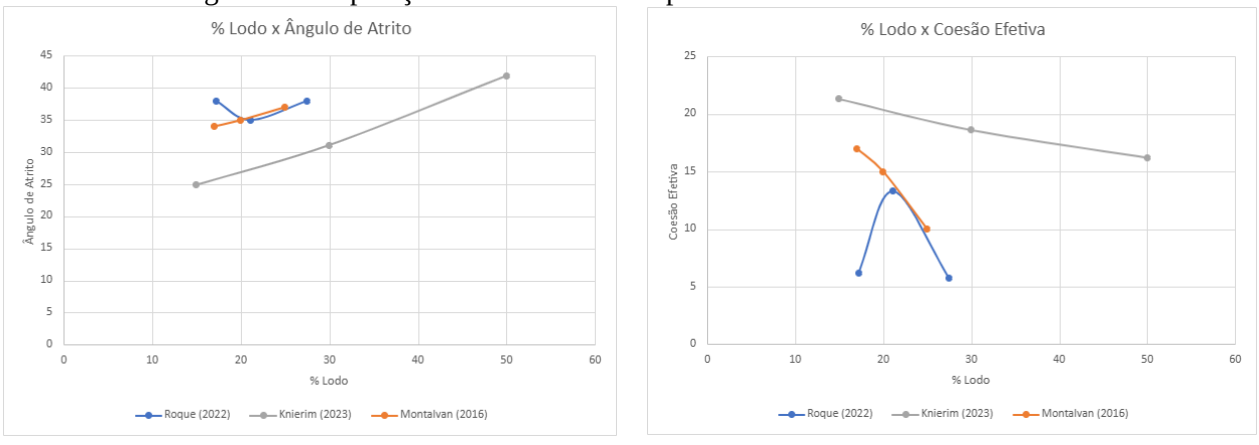
A variabilidade nas características do LETA é intrínseca à sua origem, sendo fortemente influenciada tanto pela qualidade da água bruta quanto pela tecnologia de tratamento empregada. A composição do lodo reflete diretamente a natureza do manancial captado: águas provenientes de rios tendem a gerar resíduos com maiores teores de sólidos inorgânicos, como areia, silte e argila provenientes da erosão, enquanto fontes de reservatórios ou lagoas resultam em lodos com concentrações elevadas de matéria orgânica, algas e microrganismos (Montalvan, 2016). Somado a esse fator, o tipo de coagulante utilizado no processo de potabilização, como sulfato de alumínio, cloreto férrico ou polímeros, altera a fase mineralógica e a densidade dos grãos do resíduo (Boscov, 2021). Por exemplo, o uso de cloreto férrico pode elevar significativamente a massa específica dos grãos devido à presença de ferro, enquanto o excesso de matéria orgânica tende a reduzi-la (Montalvan, 2016). Além disso, a variabilidade sazonal (períodos chuvosos ou de seca) modifica a turbidez da água bruta, impactando o percentual de finos e a plasticidade do lodo ao longo do tempo (Montalvan, 2016). Essa heterogeneidade nas propriedades físico-químicas do LETA justifica as variações observadas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, uma vez que a granulometria e os limites de consistência do resíduo definem como a mistura solo-lodo irá se comportar em termos de coesão e ângulo de atrito efetivo.

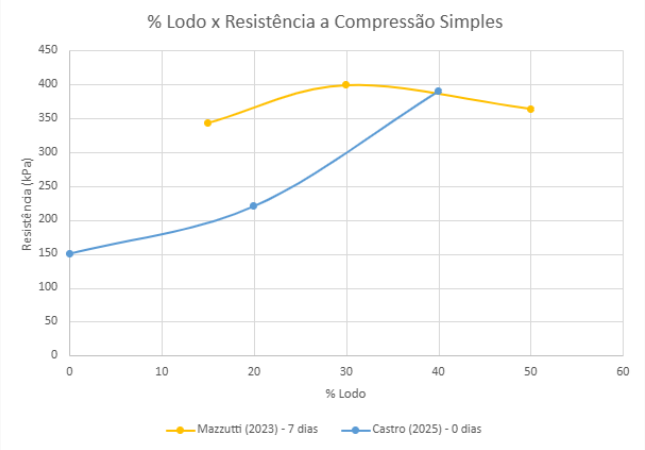
De modo geral, observa-se que o lodo pode atuar tanto como material de preenchimento fino, aumentando a interação entre partículas e contribuindo para o ganho de resistência, quanto como um elemento de elevada plasticidade e sensibilidade à umidade, capaz de reduzir a estabilidade mecânica quando presente em maiores proporções.

Por outro lado, a incorporação de LETA tende a modificar a relação entre coesão e atrito interno, podendo reduzir a coesão efetiva em alguns casos, ao mesmo tempo em que promove aumento do ângulo de atrito. Esse comportamento sugere que o lodo altera a estrutura do solo, favorecendo um mecanismo de resistência mais associado ao atrito e rearranjo das partículas do que à coesão propriamente dita (Figura 1). Assim, dependendo da proporção adicionada e das características do solo base, pode ocorrer uma diminuição da resistência global, especialmente quando a redução da coesão não é compensada pelo incremento do atrito.

Observa-se que os resultados de Knierim (2023) apresentam tendência distinta daquela observada por Roque et al. (2022) quanto à magnitude do aumento do ângulo de atrito efetivo. Embora ambos os estudos indiquem incremento de φ' com a adição de LETA, Knierim (2023) registrou valores mais elevados, atingindo 41,9° para a mistura com 50% de lodo, enquanto Roque et al. (2022) observaram aumento mais moderado, de 33,7° para 38°. Essa diferença pode estar associada às características específicas dos materiais empregados, especialmente à mineralogia e à granulometria do solo e do lodo utilizados, bem como ao método de ensaio adotado. Enquanto Roque et al. (2022) determinaram os parâmetros de resistência por meio de ensaios triaxiais, Knierim (2023) utilizou ensaios de cisalhamento direto, metodologia que pode resultar em parâmetros distintos devido às diferenças na trajetória de tensões e no mecanismo de ruptura. Além disso, a redução da coesão observada com o aumento do teor de lodo sugere uma alteração da estrutura do solo, promovendo um comportamento progressivamente mais dependente do atrito entre partículas, fenômeno que pode ter ocorrido de forma mais acentuada nas misturas avaliadas por Knierim (2023).

Figura 1. Comparação da % lodo com os parâmetros mecânicos das misturas





Em relação à resistência à compressão simples, os resultados indicam que o efeito da incorporação de lodo varia conforme o teor adicionado e as condições de ensaio. Nos dados apresentados por Castro (2025), para amostras sem período de cura (0 dias), observa-se aumento progressivo da RCS à medida que se eleva a proporção de lodo na mistura. Por outro lado, nos resultados apresentados por Mazzutti (2023), para amostras com 7 dias de cura, verifica-se a existência de um teor ótimo de incorporação, no qual a resistência atinge seu valor máximo na proporção de 30% de lodo, passando a apresentar redução para teores superiores. Esse comportamento indica que, embora a adição moderada de LETA possa favorecer o arranjo estrutural da mistura, teores mais elevados tendem a aumentar a quantidade de frações finas e a plasticidade do material, o que pode resultar em maior deformabilidade e, consequentemente, na redução da resistência mecânica.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados de caracterização geotécnica e comportamento mecânico das misturas de solo e lodo de estação de tratamento de água (LETA), conclui-se que o LETA apresenta elevado potencial de reaproveitamento em aplicações geotécnicas, especialmente em camadas de cobertura de aterros sanitários, desde que utilizado em proporções adequadas (entre 20% e 40%) e com controle tecnológico.

De forma geral, conclui-se que a incorporação de LETA exerce influência significativa no comportamento mecânico das misturas solo-lodo, afetando tanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento quanto a resistência à compressão simples. Contudo, esse efeito depende de diversos fatores, como o teor de lodo adicionado, as características do solo base e as propriedades físico-químicas do resíduo. Assim, o LETA pode atuar tanto como material de preenchimento, favorecendo o rearranjo das partículas e contribuindo para o ganho de resistência, quanto como um componente mais plástico e sensível à umidade, capaz de reduzir a estabilidade mecânica em teores mais elevados. Dessa forma, a variabilidade observada nos resultados evidencia a importância de avaliar caso a caso a viabilidade geotécnica do uso do lodo, considerando suas características específicas e a proporção incorporada às misturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG/GO) pelo apoio recebido por meio do projeto de pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica da primeira autora e da bolsa de produtividade em pesquisa da coautora M.M.A. Mascarenha (Processo: 304529/2025-7), ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG) pela infraestrutura e apoio técnico disponibilizados para a realização desta pesquisa, à SANEAGO pelo fornecimento do lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água Meia Ponte, e ao aterro sanitário Resíduo Zero Ambiental, localizado no município de Guapó – GO, pelo apoio e disponibilização do solo utilizado no estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458:2016a. Grãos de solos retidos na peneira de 4,8 mm — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: 2016b. Solo — *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7180: 2016c. Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7181: 2016d. Solo — Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BOSCOV, Maria E. G.; TSUGAWA, Juliana K.; MONTALVAN, Edy L. T. Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. *Sustainability*, Basel, v. 13, n. 17, p. 9848, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su13179848

Caniani, D.; Masi, S.; Mancini, I. M.; Trulli, E. (2013). Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. Waste Management, v. 33, n. 6, p. 1461–1468. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.007

Castro, D. F. (2025) *Avaliação geotécnica do uso de misturas de solo com resíduo de construção e lodo de estação de tratamento de água em camadas de cobertura de aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Knierim, L. S.; Delongui, L.; Pinheiro, R. J. B. (2023) Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico. *Revista DAE*, v. 71, n. 240, p. 51–64. DOI: 10.36659/dae.2023.021.

Lima, E. A. F. L.; Santos Filho, D. A.; Scalie, P. S.; Rodrigues, F. W. A.; Oliveira, L. R. G.; Mascarenha, M. M. A. Avaliação da viabilidade técnica do uso de lodo de estação de tratamento de água em camadas de cobertura de aterros sanitários. *Scientia Plena*, v. 22, n. 1, 2026. DOI: 10.14808/sci.plena.2026.019911.

Mazzutti, E. A.; Klamt, R. A.; Faro, V. P. (2023). Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. Soils and Rocks, v. 46, n. 1, p. 1–12. DOI: 10.28927/SR.2023.011222.

Montalvan, E. L. T. (2016). *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Prim, E. C. C. (2011). Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v. 7, n. 12. DOI: 10.4013/ETE.2011.72.02

Roque, A., Montalvan, E.L.T., Boscov, M.E.G., 2021. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água taiaçupeba. Rev. Geotec. 151, 33–52. doi:10.24849/j.geot.2021.151.03.

Roque, A.; Montalvan, E. L. T.; Boscov, M. E. G., 2022. Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works. *Environmental Challenges*, 7, 100465. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100465.

SANEAGO - Saneamento de Goiás S.A. *Saiba como funcionam os sistemas de abastecimento de água em Goiânia*. Saneago, 2023. Disponível em: https://www.saneago.com.br/#/noticia_interna/8913/3. Acesso em: 15 jan. 2026.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/99

INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR E PÓ DE VIDRO NOS PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM DIESEL

Gleicy Loany de Alencar Cardoso
Doutoranda, UEM, Maringá-PR, Brasil, cardoso.gleicy@hotmail.com

Gabriela Bento
Engenheira Civil, UEM, Maringá, Brasil, gaabrielabento@gmail.com

Juliana Maria de Souza
Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Juliana Azoia Lukiantchuki
Professora Adjunta, UEM, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.brs

RESUMO: A contaminação do solo por óleo diesel provoca alterações significativas em suas propriedades físicas e mecânicas, em função da presença de hidrocarbonetos. Neste contexto, o presente estudo avaliou o comportamento de um solo laterítico arenoso contaminado com óleo diesel e tratado com resíduos industriais. Foram adotados teores de contaminação de 2% e 8% de óleo diesel, em relação à massa seca total, e teores de 10%, 20% e 30% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e pó de vidro (PDV) como materiais de tratamento. O solo, o contaminante e os resíduos foram caracterizados por ensaios geotécnicos, químicos e mineralógicos. As curvas de compactação indicaram que o aumento do teor de óleo diesel promoveu a redução da massa específica seca máxima e do teor de fluidos ótimo, já para as amostras tratadas com CBCA, o aumento do teor de resíduo resultou em elevação do teor de fluidos ótimo e redução da massa específica seca máxima, para ambos teores de diesel. As amostras tratadas com PDV, por sua vez, apresentaram uma redução da massa específica seca máxima, enquanto o teor de fluidos ótimo manteve-se aproximadamente constante. Esse comportamento foi atribuído às características físicas dos materiais empregados.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação, óleo diesel, Resíduos, pó de vidro, cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

ABSTRACT: Soil contamination by diesel oil causes significant changes in its physical and mechanical properties due to the presence of hydrocarbons. In this context, the present study evaluated the behavior of a sandy lateritic soil contaminated with diesel oil and treated with industrial residues. Contamination levels of 2% and 8% diesel oil were adopted, relative to the total dry mass, and contents of 10%, 20%, and 30% sugarcane bagasse ash (SCBA) and glass powder (GP) were used as treatment materials. The soil, contaminant, and residues were characterized through geotechnical, chemical, and mineralogical tests. The compaction curves indicated that increasing the diesel oil content led to a reduction in maximum dry density and optimum fluid content. For the samples treated with SCBA, increasing the residue content resulted in an increase in optimum fluid content and a reduction in maximum dry density for both diesel contents. The samples treated with GP, in turn, showed a reduction in maximum dry density, while the optimum fluid content remained approximately constant. This behavior was attributed to the physical characteristics of the materials used.

KEYWORDS: Contamination, diesel oil, Waste materials, Glass powder, Sugarcane bagasse ash.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por óleo diesel tem sido apontada como um fator responsável por alterações significativas em suas propriedades físicas e mecânicas. Em relação à compactação, Fazeli et al. (2021) indicam que o aumento do teor de contaminantes promove a redução da massa específica seca máxima, sendo esse efeito mais acentuado em solos contaminados com óleo diesel, em função da presença de hidrocarbonetos mais pesados. Esse comportamento evidencia a necessidade de investigações voltadas à compreensão do desempenho de solos contaminados e às possibilidades de mitigação desses efeitos.

Diante da necessidade de remediar áreas contaminadas, Tavares (2013) destaca que as técnicas de remediação de solos têm como objetivo reduzir os níveis de contaminantes até limites considerados seguros, de modo a impedir ou dificultar a disseminação de substâncias nocivas ao meio ambiente.

Paralelamente, a gestão de resíduos industriais constitui um desafio ambiental crescente, em razão dos grandes volumes gerados e da disposição inadequada desses materiais. No setor vidreiro, a produção nacional atingiu cerca de 59 milhões de m² em 2021, sendo aproximadamente 80% destinados à construção civil (Abravidro, 2022), o que indica um elevado potencial de geração de resíduos associados a essa atividade. De modo semelhante, a indústria sucroenergética produz cerca de 6 kg de cinza por tonelada de cana processada (Altoé, 2012), totalizando aproximadamente 3,4 milhões de toneladas na safra 2022/2023 (CONAB, 2022).

Nesse cenário, o reaproveitamento desses resíduos tem sido amplamente investigado devido aos benefícios técnicos observados. A incorporação do pó de vidro pode aumentar a coesão, o ângulo de atrito, a densidade seca, a resistência à compressão simples e os valores de CBR, além de melhorar o comportamento ao cisalhamento. Também são observadas reduções nos limites de consistência (Olufowobi et al., 2014; Benny et al., 2017; Blayi et al., 2020; Ibrahim, Mawlood e Alshkan, 2019).

De forma semelhante, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, classificada como resíduo inerte e com propriedades pozolânicas, pode atuar como material de preenchimento e agente pozolânico, promovendo redução da plasticidade, alterações nos parâmetros de compactação e aumento da resistência. Também tem sido aplicada na estabilização/solidificação de solos contaminados, reduzindo a lixiviação de metais como chumbo e arsênio (Faria, Gurgel e Holanda, 2012; Bessa, 2011; Matos et al., 2021; Baracho e Correia, 2021; Tajudin et al., 2015; Azhar et al., 2016).

Dessa forma, este estudo avaliou a aplicação da CBCA e do PDV no tratamento de um solo laterítico arenoso contaminado com óleo diesel, considerando teores de contaminação de 2% e 8% e adições de 10%, 20% e 30% dos resíduos, com análise dos parâmetros de compactação.

2 MATERIAIS E METODOS

2.1 Programa Experimental

O programa experimental compreendeu a caracterização geotécnica do solo com os ensaios de análise granulométrica, massa específica dos sólidos, Mini-MCV, Fluorescência de raio X (FRX), Difratometria de raio X (DRX), e limites de Atterberg.

As características do óleo diesel foram fornecidas pelo comerciante, a partir do relatório de análises emitido pela Universidade Estadual de Maringá – UEM, e complementadas por ensaios específicos realizados pelo Laboratório de Análises de Combustíveis Automotivos – LACAUT (UFPR).

A CBCA e o PDV foram caracterizados por meio de ensaios de atividade pozolânica, massa específica dos sólidos e análises químicas e mineralógicas utilizando FRX e DRX.

Os ensaios de compactação foram realizados na energia normal (Proctor normal) utilizando-se o cilindro metálico e o soquete pequenos e seguindo as orientações da NBR 7182 (ABNT, 2016). Optou-se por não reutilizar o material, sobretudo porque a adição de óleo diesel dificulta a garantia de obtenção de uma amostra homogênea. A amostra de solo utilizada foi seca ao ar até a umidade higroscópica e passada integralmente na peneira de 4,8 mm.

2.2 Materiais Utilizados

2.2.1 Solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado no município de Mandaguaçu, no estado do Paraná. É classificado como areia argilosa (SC), segundo o Sistema Unificado de Classificação (SUCS), já pela AASHTO pertence ao grupo A-2-4 (pedregulhos ou areais siltosos ou argilosos, com bom comportamento de subleito). Possui massa específica de 2,63 g/cm³, valor típico de solos com predominância de quartzo. Os ensaios de FRX indicaram elevados teores de SiO_2 (59,7%), Al_2O_3 (28,8%) e Fe_2O_3 (8,9%), e o DRX apontou para a presença de minerais como quartzo, caulinita, haloisita, magnetita e óxidos de ferro, característicos de solos lateríticos.

O solo foi classificado como Laterítico Arenoso (LA') pelo método Mini-MCV. Os resultados dos ensaios de limites de Atterberg (LL=25 e LP=15) indicaram plasticidade média, coerente com a classificação de Jenkins e a carta de Casagrande.

2.2.2 Óleo Diesel

Os teores de óleo diesel adotados neste estudo foram de 2% e 8% em relação à massa seca do solo. A definição desses percentuais baseou-se em pesquisas anteriores que investigaram a contaminação de solos por derivados de petróleo (Portelinha et al., 2021).

O contaminante empregado nas análises foi o óleo diesel S500, combustível de uso comercial amplamente utilizado em estudos geotécnicos envolvendo solos contaminados (Portelinha et al., 2021). O óleo diesel apresenta um aspecto visual límpido e isento de impurezas, cor avermelhada, ponto de fulgor 43,5°, massa específica a 20°C de 844,3 kg/m³, teor de água máximo igual a 171 mg/kg, teor de enxofre de 311 mg/kg, teor de biodiesel igual a 13,6%, e viscosidade cinemática a 40°C de 2,903 mm²/s.

2.2.3 CBCA

As amostras de CBCA utilizadas neste estudo foram fornecidas pela Usina Renuka Vale do Ivaí S/A, localizada no município de São Pedro do Ivaí, no estado do Paraná. Optou-se pela utilização da cinza leve, que foi coletada em sacos plásticos, seca em temperatura ambiente e posteriormente peneirada na malha 0,075mm (peneira n° 200) para retirada de partículas provenientes da combustão incompleta e homogeneização do material.

A massa específica da CBCA foi determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 2014), resultando em um valor de 2,61 g/cm³. A caracterização mineralógica, realizada por DRX, indicou a presença reduzida de fase amorfa e predominância de fases cristalinas, com identificação de hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2) e corundum (Al_2O_3), em concordância com a literatura (Malacarne, 2021).

A atividade pozolânica da CBCA apresentou valor de 498,96 ± 18,48 mg de $Ca(OH)_2$/g de amostra, considerado relativamente baixo quando comparado a materiais pozolânicos tradicionais, como sílica ativa, sílica da casca de arroz e metacaulim (Filho et al., 2017). Entretanto, a análise por FRX confirmou o caráter pozolânico da cinza, uma vez que a soma dos óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 ultrapassa 70%, critério adotado para a classificação de materiais pozolânicos (Castro, 2015; ABNT, 2014), sendo o silício (35,785%), o alumínio (28,406%) e o ferro (25,838%) os principais constituintes.

2.2.4 PDV

O PDV utilizado neste estudo foi coletado na empresa Cristal Sete, localizada no município de Apucarana, estado do Paraná. Devido à sua consistência pastosa, o material foi inicialmente espalhado sobre lona e submetido à secagem natural por exposição à luz solar até completa desidratação, procedimento necessário para possibilitar sua adequada manipulação como indica Radke (2022).

Após a secagem, o PDV foi desagregado em moinho de barras, e posteriormente peneirado em peneira de malha 0,3mm (peneira 50), visando à obtenção de partículas mais finas e homogêneas.

A massa específica dos sólidos do PDV, determinada conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984), apresentou valor de 2,57 g/cm³. Já a análise por DRX evidenciou a presença de um halo amorfo na faixa de 15° a 28°, indicando a ausência de fases cristalinas bem definidas. Esse comportamento confirma a natureza predominantemente amorfa do resíduo, em concordância com os resultados reportados por Rotta (2022).

A atividade pozolânica do pó de vidro apresentou valor de 249,05 mg de $Ca(OH)_2$/g de amostra, considerado relativamente baixo quando comparado a materiais pozolânicos de elevada reatividade. Entretanto, a análise por Fluorescência de Raios X (FRX) confirmou o caráter pozolânico do resíduo, uma vez que a soma dos óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 atende aos critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para a classificação de materiais pozolânicos. Observa-se a predominância de silício (75,49%), cálcio (15,136%) e ferro (5,66%).

2.2.4 Misturas solo - óleo diesel - resíduos

Optou-se por fixar os teores de 2% e 8% de óleo diesel, de forma a representar duas condições distintas de contaminação do solo. Para o tratamento do solo contaminado, foram adotados teores de 10%, 20% e 30% de resíduo, considerando tanto a cinza do bagaço da cana-de-açúcar quanto o pó de vidro, em relação à massa seca total da amostra. A tabela 1 apresenta a porcentagem de cada material utilizado.

Tabela 1. Matrizes a serem estudadas

Mistura	Solo seco (%)	Óleo diesel (%)	CBCA ou PDV (%)
SN + 2%OD	100	2	-
SN + 8%OD	100	8	-
$SO_2Resíduo_{10}$	90	2	10
$SO_2Resíduo_{20}$	80	2	20
$SO_2Resíduo_{30}$	70	2	30
$SO_8Resíduo_{10}$	90	8	10
$SO_8Resíduo_{20}$	80	8	20
$SO_8Resíduo_{30}$	70	8	30

Na composição das misturas, a contaminação do solo com óleo diesel foi realizada inicialmente, considerando o teor de óleo em relação à massa seca total da amostra, ou seja, à soma das massas de solo e resíduo. Apenas após essa etapa procedeu-se à adição da CBCA ou do PDV, seguida de homogeneização e repouso. O preparo das amostras de solo contaminadas com óleo diesel seguiu uma sequência padronizada, apresentada na Figura 1.

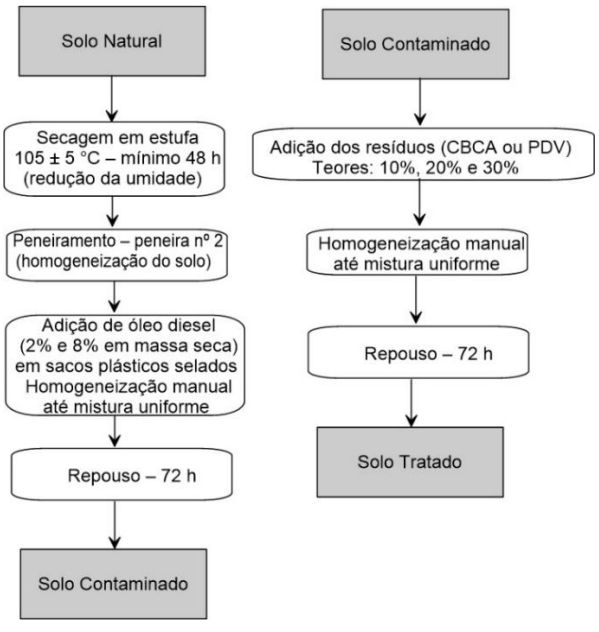
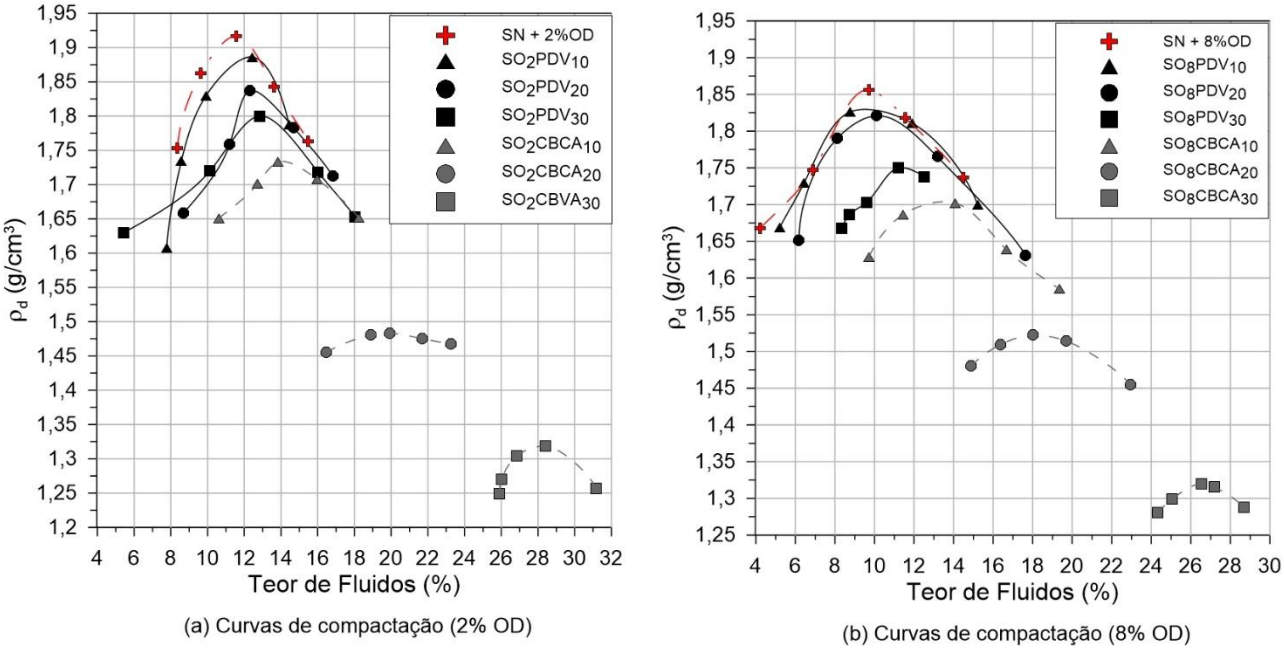


Figura 1. Processo de preparo das amostras

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 2 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo contaminado com 2%(a) e 8%(b) de óleo diesel, bem como a influência da incorporação de resíduos nos parâmetros de compactação do material. A análise das curvas permite avaliar a variação da massa específica seca e o teor de fluidos.



(a) Curvas de compactação (2% OD)

(b) Curvas de compactação (8% OD)

Figura 2. Curvas de compactação

3.1 Teor de fluidos ótimo

A Tabela 2 apresenta a variação do teor de fluido ótimo em função do tipo de resíduo, sua porcentagem e teor de óleo diesel. Observa-se que as misturas contendo CBCA apresentaram um aumento progressivo do teor de fluido ótimo com o incremento do teor de cinza de 10% para ambos teores de óleo, atingindo valor máximo de 28,0%. Em relação às misturas com PDV, os valores de teor de fluido ótimo mantiveram-se relativamente constantes nas amostras com 2% de óleo, variando entre 12,3% e 12,8%, enquanto nas amostras com 8% de óleo observaram-se valores inferiores, variando de 9,3% a 11,2%, com leve aumento associado ao maior teor de PDV. De modo geral, os resultados evidenciam que as misturas com CBCA apresentaram os maiores valores de teor de fluido ótimo, enquanto as misturas com PDV apresentaram variações mais restritas dentro da faixa analisada.

Tabela 2. Teores de fluido ótimo

Mistura	Teor de fluidos ótimo (%)	
SN + 2%OD	11,45	
SN + 8%OD	10,99	
	CBCA	PDV
$SO_2Resíduo_{10}$	13,90	12,4
$SO_2Resíduo_{20}$	19,70	12,3
$SO_2Resíduo_{30}$	28,00	12,8
$SO_8Resíduo_{10}$	13,5	9,3
$SO_8Resíduo_{20}$	18,1	10,15
$SO_8Resíduo_{30}$	26,7	11,2

O aumento mais expressivo do teor de fluidos ótimo observado nas misturas contendo CBCA pode estar relacionado às características físicas e químicas do resíduo, uma vez que sua menor finura, associada à maior atividade pozolânica, resulta em maior demanda de água para o adequado envolvimento das partículas e para

o desenvolvimento das reações de hidratação, conforme discutido por Portelinha et al. (2021). Em contraste, as amostras contendo pó de vidro apresentaram variações pouco significativas no teor de fluidos ótimo, comportamento atribuído à baixa capacidade de absorção de água desse material em comparação ao solo natural, o que reduz a quantidade de água necessária para atingir as condições ótimas de compactação (Al-Neami; Nsaif, 2024).

Além disso, observou-se uma redução no teor de fluidos ótimo com o aumento do conteúdo de óleo diesel, provavelmente em razão do efeito lubrificante do contaminante, concordando com os achados de Khamehchiyan, Charkhabi e Tajik (2006).

Salientamos, que neste trabalho optou-se por trabalhar com o termo teor de fluidos ótimos em vez de teor de umidade ótima uma vez que ambos (água e diesel) estavam sujeitos à evaporação, conforme adotado por Safehian, Rajabi e Ghasemzadeh (2018) e Portelinha et al. (2021).

3.2 Massa específica seca máxima (MDM)

A tabela 3 apresenta os resultados de MDM das amostras analisadas. Verificou-se que a adição da CBCA promoveu redução da MDM em todas as porcentagens avaliadas, independentemente do nível de contaminação por óleo diesel. Observou-se que esse efeito se intensificou com o aumento do teor de CBCA, sendo o caso mais crítico verificado para a dosagem de 30%. Nessa condição, os valores de MDM reduziram de 1,917 para 1,321 g/cm³ nas amostras contaminadas com 2% de óleo diesel e de 1,859 para 1,320 g/cm³ nas amostras contaminadas com 8% de óleo diesel, evidenciando a influência significativa do elevado teor de cinza sobre os parâmetros de compactação.

A adição do PDV promoveu alterações menos expressivas na MDM quando comparada às misturas contendo CBCA. Em relação à condição sem adição de resíduo, a incorporação de 30% de PDV resultou na redução da MDM de 1,917 para 1,862 g/cm³ nas amostras contaminadas com 2% de óleo diesel e de 1,859 para 1,752 g/cm³ nas amostras contaminadas com 8% de óleo diesel. No entanto, ao se analisar o comportamento das misturas com PDV em função do teor de resíduo, observa-se que, para as amostras com 2% de óleo diesel, o aumento do teor de PDV de 10% para 30% esteve associado a um incremento do MDM, passando de 1,803 para 1,862 g/cm³. Por outro lado, nas amostras com 8% de óleo diesel, o aumento do teor de PDV resultou em uma leve redução da massa específica seca máxima de 1,835 para 1,752 g/cm³.

Constatou-se que as amostras contendo CBCA apresentaram valores de massa específica seca máxima menores em comparação às amostras com pó de vidro, o que pode ser atribuído à sua granulometria mais fina. De acordo com Inan, Mampearachchi e Udayanga (2016), à medida que a fração fina de um material aumenta, os valores de MDM tendem a diminuir, evidenciando que a presença de partículas finas influencia diretamente a massa específica seca máxima que pode ser obtida durante a compactação.

Tabela 3. Massa Específica seca máxima

Mistura	Massa Específica seca máxima (g/cm³)	
SN + 2%OD	1,917	
SN + 8%OD	1,859	
	CBCA	PDV
SO_2Resíduo$_{10}$	1,733	1,803
SO_2 Resíduo $_{20}$	1,483	1,837
SO_2 Resíduo $_{30}$	1,321	1,862
SO_8 Resíduo $_{10}$	1,705	1,835
SO_8 Resíduo $_{20}$	1,522	1,825
SO_8 Resíduo $_{30}$	1,320	1,752

Também verificou-se a diminuição do MDM com o aumento do teor de OD. O aumento do teor de diesel tende a diminuir a massa específica seca máxima do solo, uma vez que esse efeito se deve a massa específica do óleo diesel (0,844 kN/m³) ser muito inferior ao solo (2,630 g/cm³). Portanto, a substituição das partículas do solo por materiais mais leves, como o óleo diesel, diminuiu a massa específica seca máxima dos solos contaminados (Ahmad *et al.*, 2020).

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, avaliou-se a influência da contaminação por óleo diesel e da adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e pó de vidro nos parâmetros de compactação de um solo laterítico arenoso. Os resultados indicaram que:

- Quanto maior o teor de diesel, menores são a massa específica seca máxima e o teor de fluidos ótimo, efeito atribuído ao menor peso específico do óleo em relação ao solo, bem como ao efeito lubrificante do diesel.
- A adição de CBCA promoveu reduções expressivas na MDM e aumentos significativos no teor de fluidos ótimos, efeito que se intensificou com o incremento do teor de resíduo. Esse comportamento é explicado pela maior fração de partículas finas presentes na CBCA e a sua atividade pozolânica.
- A incorporação de PDV causou alterações menos expressivas na MDM e no teor de fluidos ótimo, refletindo a granulometria mais grossa do material e sua menor capacidade de absorção de água.
- Os resultados obtidos representam uma etapa preliminar de avaliação do potencial dos resíduos, sendo necessários estudos complementares para melhor caracterização da eficiência do tratamento.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), pelo suporte institucional e pela disponibilização da infraestrutura laboratorial necessária à execução desta pesquisa. Aos técnicos, professores e colaboradores, pelo apoio prestado ao longo do desenvolvimento do trabalho. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro indispensável à realização deste estudo. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta pesquisa, ficam registrados os sinceros agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 12653. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano (2022). Panorama ABRAVIDRO – edição 2022. Disponível em: http://www.abravidro.org.br. Acesso em: 10 out. 2023.

Ahmad, S. et al. (2020) Stabilization and solidification of oil-contaminated sandy soil using Portland cement and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (8). DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003169..

Altoé, S. P. S. (2012) Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 179 p.

Azhar, A. T. S. et al. (2016) Leachability of arsenic (As) contaminated landfill soil stabilised by cement and bagasse ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160 (1), p. 012078. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012078

Baracho, G. O.; Correia, N. de S. (2021) Viabilidade de misturas de solo laterítico argiloso com cinza do bagaço da cana para construção de estradas rurais. *Revista Geama*, 7 (2). Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/4136. Acesso em: 10 out. 2023.

Benny, J. R. et al. (2017) *Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil*. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6 (5).

Bessa, S. A. L. (2011) Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 181 p. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4184. Acesso em: 10 out. 2023.

Blayi, R. A.; Sherwani, A. F. H.; Ibrahim, H. H.; Faraj, R. H.; Daraei, A. (2020) *Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powde*r. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427.

Castro, T. R. (2015) Argamassa mista com a cinza pesada e a cinza leve do bagaço de cana-de-açúcar: propriedades no estado fresco e endurecido. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. Disponível em: https://peu.uem.br/TainaraRigoti.pdf. Acesso em: 08 set. 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento (2022) Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 9, n. 2, p. 1-58. Brasília. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar. Acesso em: 10 out 2023.

Faria, K. C. P.; Gurgel, R. F.; Holanda, J. N. F. (2012). *Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. Journal of Environmental Management*, 101, 7–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.032.

Fazeli, G. et al. (2021) *Bearing capacity and geotechnical properties of sandy soil substrate contaminated with oil derivatives*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54 (4). DOI: https://doi.org/10.1144/qjegh2020-134.

Filho, J. H. et al. (2017) Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland. *Matéria*, 22 (3). DOI: https://doi.org/10.1590/s1517-707620170003.0207.

Ibrahim, H. H.; Mawlood, Y. I.; Alshkane, Y. M. (2019) *Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. International Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (4), p. 496–503. DOI: https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1647644

Inan, I. I. I.; Mampearachchi, W. K.; Udayanga, P. A. S. (2016) *Effect of fine percentage on the properties of sub-base material*. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49 (4), p. 15. DOI: https://doi.org/10.4038/engineer.v49i4.7234.

Khamehchiyan, M.; Charkhabi, A. H.; Tajik, M. (2006) *Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils*. *Engineering Geology*, 89 (3-4), p. 220–229. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.

Malacarne, S. M. (2021). Processamento e caracterização do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

Matos, W. E. de C. et al. (2021) Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. Matéria: Teresina, v. 26, n. 4. 20 p. DOI: doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322

Olufowobi, J. et al. (2014) Clay soil stabilization using powdered glass. *Journal of Engineering Science and Technology*, Nigéria, p. 14-28, mai. 2014.

Portelinha, F. H. M. et al. (2021). *Geotechnical properties and microstructure of a diesel contaminated lateritic soil treated with lime*. *Soil and Sediment Contamination*, 30(7), 838–861.

Radke, I. B. de G. (2022) Viabilidade da utilização de resíduo de laminação de vidro na confecção de concretos estruturais. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Maringá

ROTTA, J. V. P. Avaliação da utilização de resíduo de vidro como substituto parcial do cimento em concretos estruturais baseada na resistência à compressão e no ataque de soluções agressivas. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.Tavares, S. R. de L. (2013). Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados. Joinville: Clube de Autores.

Tajudin, S. A. et al. (2015) *Utilization of sugarcane bagasse ash for stabilization/solidification of lead-contaminated soils. Jurnal Teknologi*, 77 (11). DOI: https://doi.org/10.11113/jt.v77.6430

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/100

Influência da Formação Guabirotuba na Erosão do Solo das Margens do Rio Belém (Curitiba/PR): Soluções de Engenharia Natural para Mitigação.

Wesley Fermino da Silva Almeida
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, wesley.fermino@ufpr.br

Marli Moro
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, marli.moro@ufpr.br

Karen Santos Schmidt
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, karenschmidt@ufpr.br

Letícia Luiza Markovicz Leal Farias
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, leticia.luiza@ufpr.br

Roberta Bomfim Boszczowski
Professora associada, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, roberta.bomfim@ufpr.br

RESUMO: Este artigo técnico aborda a relação entre os processos erosivos nas margens do Rio Belém, em Curitiba, e os solos da Formação Guabirotuba. A Formação Guabirotuba é constituída predominantemente por sedimentos argilosos e silto-arenosos de baixa permeabilidade, apresentando características mineralógicas e estruturais (presença de caulinita e esmectita, alta plasticidade, expansibilidade e retratilidade) que contribuem para sua elevada suscetibilidade à erosão, especialmente em locais sem cobertura vegetal e com adensamento populacional. Este trabalho pesquisa a adoção de práticas de engenharia natural, como bioengenharia com uso de biomantas, plantio de árvores nativas com sistema radicular de profunda penetração - estratégias associadas à parques lineares, muros vegetados e obras integradas de drenagem sustentável - e projetos educacionais com participação da comunidade no entorno do rio Belém. Faz parte a investigação das intervenções em andamento e propostas de revitalização do rio Belém por parte das entidades públicas. O artigo conclui que a sinergia entre técnicas convencionais e soluções baseadas na natureza é um caminho promissor para revitalização do rio Belém, para aumentar a resiliência urbana e a sustentabilidade dos recursos hídricos em cidades sujeitas a solos com altas taxas de erodibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Guabirotuba, Erosão, Natural, Revitalização, Sustentabilidade.

ABSTRACT: This technical paper examines the relationship between erosive processes along the banks of the Belém River, in Curitiba, and the soils of the Guabirotuba Formation. The Guabirotuba Formation is predominantly composed of clayey and silty - sandy sediments with low permeability, exhibiting mineralogical and structural characteristics (presence of kaolinite and smectite, high plasticity, expansibility, and shrink - swell behavior) that contribute to high susceptibility to erosion, particularly in reaches lacking vegetation cover and with high urban density. This study investigates the adoption of natural engineering practices, such as soil bioengineering with the use of erosion control mats and the planting of native tree species with deep root systems-strategies associated with linear parks, vegetated retaining structures, integrated sustainable urban drainage works, and educational projects with community participation in the surroundings of the Belém River. The investigation also encompasses ongoing interventions and revitalization proposals for the Belém River promoted by public authorities. The article concludes that the constructive interaction between conventional engineering techniques and nature-based solutions constitutes a promising pathway for the revitalization of the Belém River, enhancing urban resilience and the sustainability of water resources in cities subject to soils with high erodibility rates.

KEYWORDS: Guabirotuba, Erosion, Natural, Revitalization, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Os processos erosivos nas áreas urbanas são um desafio para o planejamento e a gestão sustentável das cidades, especialmente em áreas caracterizadas por solos de elevada suscetibilidade à degradação (Embrapa Florestas, 2025) onde intervenções inadequadas nos cursos d'água, associadas à impermeabilização do solo e à supressão da cobertura vegetal intensificam a instabilidade das margens fluviais, comprometem o ecossistema e as infraestruturas urbanas. A cidade de Curitiba possui essa dinâmica em muitas de suas áreas, por conta dos solos da Formação Guabirotuba (Santos et al., 2011).

A bacia do Rio Belém, localizada integralmente no município de Curitiba-PR, ilustrada na Figura 1, apresenta um histórico complexo de canalizações, retificações e ocupação urbana desordenada de suas margens. O substrato geológico da região é predominantemente constituído pela Formação Guabirotuba, caracterizada por alternâncias de argilas, siltes e areias de origem flúvio-lacustre, frequentemente associada a solos altamente instáveis e propensos a processos erosivos severos quando expostos à dinâmica hídrica urbana. Este trabalho tem como objetivo realizar uma caracterização geotécnica preliminar e uma avaliação qualitativa das condições de instabilidade das margens do Rio Belém, identificando os principais mecanismos de falha e propondo diretrizes conceituais de Engenharia Natural para auxiliar na mitigação dos danos. Devido à extensão do corpo hídrico e à heterogeneidade urbana, optou-se por uma abordagem qualitativa de mapeamento visual e zoneamento dos setores críticos.

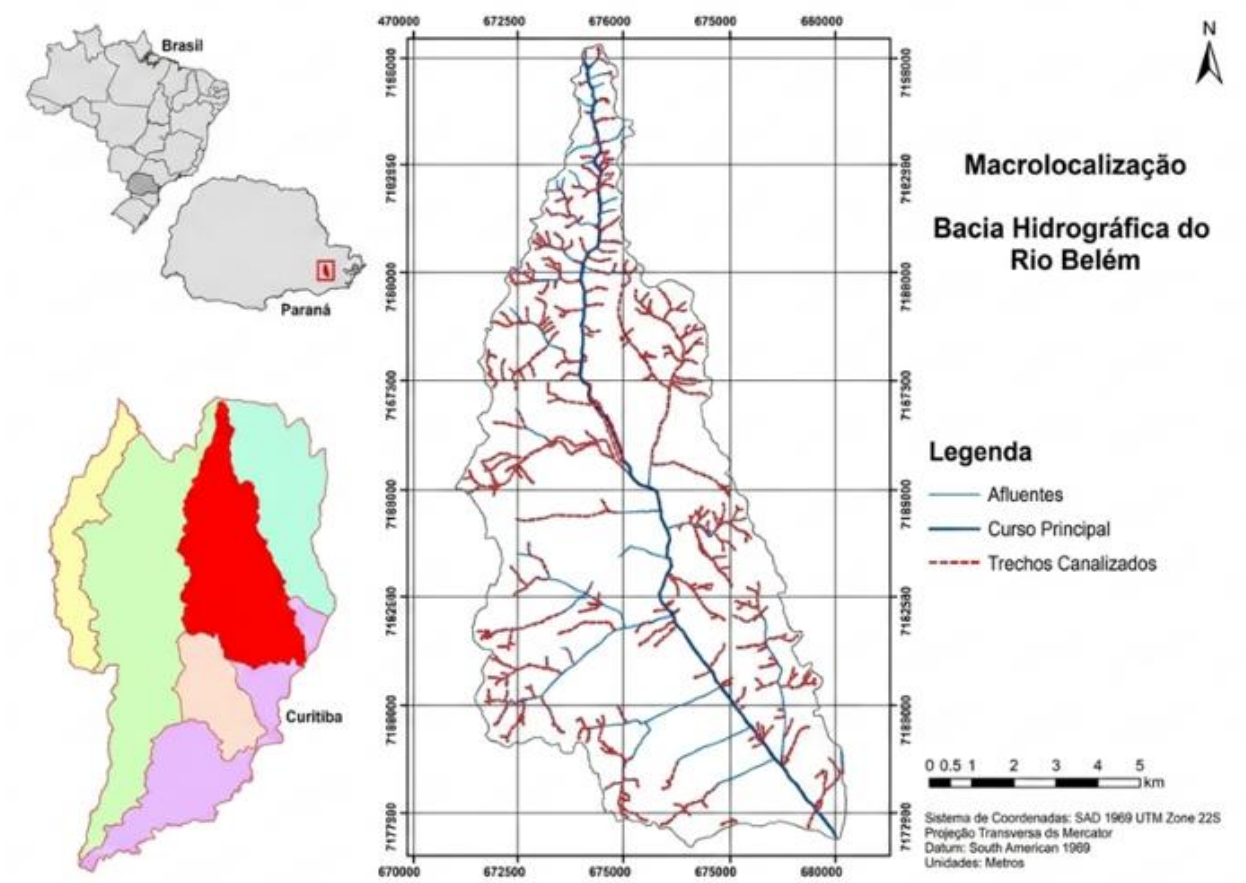


Figura 1. Macrolocalização da bacia hidrográfica do Rio Belém (Adaptado de Siqueira et al., 2022).

Do ponto de vista metodológico, o presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica associada a um estudo de caso qualitativo aplicado à Bacia do Rio Belém, em Curitiba (PR). A pesquisa baseou-se na análise de literatura técnico-científica sobre a Formação Guabirotuba, processos erosivos em margens fluviais urbanas e técnicas de engenharia natural, bem como na análise de documentos institucionais e planos de gestão urbana no município, como o Plano Diretor, o Plano Municipal de Saneamento e o Plano Diretor de Drenagem. A análise concentra-se na avaliação conceitual e técnica das estratégias propostas, delimitando o escopo a uma análise preliminar que servirá de base para futuros estudos quantitativos de estabilidade de taludes.

2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

A Formação Guabirotuba abrange a maior parte da área de Curitiba e região metropolitana, compondo a Bacia Sedimentar de Curitiba. Tem grande importância regional devido à sua grande área de abrangência, em região de grande crescimento, e peculiaridades geotécnicas. O material dessa Formação é um sedimento de origem terciária, conhecido, regionalmente, como "sabão de caboclo" por ser bastante duro em seu estado natural, mas quando umedecido torna-se bastante liso e escorregadio. Os solos são preferencialmente compostos de argilas, areias arcosianas, conglomerados e carbonatos, sendo as argilas os componentes mais abundantes. São solos altamente plásticos, apresentam coloração cinza, cinza esverdeada ou ainda marrom claro com veios cinza. Na carta de Plasticidade situam-se, em geral, acima da linha A de Casagrande, com o LL variando de 50 a 90% e o IP, de 25 a 50%, caracterizando argilas inorgânicas de alta plasticidade. Em superfície, os sedimentos assumem coloração roseada (mosqueada) devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro. Conforme citado por Salamuni (Salamuni e Ebert, 1998) essa composição resulta em sedimentos pouco consolidados e com elevada heterogeneidade litológica, sendo um dos principais fatores que influenciam o comportamento geotécnico do solo.

A posição do nível do lençol freático é variável na Formação Guabirotuba, podendo ser encontrado próximo da superfície ou em profundidades de até 15 m. Com frequência observa-se a presença de aquíferos suspensos, formados devido à baixa permeabilidade da matriz da argila rija (Kormann, 1999). Ao entrar em contato direto com a atmosfera, apresenta ressecamento e redução volumétrica, adquirindo um aspecto "empastilhado", elemento fundamental no estudo de sua erodibilidade. Diversos autores (Kormann, 2002; Boszczowski, 2001; Duarte, 1999) apresentam dados de análises mineralógicas que permitem caracterizar a predominância de argilos-minerais do grupo das esmectitas em sua composição. Em superfície os sedimentos intemperizados apresentam características preferencialmente associadas à caulinita (Boszczowski, 2001), e na fração argila dos sedimentos não intemperizados ocorre a predominância da montmorilonita (80%), em relação à caulinita (10%) e à ilita (10%) (Duarte, 1986). Essa composição é a causa da ocorrência de solos expansivos e do consequente empastilhamento dos solos ao sofrer ressecamento. Apesar da presença dos argilo-minerais que conferem ao solo características de expansão, contração e higroscopia, tais processos de variação volumétrica não se manifestam quando o solo se encontra em sua condição natural, confinado por camadas de solo superficial e protegido por vegetação. Nessas condições, sua umidade natural pouco se altera em decorrência de variações climáticas (Boszczowski, 2001). Porém, esses processos podem ocorrer intensamente quando o solo fica exposto, desprotegido e desconfinado. Assim, as argilas rijas da Formação Guabirotuba podem ser incluídas entre os solos de grande suscetibilidade à erosão, ressaltando que essa suscetibilidade é dependente de sua condição inicial no evento erosivo (Chamecki, 2002).

O Rio Belém é um dos seis principais rios que atravessam Curitiba, desaguando no Rio Iguaçu. A Bacia Hidrográfica do Rio Belém nasce no bairro Cachoeira, no extremo norte da cidade, atravessa a região central e mais 37 bairros (dos 75 existentes em Curitiba) até encontrar sua foz no rio Iguaçu, entre os bairros Uberaba e Boqueirão. Possui aproximadamente 21 km de extensão, área de drenagem de 87,62 km² —cerca de 20% da área do município — e cerca de 64 km de cursos d'água somando seus 46 afluentes, entre eles os rios Pilarzinho, Ivo e Água Verde.

Ao longo do processo de urbanização de Curitiba, o curso natural do Rio Belém sofreu diversas intervenções antrópicas. Em diferentes trechos, o rio foi retificado para acompanhar o traçado urbano, canalizado ou mesmo conduzido em galerias subterrâneas, emergindo novamente em alguns pontos da cidade. Essas intervenções, realizadas principalmente a partir da segunda metade do século XX, tiveram como objetivo reduzir enchentes e viabilizar a expansão urbana. Como consequência desse processo, edificações passaram a ocupar áreas muito próximas ao leito do rio, frequentemente sem respeitar as faixas naturais de drenagem.

Diversos estudos indicam, entretanto, que tais modificações alteraram significativamente a dinâmica hidráulica e geomorfológica do rio. A retificação do curso reduziu a capacidade natural de dissipação de energia do escoamento, aumentando a velocidade da correnteza e a pressão exercida sobre as margens. Associada à remoção da vegetação ciliar em diversos trechos, essa alteração favoreceu processos erosivos e o assoreamento do leito, comprometendo a estabilidade das margens e a qualidade da água (Ono, 2011; Silva et al., 2020).

O fenômeno erosivo torna-se mais evidente em segmentos a céu aberto, como nos bairros São Lourenço e Abranches, onde a exposição direta do solo à ação da correnteza intensifica o desgaste das margens. Já em áreas densamente urbanizadas, como nos bairros Prado Velho e Centro, a elevada impermeabilização do solo aumenta o escoamento superficial durante eventos de chuva, contribuindo para o agravamento de processos erosivos e para a ocorrência de enchentes (Ono, 2011; Silva et al., 2020).

A engenharia natural, também denominada bioengenharia de solos, constitui um campo multidisciplinar da engenharia civil que integra conhecimentos de hidrologia, hidráulica, geotecnia e botânica. Seu principal objetivo é promover a estabilização geotécnica e hidráulica de forma ambientalmente integrada, por meio do uso de material vegetal vivo como elemento estruturante no controle de processos erosivos, instabilidades de taludes e proteção de margens fluviais (Schiechtl; Stern, 1997). Soluções baseadas na natureza (SbN) são soluções que imitam ou restauram funções naturais para resolver problemas humanos. No caso dos rios urbanos, elas são fundamentais para recuperar margens e reduzir riscos de enchentes O conceito de soluções baseadas na natureza-SBN é relativamente recente, e sua implementação nas áreas urbanas está ainda em fase inicial e, para sua compreensão e disseminação, tem sido de grande auxílio os estudos feitos por instituições de ensino em parceria com órgãos municipais.

3 AÇÕES PARA A MITIGAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO RIO BELÉM

Tabela 1. Síntese das iniciativas de mitigação e atores envolvidos na Bacia do Rio Belém

Âmbito - Atores	Iniciativas, Programas e Instrumentos	Objetivos, Ações Práticas e Observações
Governo Federal	• Projeto de Lei nº 3113/2023	• Proposta de criação da Política Nacional de Arborização Urbana (Senado Federal do Brasil, 2023). •A vegetação intercepta a chuva e reduz o escoamento superficial responsável pela desagregação do solo (Agência Nacional de Águas, 2025). A literatura técnico-científica, aponta que ausência de cobertura vegetal intensifica a erosão e o aporte de sedimentos aos corpos hídricos (Bertoni; Lombardi Neto, 2012).
	• 8º Fórum Mundial da Água	Aprovação do Plano de Revitalização da Bacia do Rio Belém (Curitiba, 2025b). • Grupo de trabalho denominado GT Belém, parceria técnica entre Governo do Estado do Paraná e a Prefeitura Municipal de Curitiba.
Governo Estadual Governo Municipal (Prefeitura e Câmara Municipal de Curitiba)	• Parceria Prefeitura-Concessionária de energia (COPEL)	• Desenvolvimento de base de dados georreferenciada de árvores próximas à rede elétrica (via ferramenta Field Maps) para compartilhamento e manejo adequado com o município (COPEL, 2025).
	• obras estruturais de drenagem e saneamento	Controle e monitoramento de ligações clandestinas de esgoto.
	• pavimentos flexíveis	• Implantação de dispositivos de micro drenagem, como sarjetas, meios-fios, bocas de lobo e galerias pluviais. • Adoção desses dispositivos visa reduzir processos erosivos, minimizar o transporte de sedimentos e atenuar ocorrências de alagamentos localizados (Tucci, 2005).
	• Programas Específicos: - +Vida no Rio Belém - Amigo dos Rios (SANEPAR, 2019)	Constituem campanhas voltadas à redução dos riscos de escassez hídrica e à promoção da destinação adequada do esgoto.

Âmbito - Atores	Iniciativas, Programas e Instrumentos	Objetivos, Ações Práticas e Observações
	- Olho d'Água (Curitiba, 2016)	• Promove atividades educativas que estimulam a população compreender a importância da proteção das nascentes e cursos d'água urbanos.
	- Revisão do Plano Diretor de Curitiba	• Incorporação de dispositivos como a Reserva Hídrica do Futuro. •Uso de fitorremediação para tratamento de poluentes
	- Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB)	• Ampliação da coleta e tratamento de esgoto • Controle de ligações irregulares e qualificação da drenagem urbana. •Redução dos lançamentos concentrados nas margens, mitigando a saturação crônica dos taludes e processos erosivos associados.
	- Plano Municipal de Arborização Urbana (Curitiba, 2025a)	• Redução do déficit de cerca de 262.167 árvores em calçadas.
	- Programa Curitiba Resiliente associado às Diretrizes do PlanClima (Curitiba 2020)	• Eco Distrito Belém, prevê a implantação do parque linear de aproximadamente 6,3 km conectando a Linha Verde ao Parque Iguaçu, integrando infraestrutura verde, ciclovias e espaços públicos. • Reassentamento de cerca de 450 famílias (atualmente em áreas classificadas como de risco nas margens do rio) expostas a processos de inundação e instabilidade de taludes (Curitiba, 2025).
	- Revisão do Plano diretor de Drenagem	• Integração de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e estratégias de drenagem urbana sustentável na gestão territorial.
	• Arcabouço Legal e Propostas Legislativas: - Lei 16.582/2025 (Jardins de Chuva)	• Oficialização de jardins de chuva e pavimentos intertravados (*pavers*) para aumentar a permeabilidade e atenuar picos de vazão (Tucci, 2005; Ahiablame et al., 2012).
	- Proposta de instalação de ecobarreiras (Câmara Municipal de Curitiba, 2025)	• Implantação de ecobarreiras flutuantes em pontos estratégicos do Rio Belém e Rio Ivo para reter resíduos sólidos e reduzir a poluição difusa.
	• Intervenções de Infraestrutura Verde	• Implantação de parques lineares e melhorias na infraestrutura de drenagem urbana.
	• Parque Municipal das Nascentes do Rio Belém,	• Inaugurado em 2001, situado no bairro Cachoeira, é responsável pela proteção das nascentes do rio.

Âmbito - Atores	Iniciativas, Programas e Instrumentos	Objetivos, Ações Práticas e Observações
Instituições de Ensino (UFPR, PUCPR e IFPR)	• Projetos de Pesquisa e Extensão Universitária - Água & Ação	• Geração de dados científicos e monitoramento da qualidade da água (análises físico-químicas). • Acompanhamento da biodiversidade e controle de processos erosivos. • Recuperação da vegetação ciliar. • Implantação de microflorestas urbanas e experimentação de SbN (wetlands e técnicas de engenharia natural). • Ações de educação ambiental junto à comunidade. • Iniciativas que buscam consolidar o entorno do Rio Belém como espaço experimental para práticas de conservação e restauração ambiental, articulando pesquisa científica, atividades curriculares e projetos de extensão com os princípios da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

4 CONCLUSÃO

O Rio Belém, localizado em Curitiba, Paraná, é um dos principais cursos d'água urbanos da cidade e tem sido objeto de diversas intervenções ao longo do último século. Ao longo de toda a sua extensão as margens foram ocupadas pela expansão urbana. A retificação e canalização de trechos significativos, especialmente na região central, foram realizadas com o objetivo de controlar enchentes e permitir a expansão urbana. Entretanto, tais medidas intensificaram problemas ambientais, entre eles os processos erosivos nas margens. Além disso, os solos característicos da Bacia de Curitiba têm alta suscetibilidade à erosão quando expostos.

As propostas de intervenção baseadas em Engenharia Natural (como biomantas e revegetação com espécies nativas), associadas a estruturas de controle de drenagem urbana (wetlands e poços de infiltração), mostram-se conceitualmente viáveis para reduzir a energia do escoamento superficial e proteger a face dos taludes contra a erosão pluvial.

Contudo, reforça-se que as medidas apresentadas neste artigo são delineadas estritamente como diretrizes preliminares e conceituais. Para a efetiva implementação executiva dessas soluções de baixo impacto, faz-se necessária a realização de estudos hidráulicos, hidrológicos e ensaios geotécnicos quantitativos complementares (incluindo geometria exata dos taludes e cálculo de fator de segurança) para garantir a estabilidade global das obras.

As instituições de ensino localizadas na bacia do Rio Belém têm desempenhado papel relevante na produção de conhecimento e na implementação de ações de recuperação ambiental. A Universidade Federal do Paraná, a Pontifícia Universidade Católica do Paraná e o Instituto Federal do Paraná desenvolvem iniciativas de pesquisa e extensão voltadas ao monitoramento da qualidade da água, recuperação da vegetação ciliar, controle de processos erosivos e educação ambiental junto à comunidade. Esses projetos incluem análises físico-químicas da água, acompanhamento da biodiversidade, ações de reflorestamento ciliar, implantação de microflorestas urbanas e experimentação de soluções baseadas na natureza, como wetlands construídos e técnicas de engenharia natural. Além de gerar dados científicos relevantes sobre a dinâmica ambiental da bacia, essas iniciativas contribuem para a formação de estudantes e para o fortalecimento da relação entre universidade e sociedade na busca por soluções sustentáveis para a revitalização do Rio Belém.

No âmbito do poder público municipal, diferentes programas e instrumentos de gestão vêm sendo mobilizados para a recuperação ambiental da bacia do Rio Belém. Destacam-se iniciativas de revitalização de cursos d'água urbanos, programas de educação ambiental e ações de limpeza e manejo das margens, além da implantação de parques lineares e melhorias na infraestrutura de drenagem urbana. Programas como +Vida no Rio Belém, Amigos dos Rios e Olho d'Água buscam integrar ações de conservação ambiental, participação comunitária e monitoramento dos recursos hídricos. Paralelamente, a revisão do Plano Diretor de Curitiba e o fortalecimento de políticas urbanas voltadas à adaptação climática apontam para uma crescente incorporação de soluções baseadas na natureza e estratégias de drenagem urbana sustentável na gestão territorial da cidade.

Conclui-se que a proteção das margens do Rio Belém demanda não apenas soluções estruturais convencionais, mas uma estratégia sistêmica que considere o comportamento hidromecânico da Formação Guabirotuba, associando controle de vazão, manejo da infiltração, manutenção da cobertura vegetal e regulação da ocupação urbana. A articulação entre instrumentos de planejamento e técnicas de engenharia natural representa caminho tecnicamente consistente para a mitigação de processos erosivos e para a promoção da resiliência urbana em bacias sedimentares similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (2025) *Manual Programa Produtor de Água: controle de processos erosivos em áreas degradadas*. Brasília.

Ahiablame, L., Engel, B., Chaubey, I. (2012) Effectiveness of low impact development practices: literature review. *Water, Air & Soil Pollution*.

Universidade Federal do Paraná (2025) *Água & Ação: Relatório Anual de Atividades*. Curitiba.

Bertoni, J., Lombardi Neto, F. (2012) *Conservação do solo*. 8. ed. São Paulo: Ícone.

Boszczowski, R.B. (2001) *Avaliação da tensão lateral de campo de argilas sobreadensadas: ensaios de laboratório com um solo da Formação Guabirotuba*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 286 f.

Chamecki, P.R. (2002) *Metodologias de laboratório para estudos da erosão hídrica em solos: aplicação a uma argila da Formação Guabirotuba*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 274 f.

COPEL (2025) *Copel vai compartilhar base de dados de 1,8 milhão de árvores com as prefeituras*. Agência Estadual de Notícias do Paraná. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Copel-vai-compartilhar-base-de-dados-de-18-milhao-de-arvores-com-prefeituras>. Acesso em: 01 mar. 2026.

Curitiba (2020) *PlanClima: plano de mitigação e adaptação às mudanças climáticas*. Prefeitura Municipal de Curitiba. Curitiba.

Curitiba (2025a) *Plano Municipal de Arborização Urbana*. Prefeitura Municipal de Curitiba. Curitiba.

Curitiba (2025b) *Plano Diretor de Drenagem: etapa macrodrenagem nas bacias Atuba, Belém, Barigui, Iguaçu, Padilhas e Passaúna. v. IV: Manual de Drenagem*. Curitiba: IPPUC/COBRACAP.

Curitiba (2016) *Programa Olho D'Água: Manual de Avaliação da Qualidade da Água dos Rios.* 2. ed. Prefeitura Municipal de Curitiba. Curitiba.

Curitiba (2025c) Prefeitura de Curitiba planeja reassentamento de 450 famílias com o projeto Ecodistrito Belém. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/prefeitura-de-curitiba-planeja-reassentamento-de-450-familias-com-o-projeto-ecodistrito-belem/79559>. Acesso em: 09 fev. 2026.

Curitiba (2025d) Projeto de Lei nº 005.00268.2025, de 17 de março de 2025. Câmara Municipal de Curitiba Disponível em: <https://www.curitiba.pr.leg.br/informacao/noticias/preservacao-da-agua-projeto-de-lei-instala-ecobarreira-em-rios-de-curitiba>. Acesso em: 09 fev. 2026.

Defesa Civil do Paraná (2017) Estado e Prefeitura de Curitiba vão despoluir o Rio Belém. Disponível em: <https://www.defesacivil.pr.gov.br/Noticia/Estado-e-Prefeitura-de-Curitiba-vao-despoluir-o-Rio-Belem>. Acesso em: 26 jan. 2026.

Duarte, J.M.G. (1986) *Um estudo geotécnico sobre o solo da Formação Guabirotuba, com ênfase na determinação da resistência residual*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 168 f.

Duarte, J.M.G. (1999) A resistência residual dos solos da Formação Guabirotuba e sua importância na estabilidade de taludes. In: *Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba,* Curitiba, ABMS e UFPR. p. 77-91.

Embrapa Florestas (2025) *Ecologia e restauração ambiental nas margens do Rio Belém*. Disponível

em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 11 fev. 2026.

IFPR (2025) Professor do IFPR Campus Curitiba coordena projeto de recuperação ambiental do Rio Belém. Instituto Federal do Paraná. Disponível em: <https://ifpr.edu.br/curitiba/professor-do-ifpr-campus-curitiba-coordena-projeto-de-recuperacao-ambiental-do-rio-belem/>. Acesso: 11 fev. 2026.

Kormann, A.C.M. (1999) Comportamento de argilas rijas: aspectos geotécnicos da Formação Guabirotuba. In: *Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba*, Curitiba, ABMS e UFPR. p. 119-128.

Kormann, A.C.M. (2002) *Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório.* Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo

Moreira, S. S. (2023) PUCPR vai implantar microflorestas na bacia do Rio Belém. *Revista Ensino Superior*. Disponível em: <https://revistaensinosuperior.com.br/2023/05/18/pucpr-vai-implantar-microflorestas-na-bacia-do-rio-belem/>. Acesso em: 11 fev. 2026.

Ono, M. M. (Org.) (2011) *Cuide dos rios: qualidade das águas e preservação ambiental*. Curitiba: IPPUC.

PUCPR (2023) *Estudantes da PUCPR participam de mutirão para ajudar na preservação de rios*. Curitiba.

PUCPR (2018) URB - Reviva o Belém - projeto desenvolvido durante a Semana do Projeto Integrador da PUCPR com foco em conscientização e requalificação urbana do entorno do Rio Belém. Curitiba.

Salamuni, E., Ebert, H. D. (1998) *Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR)*. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro.

Sanepar (2019) Sanepar e Prefeitura de Curitiba darão continuidade ao "Amigos do Rio". Companhia de Saneamento do Paraná. Disponível em: <https://www.sanepar.com.br/noticias/sanepar-e-prefeitura-de-curitiba-darao-continuidade-ao-amigos-do-rio>. Acesso em: 11 fev. 2026.

Santos, H. G. et al. (2011) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de solos da Formação Guabirotuba, Curitiba (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *v. 35, n. 5*.

Schiechtl, H. M., Stern, R. (1997) *Bioengineering for Land Reclamation and Conservation*. Edmonton: University of Alberta Press.

PUCPR. (2023) Estudo do diagnóstico e projeto de revitalização dos rios inseridos no campus da PUCPR. In: *Anais do Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica (SEMIC/SEMITI)*, Curitiba.

Senado Federal do Brasil (2023) *Projeto de Lei n.º 3113, de 16 de junho de 2023: Institui a Política Nacional de Arborização Urbana*. Brasília. Disponível em: < https://static.congressoemfoco.com.br/attachment/2025/03/24/6d90dc_pl-3113-2023-efraim-filho.pdf >. Acesso em: 08 fev. 2026

Silva, J. P., Oliveira, M. R., Souza, A. L. (2020) Revitalização de rios urbanos: estudo de caso bacia do Rio Belém, Curitiba-PR. *Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 12*, p. 95672–95685.

Siqueira, G. I. S. et al. (2022) Bacia hidrográfica do rio Belém, na cidade de Curitiba (PR): uma visão geral da impermeabilização excessiva. *Estrabão,* v. 3, p. 159-173.

Tucci, C. E. M. (2005) *Gestão de águas pluviais urbanas*. Porto Alegre: ABRH.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/101

Influência da granulometria no pH de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)

Priscila Fernanda Silva de Oliveira
Doutoranda, UFG, Goiânia, Brasil, priscilafso@discente.ufg.br

Eder Carlos Guedes dos Santos
Professor em tempo integral, KUST, Kunming, China, jw2023008@kust.edu.cn

Maurício Martines Sales
Professor Titular, UFG, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

RESUMO: Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) têm se apresentado como uma alternativa sustentável e tecnicamente viável em diferentes aplicações geotécnicas. Entretanto, para o uso eficiente e seguro dos RCD-R, torna-se fundamental compreender as suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, assim como a variabilidade inerente ao material. Dentre as propriedades químicas, o pH pode ser uma forma simples e direta para estimar a interação entre os RCD-R e outros materiais com os quais venham a ser empregados em conjunto e, consequentemente, a durabilidade das estruturas a longo prazo. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da granulometria no pH de um RCD-R beneficiado em usina de reciclagem. Para tanto, foram realizadas a caracterização gravimétrica do material, a fim de identificar seus principais constituintes e verificar a representatividade dos diferentes componentes que compõem o resíduo. Foram conduzidos ensaios de pH em distintas faixas granulométricas, com o intuito de investigar a influência do tamanho das partículas nos valores de pH do material. A análise dos resultados obtidos e a comparação com os de estudos anteriores revelaram que as partículas de menor granulometria exercem maior influência sobre o comportamento químico do material, sendo determinantes no valor do pH dos resíduos reciclados.

PALAVRAS-CHAVE: Análise granulométrica, Reciclagem, Composição química, Durabilidade, Sustentabilidade.

ABSTRACT: Recycled construction and demolition waste (RCDW) has been pointed out as an eco-friendly and technically viable alternative for several geotechnical applications. However, the efficient and safe use of RCDW demands a comprehensive understanding of its physical, mechanical, and chemical properties, as well as the inherent variability of the material. Among the chemical properties, pH may serve as a simple and direct parameter to estimate the interaction between RCDW and other materials with which it may be used and, consequently, the long-term durability of structures. This study aims to evaluate the influence of particle size distribution on the pH of RCDW processed at a recycling plant. To this, a gravimetric characterization of the material was carried out to identify its main constituents and verify the representativeness of the different components that compose the waste. pH tests were performed on different particle size ranges to investigate the influence of particle size on the pH values of the RCDW. Analyses of the results, as well as their comparison with previous studies, revealed that finer particles exert a greater influence on the chemical behavior of the material, playing a decisive role in the pH values of recycled waste.

KEYWORDS: Grain size analysis, Recycling, Chemical composition, Durability, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é bastante antiga, entretanto ainda apresenta marcantes características artesanais, o que contribui para a elevada geração dos chamados resíduos de construção e demolição – RCD (Santos, 2007). Segundo a ABREMA (2025), no Brasil, aproximadamente 276.359 toneladas/dia de RCD foram coletadas em lugares públicos em 2024, isso representou 100,8 milhões de toneladas em um ano.

Os RCD caracterizam-se por sua natureza intrinsecamente heterogênea, em virtude de serem constituídos por uma ampla gama de materiais provenientes de edificações e obras de infraestrutura, gerados nas etapas de construção, reconstrução, ampliação, reforma, manutenção e demolição (Soibelman, 1993; Di Maria *et al.*, 2018; Rosado *et al*., 2019). Desse modo, sua composição está diretamente associada à diversidade de processos construtivos, técnicas executivas e sistemas empregados no setor da construção civil. Vários estudos (Angulo, 2000; Lai *et al*, 2016; Di Maria *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019) observaram que a composição majoritária do RCD consiste em: i) concreto e argamassa (fragmentos de estruturas e revestimentos), ii) cerâmicos (tijolos, blocos, telhas) e iii) materiais pétreos/naturais (areia, brita, solo).

A reciclagem dos RCD apresenta-se como uma alternativa para diminuir a utilização de matérias-primas e atenuar impactos adversos ao meio ambiente. Nesse contexto, os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), na forma de agregados, podem ser empregados em diversas obras geotécnicas: i) obras de pavimentação (Motta, 2005; Lima, 2008; Barbosa, 2017); ii) aterros sanitários (Affonso, 2005; Dias, 2014); iii) estruturas de drenagem (Roque *et al*., 2022); e iv) estruturas de solo reforçada com geossintéticos (Santos *et al.*, 2013; Vieira *et al.*, 2020).

De acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004), o resíduo é considerado inerte quando nenhum de seus constituintes solubilizados apresentam concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. Entretanto, alguns estudos classificaram os RCD-R como não inertes devido à liberação de substâncias que alteraram o pH e/ou sofrem reações químicas quando em meio aquoso (Townsend *et al*., 1999; Ramos, 2007; Barbudo *et al.*, 2012). Além disso, os RCD-R interagem com outros materiais com os quais venham a ser empregados em conjunto (por exemplo, geossintéticos, asfalto) e, consequentemente, podem interferir na durabilidade das estruturas a longo prazo.

Nesse contexto, para uma aplicação segura desse material, faz-se necessário avaliar as suas propriedades químicas (Lima e Cabral, 2013). Entre as propriedades químicas dos agregados reciclados, o potencial hidrogeniônico (pH) tem sido abordado por diversos autores (Townsend *et al*., 1999; Santos 2007; Lima e Cabral, 2013; Silvestre *et al*., 2020, Chen *et al.* 2024). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é determinar o pH dos RCD-R em diferentes granulometrias.

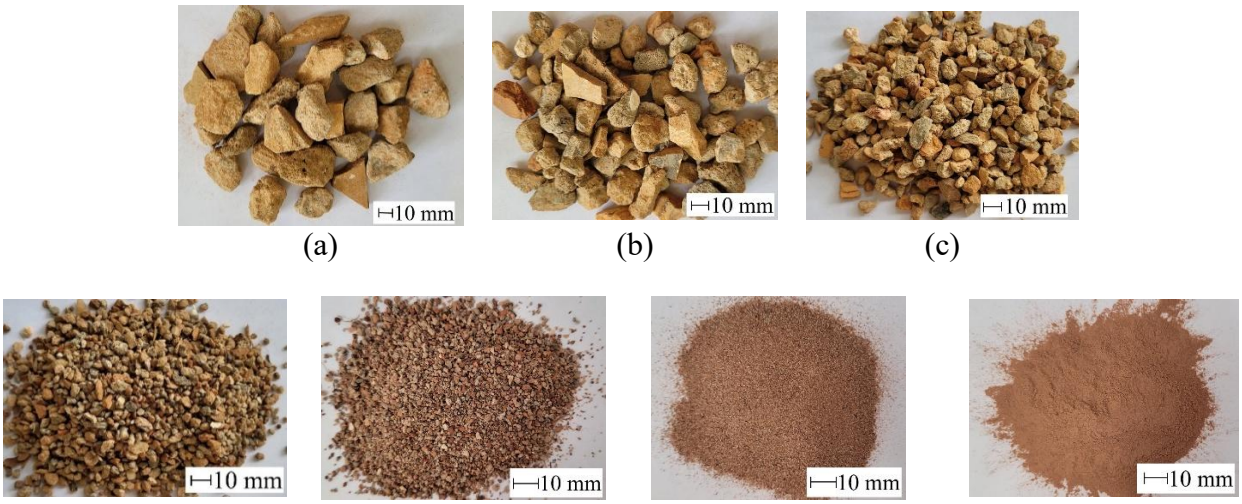
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado um material produzido por uma usina de beneficiamento de RCD, localizada em Senador Canedo-GO (região metropolitana de Goiânia-GO). O material denominado pela empresa como BGS (brita graduada simples) é composto por: brita 2 (25%), brita 1 (25%), brita 0 (25%) e pó de entulho (25%). De acordo com Fleury *et al.* (2017), o BGS é um dos materiais mais requisitados das usinas de reciclagem na região metropolitana de Goiânia-GO.

Foram investigadas 4 (quatro) frações fabricadas pela usina: i) brita 2 (25 mm > d > 19 mm); ii) brita 1 (19 mm < d < 9,5 mm); iii) brita 0 (9,5 mm < d < 4,8 mm); e iv) pó de entulho (d < 4,8 mm). Entretanto, para a realização dessse trabalho, o pó de entulho foi dividido em faixas de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): i) areia grossa (4,8 mm > d > 2,0mm), ii) areia média (2,0 mm > d > 0,42 mm), iii) areia fina (0,42 mm > d > 0,075 mm), e iv) silte e argila (d < 0,075mm). A Figura 1 apresenta imagens dos materiais testados.

Inicialmente, foi realizada a caracterização gravimétrica seguindo o procedimento realizado por Santos (2011). Assim, aproximadamente 10 kg de BGS foi peneirado numa malha de abertura 4,8 mm; em seguida, o material retido foi lavado em água corrente; e, finalmente, com o material seco, foi realizada a separação manual dos diferentes tipos de materiais contidos nessa fração (d > 4,8 mm). O material passante na peneira de abertura 4,8 mm (durante o peneiramento e lavagem) foi classificado como “solo”.

De modo a verificar a influência da granulometria do RCD-R no pH, os materiais das diferentes faixas granulométricas foram solubilizadas por 7 (sete) dias. A obtenção do extrato solubilizado foi realizada seguindo as orientações da NBR 10006/2004. Para a solubilização, foi realizada a preparação, em um recipiente adequado e limpo, de 500 g de material e 500 ml de água destilada. Para cada intervalo granulométrico foram separadas 3 (três) amostras e após o período de solubilização em temperatura ambiente foi utilizado um phmetro de bancada, devidamente calibrado, para a realização da leitura do pH.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f) (g)

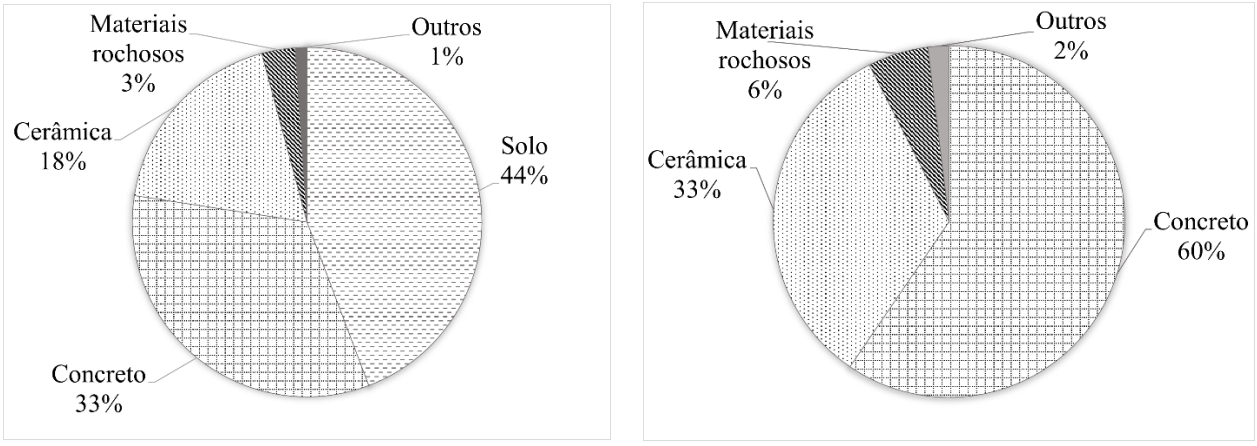
Figura 1. Faixas granulométricas do RCD: a) brita 2 (25 mm > *d* > 19 mm), b) brita 1 (19 mm < *d* < 9,5 mm), c) brita 0 (9,5 mm > *d* > 4,8 mm), d) areia grossa (4,8 mm > *d* > 2,0mm), e) areia média (2,0 mm > *d* > 0,42 mm), f) areia fina (0,42 mm > *d* > 0,075 mm), e g) silte e argila (*d* < 0,075mm).

3 RESULTADOS

3.1 Gravimetria

Por meio do ensaio de gravimetria foi possível identificar que o BGS é composto predominante por "solo" (44%) . Outros materiais observados foram: i) cerâmica, ii) concreto, iii) materiais rochosos e iv) outros (plástico, madeira, papel) – Figura 2a. No entanto, segundo observado por Santos (2007, 2011), mesmo a porção classificada como "solo" – considerando essa a de granulometria inferior a 4,8 mm – ainda é constituída de concreto, cerâmica, tijolo, madeira, plástico, vidro, betume, solo, gesso e outros resíduos de construção.

Considerando apenas as partículas da fração *d* > 4,8 mm, ou seja, eliminando a fração "solo", cerca de 60% das partículas são compostas por concreto e 33% por material cerâmico. De acordo com a NBR 15116 (2021), os agregados reciclados mistos (ARM) são "compostos com menos de 90% em massa de fragmento à base de cimento Portland e rochas", isso classifica esse material como um ARM. Isso, representa que esse material pode ser influenciado quimicamente pelos constituintes dos materiais concretícios e cerâmicos que compõem as amostras.



(a) (b)

Figura 2. Composição gravimétrica: a) BGS e b) Fração do BGS com *d* > 4,8mm.

3.2 Potencial hidrogeniônico - pH

Por meio de uma avaliação visual, verificou-se que essas amostras apresentaram quantidade maior de resíduos concretícios, conforme moostra a Figura 3. Segundo verificado por Ulsen *et al.* (2019), as partículas maiores apresentam maiores quantidades de pasta de cimento aderidos ao grão. Assim, houve um maior contato da superfície cimentícia com a água destilada, o que pode ter influenciado no pH encontrado.



Figura 3. Amostra do RCD-R com d > 2,0mm.

Os resultados dos ensaios de pH revelaram a alcalinidade das britas (d > 4,8 mm), com um valor de pH médio de 9,27 (Figura 4). As partículas com d < 4,8mm apresentaram uma redução dos valores de pH numa relação direta com as dimensões das partículas, apresentando um valor médio de 8,94. Esse resultado pode ser explicado pela redução da presença de partículas concretícias e, consequentemente, a influência desses materiais. Townsend *et al*. (1999), observaram que os resíduos que ficaram solubilizados em um determinado tempo, apresentaram nos 10 primeiros dias: i) pH variando entre 11 e 12, para resíduos concretícios e ii) pH variando entre 7 e 9, para resíduos mistos.

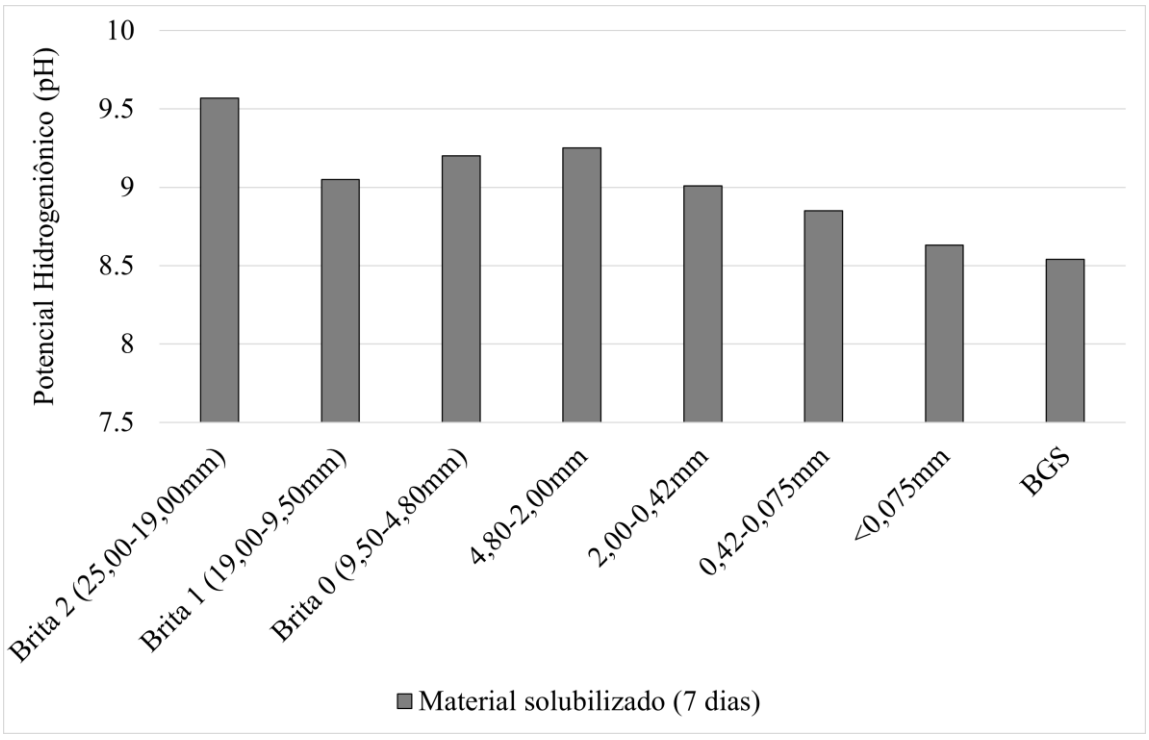


Figura 4. Valores médios do pH das granulometrias analisadas.

Verificou-se que o BGS pode ter sido influenciado pela parcela fina, pois apresentou um pH de 8,54, valor inferior quando comparado ao da parcela $d > 4{,}8$mm (pH médio igual a 9,27). Entretanto, Silvestre *et al.* (2020) observaram que em alguns casos a parcela fina ($d < 2{,}0$ mm) pode apresentar significativa presença dos materiais encontrados nas partículas maiores. Vale ressaltar que, como não houve uma variação expressiva entre o pH das diferentes faixas granulométricas, pode-se afirmar que o processo de reciclagem (britagem + peneiramento) na usina não segrega materiais de uma dada natureza.

O solo típico da região do Cerrado caracteriza-se por apresentar pH ácido, com valor médio em torno de 5,0 (Lopes, 1984). Na fração mais fina do BGS, pode haver a presença de solo da região, o que pode contribuir para a redução do pH quando comparado à fração puramente granular que compõe o material.

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos por meio da análise gravimétrica e de pH, é possível destacar que:

- O pH para as diferentes faixas granulométricas apresentaram pequena variação, o que demonstra certa homogeneidade desses resíduos durante o beneficiamento na usina;
- As amostras de RCD-R mostraram-se constituídas principalmente por partículas cimentícias (concreto e argamassa), o que contribuiu para os valores de pH alcalinos encontrados;
- A presença de materiais de solo na parcela fina da amostra de RCD-R pode ter contribuído para que não apresentasse valores de pH de alta alcalinidade.

Conclui-se que, apesar da distinção apresentada nos intervalos granulométricos, o material disponível na usina de beneficiamento não apresentou um pH que inviabilize o seu emprego em obras geotécnicas. Contudo, essa constatação pode ser importante para especificação de outros materiais com os quais os RCD-R venham a ser usados em contato e/ou associados, de modo que possam ser aplicados de maneira adequada e segura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo apoio para desenvolvimento da pesquisa. Os autores também agradecem a parceria da empresa EcoEntulho, pelo fornecimento do resíduo reciclado e apoio logístico para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affonso, F. J. A. (2005). *Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 161 p.

Angulo, S. C. (2000). *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.* Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 155 p.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente – ABREMA (2025*). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2025*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10006. *Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 15116. *Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios*. Rio de Janeiro.

Barbosa, K. R. M. (2017). *Degradação de geogrelhas em estradas não pavimentadas executadas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R).* Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, 121 p.

Barbudo, A.; Galvín, A. P.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Jiménez, J. R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management*, 32. p.1229-1335.

Chen, B.; Huang, T.; Geng, X.; Zhou, T.; Zhao, Y. (2024). Highly efficient activation of peroxymonosulfate by calcinated construction & demolition waste powder with free radical generation for organic pollutant degradation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 159.

Di Maria, A.; Eyckmans, J.; Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, 75, p.3-21.

Dias, M. C. C. (2014). *Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário.* 2014. 111 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 111 p.

Fleury, M. P.; Siqueira Neto, N.; Santos, E. C. G. (2017). Reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) na região metropolitana de Goiânia-GO. In: IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste, Goiânia. *Anais*...GEOCENTRO.

Lai, Y.-Y.; Yeh, L.-H.; Chen, P.-F.; Sung, P.-H.; Lee, Y.-M. (2016). Management and Recycling of Construction Waste in Taiwan. *Procedia Environmental Sciences*, 35, p. 723–730.

Lima, J. H. C. (2008). *Utilização de Resíduos de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 162 p.

Lima, A. S.; Cabral, A. E. B. (2013) Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Eng. Sanit. Ambient*., 18 (2), p.169-176.

Lopes, A.S. (1984). *Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo.* 2 ed. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 162p.

Motta, R. S. (2005). *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.* Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica / USP, 134 p.

Ramos, B. F. (2007). *Indicadores De Qualidade Dos Resíduos Da Construção Civil Do Município De Vitória-ES.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

Roque, A.J.; Silva, P.F.; Almeida, R.P.M. (2022). Recycling of crushed concrete and steel slag in drainage structures of geotechnical works and road pavements. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, p. 2385–2400.

Rosado, L. P.; Vitale, P.; Penteado, C. S. G.; Arena, U. (2019). Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste Management*, 85, p. 477–489.

Santos, E. C. G. (2007). *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.* 2007. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 168 p.

Santos, E. C. G. (2011). *Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino.* 2011.Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 214 p.

Santos, E. C. G.; Palmeira, E. M.; Bathurst, R. J. (2013). Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 39, p. 9–19.

Silvestre, G. R.; Oliveira, P. F. S.; Domiciano, M. L.; Santos, E. C. G. (2020) Influência da parcela fina no pH de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e de escavação. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. *Anais...* COBRAMSEG.

Soibelman, L. (1993). *As perdas de materiais na construção de edifícios: sua incidência e controle.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 127 p.

Townsend, T. G.; Jang, Y.; Thurn, L. G. (1999). Simulation of Construction and Demolition Waste Leachate. *Journal of Enviromental Engineering*.

Ulsen, C.; Tseng, E.; Angulo, S. C.; Landmann, M.; Contessotto, R.; Baldo, J. T.; Kahn, H. (2019). Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1), p. 494-502.

Vieira, C.S.; Pereira, P.; Ferreira, F.; Lopes, M. D. L. (2020). Pullout Behaviour of Geogrids Embedded in a Recycled Construction and Demolition Material. Effects of Specimen Size and Displacement Rate. *Sustainability*, 12 (9).

Wu, H.; Zuo, J.; Zillante, G.; Wang, J.; Yuan, H. (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240.

Wu, H.; Zuo, J.; Zillante, G.; Wang, J.; Yuan, H. (2019) Status quo and future directions of construction and demolition waste research: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/102

Influência do licor negro kraft e do cimento CP II-F-32 na resistência à compressão de um solo argiloso compactado

Bruno Pereira de Queiroz
Doutorando, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, bruno.queiroz@ufv.br

Rejane Nascentes
Professora, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Yuri Marques Portella
Aluno de graduação, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, yuri.portella@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Professor, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

RESUMO: Solos compactados são amplamente empregados como barreiras em sistemas de disposição de resíduos, porém podem apresentar limitações mecânicas sob variações de umidade e carregamento. Este estudo avaliou o efeito da adição de licor negro kraft e cimento CP II-F-32 na resistência à compressão não confinada de um solo argiloso compactado, considerando diferentes condições de moldagem e cura. As misturas foram preparadas com licor negro na água de compactação (100 e 200 mgNa/kg de solo seco), com e sem 2% de cimento, e moldadas com graus de compactação entre 95 e 100%. Os corpos de prova foram curados por 7 e 28 dias. Os resultados indicaram aumento significativo da resistência com a adição do licor, sobretudo para 100 mgNa e quando associado ao cimento. No ramo seco e grau de compactação de 100%, a mistura com 100 mgNa atingiu 498 e 598 kPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, enquanto a combinação licor-cimento alcançou 553 e 692 kPa. A redução do grau de compactação resultou em decréscimos proporcionais de resistência, embora as misturas mantivessem desempenho superior ao solo. O ganho mecânico foi associado ao aumento da massa específica seca máxima e à redução da umidade ótima, relacionados à dispersão promovida pelo Na^+ e à reorganização microestrutural, parcialmente atenuada pelo Ca^{2+} do cimento. A resposta mecânica mostrou dependência direta da umidade de moldagem e do grau de compactação.

PALAVRAS-CHAVE: Licor negro kraft, Resistência à compressão não confinada, Estabilização química de solo, Compactação, Materiais de barreira.

ABSTRACT: Compacted soils are widely used as barriers in waste disposal systems. However, their mechanical performance may be affected by variations in moisture and loading conditions. This study evaluated the effect of adding kraft black liquor and CP II-F-32 cement on the unconfined compressive strength of a compacted clayey soil, considering different molding and curing conditions. The mixtures were prepared by incorporating black liquor into the compaction water (100 and 200 mgNa/kg of dry soil), with and without 2% cement, and molded at degrees of compaction ranging from 95% to 100%. Specimens were cured for 7 and 28 days. The results showed a significant increase in strength with the addition of black liquor, particularly at 100 mgNa and when combined with cement. In the dry side of the compaction curve at 100% degree of compaction, the mixture containing 100 mgNa reached 498 and 598 kPa at 7 and 28 days, respectively, whereas the black liquor-cement combination achieved 553 and 692 kPa. Reductions in the degree of compaction led to proportional decreases in strength, although the mixtures consistently outperformed the compacted soil. The mechanical improvement was associated with increases in maximum dry unit weight and reductions in optimum moisture content, related to Na^+ induced clay dispersion and microstructural rearrangement, partially mitigated by Ca^{2+} from cement. Mechanical response showed direct dependence on molding moisture and degree of compaction.

KEYWORDS: Kraft black liquor, Unconfined compressive strength, Chemical soil stabilization, Compaction, Barrier materials.

1 INTRODUÇÃO

Barreiras de solo compactado são amplamente utilizadas em sistemas de contenção de resíduos, como camadas de base em aterros sanitários, devido à sua capacidade de reduzir a infiltração de água e limitar a migração de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas (Musso et al., 2010). O desempenho dessas barreiras depende diretamente das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo utilizado, que devem garantir a integridade e a durabilidade do sistema de contenção ao longo do tempo. Quando o solo disponível não atende a esses requisitos, técnicas de estabilização podem ser empregadas para melhorar seu comportamento. Entre as técnicas disponíveis, a estabilização química tem sido amplamente utilizada para modificar o comportamento do solo, baseando-se na interação entre aditivos e os minerais presentes, sendo capaz de alterar propriedades como resistência, permeabilidade e durabilidade (Kumar et al., 2018; Barman; Dash, 2022).

Compostos alcalinos contendo sódio têm demonstrado potencial para alterar a estrutura de solos argilosos. A dissociação de NaOH em solução libera íons Na^+ e OH^- que podem interagir com a sílica e a alumina presentes no solo e promover mudanças em suas propriedades físicas e mecânicas (Kumar et al., 2018). Entre os materiais que contêm compostos alcalinos de sódio, destaca-se o licor negro kraft, um subproduto alcalino gerado na indústria de celulose com potencial de aplicação em misturas solo-estabilizante. O licor negro kraft contém compostos inorgânicos, incluindo hidróxido de sódio (NaOH), sulfeto de sódio (Na_2S), carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfato de sódio (Na_2SO_4), tiossulfato de sódio ($Na_2S_2O_3$) e cloreto de sódio (NaCl) (Gustafsson et al., 2011), capazes de se dissociar em solução e liberar Na^+, o qual pode interagir com partículas de argila e pode modificar o arranjo estrutural do solo (Queiroz et al., 2025). A presença de soda residual e o caráter fortemente alcalino do licor negro kraft podem, portanto, promover efeitos semelhantes aos observados em soluções contendo NaOH, contribuindo para alterações na estrutura e no comportamento mecânico de solos argilosos.

Estudos recentes também têm investigado o uso de misturas solo-licor negro em sistemas de barreiras de baixa permeabilidade para disposição de resíduos, com foco na avaliação da condutividade hidráulica. Resultados experimentais indicam que a adição de licor negro kraft pode reduzir a permeabilidade de solos argilosos compactados e favorecer a estabilidade hidráulica das misturas ao longo do tempo, especialmente quando associada ao cimento CP II-F-32 (Queiroz et al., 2025). Entretanto, ainda são escassos os estudos que investigam o comportamento mecânico dessas misturas, particularmente no que se refere à resistência.

Este estudo avaliou o efeito do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento CP II-F-32 na resistência à compressão não confinada de um solo argiloso compactado, considerando diferentes condições de moldagem e tempos de cura de 7 e 28 dias, a fim de analisar o potencial dessas misturas como alternativa de estabilização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo, estabilizantes químicos e misturas

O solo analisado neste estudo é um solo residual maduro derivado de gnaisse, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo (horizonte B. As amostras deformadas foram coletadas no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), estado de Minas Gerais, Brasil, em um talude de corte localizado nas coordenadas geográficas 20º45'08.7" S e 42º51'30.4" W.

Os estabilizantes químicos empregados foram o licor negro kraft de madeira de pinus e o cimento Portland composto com fíler calcário (CP II-F-32). O licor negro, proveniente de estudos realizados no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM) da Universidade Federal de Santa Maria (RS), teve sua composição química determinada por espectrofotometria de absorção atômica (Agilent Technologies, modelo 240FS), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do licor negro Kraft

[Na]	[K]	[Mg]	[Ca]	[Mn]	[Fe]	[Cu]	[Zn]	[Al]	[Si]	ρ	pH
				mg/L						g/cm³	
19724	153	5,3	12	12	13	0,43	0,68	39	42	1,062	13,48

[Na], [K], [Mg], [Ca], [Mn], [Fe], [Cu], [Zn], [Al], [Si] – Concentração de sódio, potássio, magnésio, cálcio, manganês, ferro, cobre, zinco, alumínio e silício; ρ – massa específica.

O cimento CP II-F-32 foi selecionado por sua disponibilidade comercial e pelo potencial influência na resistência à compressão não confinada das misturas de solo. Sua caracterização química, apresentada na Tabela 2, foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro Rigaku Primus II, com amostras preparadas na forma de pastilhas fundidas. O teor de óxido de cálcio livre foi determinado pelo método do etilenoglicol, conforme a norma NBR 17086-10 (ABNT, 2023).

Tabela 2. Caracterização química do cimento CP II-F-32

H_2O	PF	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	MnO	Fe_2O_3	SrO	CaO-l
% em massa													
2,82	15,60	1,31	4,15	15,10	0,34	0,74	0,10	0,83	55,20	0,21	2,07	0,30	0,18

PF – perda ao fogo; CaO-l – óxido de cálcio livre.

Foram produzidas quatro misturas: solo com adições de licor negro correspondentes a 100 e 200 mgNa/kg de solo seco, equivalentes a aproximadamente 0,5% e 1,1% em massa de licor, respectivamente, em relação à massa seca do solo; e solo com as mesmas dosagens de licor negro kraft combinadas com 2% de cimento CP II-F-32, também referido à massa seca do solo.

2.2 Caracterização geotécnica e ensaios de compactação

A caracterização geotécnica do solo seguiu recomendações da ABNT, incluindo a determinação da massa específica dos sólidos (ABNT, 2025a), determinação dos limites de liquidez e plasticidade (ABNT, 2025b; 2025c), análise granulométrica (ABNT, 2025d), e ensaios de compressão não confinada, realizados tanto no solo quanto nas misturas. A compactação do solo e das misturas foi conduzida conforme as normas brasileiras para compactação de solos (ABNT, 2025e) e de misturas solo-cimento (ABNT, 2012), utilizando energia padrão Proctor.

Para o preparo das misturas, o licor negro foi adicionado por inclusão na água de compactação. As amostras foram mantidas em cura por 24 horas, posteriormente passadas em peneira com abertura de 4,75 mm para destorroamento e, em seguida, submetidas ao ensaio de compactação. O período de cura teve como objetivo uniformizar o teor de umidade e favorecer as reações de troca catiônica entre o solo e o licor negro, responsáveis por alterar a densidade de carga elétrica na superfície das partículas de argila e promover sua dispersão.

O preparo das misturas solo-licor-cimento seguiu procedimento semelhante. Após a adição do licor negro e o período de cura de 24 horas, o cimento foi incorporado. Um intervalo adicional de aproximadamente uma hora foi respeitado antes da compactação, para permitir o início do processo de pega do cimento. Em seguida, as amostras foram passadas novamente na peneira de 4,75 mm e submetidas à compactação. O tempo total entre a finalização da mistura e a compactação final dos corpos de prova não excedeu uma hora e meia, garantindo que o cimento permanecesse em condições adequadas de pega durante o processo.

2.3 Ensaios de compressão não confinada

Os corpos de prova foram moldados tomando como referência os parâmetros de umidade ótima ($w_{ót}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) obtidos nos ensaios de compactação. Foram adotados desvios de umidade entre -1% e +2% em relação ao valor ótimo, e graus de compactação correspondentes a 95%, 98% e 100% de $\rho_{d,máx}$. A moldagem foi realizada em cilindro Proctor, sob energia estática, de modo a garantir a homogeneidade e a reprodutibilidade dos corpos de prova.

Após a moldagem, os corpos de prova foram curados por 7 e 28 dias em câmara úmida, mantendo-se condições controladas de temperatura e umidade, a fim de favorecer os processos de hidratação e as reações de troca catiônica entre o solo, o licor negro e o cimento.

Os ensaios de compressão não confinada foram executados em prensa modelo Tritech, com capacidade de 100 kN, da Wykeham Farrance International, equipada com anel dinamométrico de 1000 kgf. A velocidade de deformação axial foi mantida constante e igual a 1% por minuto, respeitando o intervalo sugerido pela NBR 12770 (ABNT, 2022) e assegurando tempo de ruptura inferior a 15 minutos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica e a classificação do solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), são apresentadas na Tabela 3. O solo é predominantemente argiloso e classificado como argila de alta plasticidade (CH). A distribuição granulométrica, também apresentada na Tabela 3, segue as recomendações da norma NBR 6502 (ABNT, 2022).

Tabela 3. Caracterização geotécnica e classificação do solo.

ρ_s	Análise granulométrica (%)				Limites de Atterberg (%)			USCS
(g/cm³)	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	w_L	w_P	*IP*	
2,776	65,0	10,8	24,0	0,2	91	31	60	CH

ρ_s – massa específica dos sólidos; w_L – limite de liquidez; w_P – limite de plasticidade; *IP* – índice de plasticidade; USCS – *Unified Soil Classification System*; CH – argila inorgânica de alta plasticidade.

3.1 Ensaios de compactação

As curvas de compactação do solo e das misturas com adições de licor negro kraft correspondentes a 100 e 200 mg Na/kg de solo seco, assim como das misturas combinadas dessas mesmas dosagens de licor negro com 2% de cimento CP II-F-32, são apresentadas na Figura 1. Os parâmetros ótimos de compactação teor de umidade ótimo ($w_{ót}$), massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) e índice de vazios mínimo ($e_{mín}$), bem como o coeficiente de determinação (R^2) e as equações quadráticas ajustadas às curvas de compactação, estão listados na Tabela 4. As curvas de compactação foram ajustadas por regressão polinomial de segundo grau, na forma: $\rho_d = a{\cdot}w^2 + b{\cdot}w + c$ em que ρ_d é a massa específica seca e w é o teor de umidade do solo.

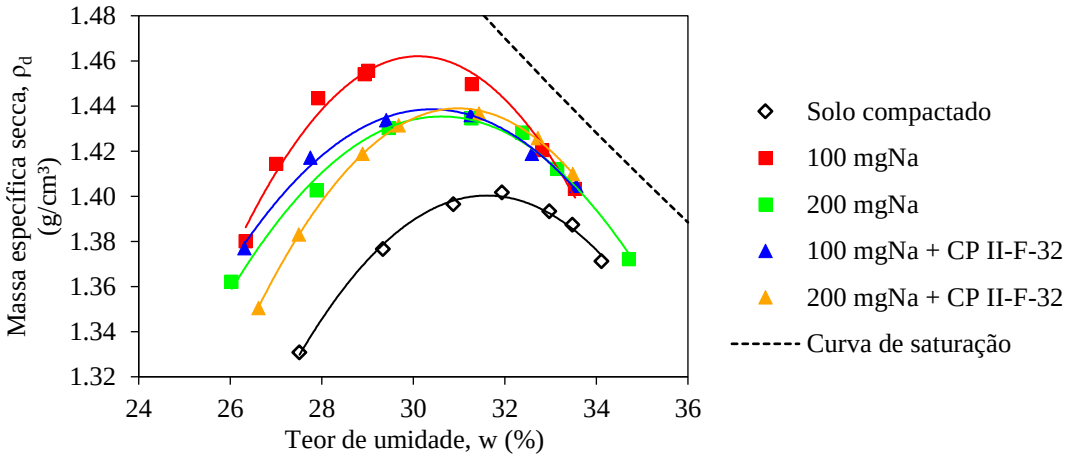


Figura 1. Curvas de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Tabela 4. Parâmetros ótimos de compactação do solo e das misturas solo-licor e solo-licor-cimento

Mistura	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm³)	e_{min}	Equação de regressão quadrática ($\rho_d = a{\cdot}w^2 + b{\cdot}w + c$)	R^2 (%)
Solo compactado	31,6	1,400	0,982	ρ_d = -0,0042w^2 + 0,2662w -2,8065	99,3
100 mgNa	30,1	1,462	0,899	ρ_d = -0,0053w^2 + 0,3213w -3,3746	97,3
100 mgNa + CP II-F-32	30,4	1,439	0,930	ρ_d = -0,0036w^2 + 0,2171w -1,8611	98,8
200 mgNa	30,6	1,435	0,934	ρ_d = -0,0036w^2 c+ 0,2226w -1,9723	98,7
200 mgNa + CP II-F-32	31,0	1,439	0,929	ρ_d = -0,0046w^2 + 0,2862w -2,9951	100,0

A análise da Figura 1 e da Tabela 4 indica que a adição de licor negro kraft de madeira de pinus promoveu redução do teor de umidade ótima e aumento da massa específica aparente seca máxima do solo.

Enquanto o solo apresentou $w_{ót}$ de 31,6% e $\rho_{d,máx}$ de 1,400 g/cm³, a mistura com 100 mgNa apresentou redução do teor de umidade ótima para 30,1% e aumento da massa específica seca máxima para 1,462 g/cm³. Para a concentração de 200 mgNa, observou-se teor de umidade ótima de 30,6% e massa específica aparente seca máxima de 1,435 g/cm³, ainda superior à do solo compactado, sugerindo que ganhos adicionais de compactação tendem a ser limitados em maiores concentrações de licor.

Esse comportamento pode ser atribuído às reações de troca catiônica entre o solo e o licor negro, nas quais o Na^+ liberado pela dissociação dos sais de sódio presentes no licor negro passa a dominar a solução do solo, aumentando o potencial de superfície e a espessura da dupla camada das partículas de argila, intensificando as forças repulsivas entre as partículas de argila e favorecendo a formação da estrutura dispersa (Queiroz et al., 2025). As condições alcalinas impostas pelo licor também contribuem para esse processo, ao elevar a carga negativa líquida das partículas de caulinita, favorecendo a repulsão eletrostática e a dispersão (Chorom; Rengasamy, 1995).

A incorporação de 2% de cimento CP II-F-32 às misturas contendo licor negro, proporcionou um leve aumento no teor de umidade ótima em relação às misturas correspondentes sem cimento, provavelmente associado à demanda adicional de água pelas reações de hidratação. A massa específica aparente seca máxima manteve-se em torno de 1,439 g/cm³ para as misturas com cimento CP II-F-32, sugerindo que a presença do cimento tende a contrabalançar os efeitos dispersivos promovidos pelo licor negro na estrutura do solo. O Ca^{2+} disponibilizado pelo CP II-F-32 compete com o Na^+ pelos sítios de troca, reduzindo parcialmente a expansão da dupla camada difusa e limitando incrementos significativos na massa específica seca máxima, especialmente na mistura com menor teor de licor (100 mgNa).

3.2 Ensaios de compressão não confinada

Os resultados dos ensaios de compressão não confinada realizados no solo natural e nas misturas com adições de licor negro kraft correspondentes a 100 e 200 mg Na/kg de solo seco, bem como nas misturas combinadas dessas mesmas dosagens de licor negro com 2% de cimento CP II-F-32, são apresentados na Tabela 5, para tempos de cura de 7 e 28 dias. A tabela reúne os valores médios da resistência à compressão não confinada ($\bar{q}_u$), os coeficientes de variação (CV), as deformações axiais específicas médias ($\bar{\varepsilon}$), os teores de umidade na ruptura ($\bar{w}_{rup}$) e os desvios médios de umidade em relação à umidade ótima ($\overline{\Delta w}$), considerando graus de compactação (GC) de 95%, 98% e 100% (coeficientes de variação superiores a 10% encontram-se destacados em negrito).

Os resultados apresentados na Tabela 5 indicam, de modo geral, maior resistência à compressão não confinada das misturas solo-licor e solo-licor-cimento em comparação ao solo compactado, para ambos os períodos de cura e diferentes condições de moldagem, evidenciando o efeito benéfico da adição do licor e, sobretudo, do cimento. Para fins de análise comparativa, os resultados foram avaliados conforme faixas equivalentes de desvio médio de teor de umidade em relação à umidade ótima (Δw), sendo considerados como ramo seco os corpos de prova com $\Delta w < -0{,}3$, como entorno da umidade ótima aqueles com $-0{,}3 \leq \Delta w \leq 0{,}3$, e como ramo úmido os espécimes com $\Delta w > 0{,}3$. Esse critério foi adotado de modo a permitir comparações consistentes entre o solo e as misturas sob condições semelhantes de moldagem.

Os corpos de prova de solo compactado moldados no ramo seco apresentaram os maiores ganhos de resistência ao longo do período de cura, independentemente dos parâmetros de moldagem. O solo compactado a 100% do grau de compactação no ramo seco apresentou aumento de resistência de aproximadamente 21% entre 7 e 28 dias (de 297 para 357 kPa). Entretanto, aos 7 dias, a resistência obtida no ramo seco (297 kPa) foi inferior à observada para o ramo úmido na mesma condição de compactação (324 kPa), indicando desempenho inicial mais favorável das amostras moldadas no ramo úmido.

Por sua vez, no ramo úmido (GC = 100%), verificou-se redução da ordem de 2% da resistência entre 7 e 28 dias. Esse comportamento tende a indicar estabilidade da resistência ao longo do período, uma vez que essa variação pode estar associada ao elevado coeficiente de variação registrado (11,4%), não sendo, portanto, representativa de uma perda de resistência mecânica efetiva.

Os corpos de prova com adição de 100 mgNa moldados com GC = 100% apresentaram incrementos de resistência da ordem de 68% aos 7 dias (498 kPa, ramo seco) e 67% aos 28 dias (598 kPa, umidade ótima), em relação ao solo compactado. Em contraste, a dosagem de 200 mgNa resultou em acréscimos mais modestos, da ordem de 37% aos 7 dias (365 kPa, umidade ótima) e 18% aos 28 dias (422 kPa, ramo seco). As misturas

Tabela 5. Resistência à compressão não confinada e parâmetros médios de deformação e umidade das misturas após 7 e 28 dias

Cura		7 dias					28 dias				
Mistura	GC	$\overline{\Delta w}$	$\overline{w}_{rup}$	$\bar{q}_u$	CV	$\bar{\varepsilon}$	$\overline{\Delta w}$	$\overline{w}_{rup}$	$\bar{q}_u$	CV	$\bar{\varepsilon}$
	%	%	%	kPa	%	%	%	%	kPa	%	%
Solo compactado	100	0,6	32,2	324	3,2	4,1	0,3	31,9	316	**11,4**	3,4
	100	-0,8	30,8	297	3,9	3,4	-1,1	30,5	357	3,8	3,4
	100	0,3	31,9	266	3,5	3,6	0,1	31,7	282	2,0	3,4
	98	1,1	32,8	230	4,9	3,1	0,4	32,0	268	5,7	3,7
	98	-1,0	30,7	241	2,2	2,7	-1,1	30,5	291	5,1	2,8
	98	0,1	31,7	261	6,5	3,2	0,1	31,7	279	4,6	3,0
	95	0,5	32,1	227	2,7	2,4	0,5	32,1	216	9,2	2,4
	95	-0,9	30,7	184	**15,0**	2,3	-1,0	30,7	244	3,8	2,3
100 mgNa	100	-0,9	29,2	498	1,3	3,7	-0,2	29,9	598	5,2	3,6
	98	-0,1	30,0	405	5,3	3,5	-0,6	29,5	507	2,4	3,5
	95	-0,1	30,0	318	7,0	2,6	-0,2	29,8	394	4,4	3,1
100 mgNa + CP II-F-32	100	-0,6	29,8	553	2,8	2,3	-0,9	29,5	692	2,6	2,0
	98	0,2	30,6	484	4,7	1,9	-0,6	29,8	543	5,4	1,8
	95	-0,6	29,8	370	3,5	1,8	-0,6	29,8	426	4,1	1,7
200 mgNa	100	0,5	31,1	365	5,0	4,1	-0,6	30,0	422	3,0	4,0
	98	-0,8	29,8	360	1,4	3,2	-1,3	29,3	419	3,1	3,0
	95	-1,1	29,6	319	2,9	2,5	-1,3	29,3	367	4,9	2,8
200 mgNa + CP II-F-32	100	-0,7	30,3	526	4,9	2,9	-1,7	29,3	629	4,2	2,2
	98	-0,8	30,2	432	5,2	2,4	-1,5	29,5	575	4,9	2,0
	95	-0,7	30,3	349	3,7	1,9	-0,6	30,3	477	3,4	2,0

$\bar{q}_u$ – resistência média à compressão não confinada; CV – coeficiente de variação; $\bar{\varepsilon}$ – deformação axial específica média; $\overline{w}_{rup}$ – teor médio de umidade na ruptura; $\overline{\Delta w}$ – desvio médio do teor de umidade em relação à umidade ótima.

solo-licor apresentaram aumento da resistência entre 7 e 28 dias, com destaque para a mistura com 100 mgNa, que exibiu acréscimo aproximado de 20% ao longo do período de cura. Esses resultados indicam maior eficiência mecânica da menor dosagem de Na, sugerindo que dosagens mais elevadas de licor não necessariamente conferem ganhos proporcionais de resistência.

Os corpos de prova das misturas solo-licor-cimento moldados com *GC* = 100% apresentaram os maiores incrementos de resistência em relação ao solo compactado, alcançando acréscimos da ordem de 87% aos 7 dias (553 kPa, ramo seco) e 94% aos 28 dias (692 kPa, ramo seco) para a dosagem de 100 mgNa e cimento CP II-F-32. Para a dosagem de 200 mgNa e cimento CP II-F-32, os ganhos foram semelhantes, porém inferiores, entre 76 e 78% aos 7 dias (526 kPa, ramo seco) e aos 28 dias (629 kPa, ramo seco). Observou-se ainda aumento sistemático da resistência entre 7 e 28 dias para ambas as misturas solo-licor-cimento, com destaque novamente para a dosagem de 100 mgNa e cimento CP II-F-32, que apresentou acréscimo aproximado de 25% ao longo do período de cura. Contudo, para menores graus de compactação (*GC* = 98% e 95%), verificou-se inversão dessa tendência, com as misturas contendo 200 mgNa associadas ao cimento apresentando resistências superiores às correspondentes com 100 mgNa, indicando maior dependência da dosagem mais elevada de licor em relação ao grau de compactação no desenvolvimento da resistência.

A análise comparativa dos resultados indica que a adição de licor negro kraft promoveu aumento consistente da resistência à compressão não confinada em relação ao solo compactado, efeito que se tornou mais pronunciado com a incorporação de cimento CP II-F-32. De modo geral, as misturas solo-licor-cimento apresentaram o melhor desempenho mecânico, com destaque para a dosagem de 100 mgNa associada ao cimento, que resultou nos maiores valores de resistência e nos maiores incrementos entre 7 e 28 dias de cura, especialmente para corpos de prova moldados no ramo seco e com *GC* = 100%. As misturas solo-licor também apresentaram aumento de resistência em relação ao solo compactado, sendo a dosagem de 100 mgNa superior

à de 200 mgNa, o que indica maior eficiência mecânica da menor dosagem de sódio na ausência de cimento. Por fim, o solo compactado apresentou os menores valores de resistência entre os tratamentos avaliados, embora tenha demonstrado incremento moderado ao longo do período de cura, particularmente para corpos de prova moldados no ramo seco.

Queiroz (2021), ao avaliar misturas solo-licor e solo-licor-cimento produzidas com o mesmo solo e dosagens semelhantes de Na^+ (110 e 190 mgNa/kg de solo seco), observou redução da resistência à compressão não confinada. Esse comportamento contrasta com os resultados do presente estudo e pode estar associado às diferenças na composição química do licor negro empregado. O contraste entre os resultados sugere que, além da concentração de sódio, outras características do licor, como pH e a relação Na^+/Ca^{2+}, exercem papel relevante na resposta mecânica das misturas.

Quanto às deformações específicas médias ($\bar{\varepsilon}$), constatou-se tendência de redução com a diminuição do grau de compactação para o solo compactado e as misturas solo-licor, enquanto esse comportamento se mostrou menos pronunciado nas misturas contendo cimento. De modo geral, as maiores deformações foram registradas no solo compactado, seguidas pelas misturas solo-licor, enquanto as menores ocorreram nas misturas solo-licor-cimento, evidenciando o aumento de rigidez promovido pela adição de cimento. Queiroz (2021) observou $\bar{\varepsilon}$ significativamente superiores nas misturas solo-licor em relação ao solo compactado, variando entre 9,2 a 13,3%, enquanto as misturas contendo cimento apresentaram deformações substancialmente menores. Em comparação, os valores obtidos no presente estudo indicam efeito menos pronunciado do licor sobre a deformabilidade, sugerindo diferenças na atuação do licor empregado sobre a plasticidade das misturas. Queiroz (2021) associou esse comportamento à redução do coeficiente de adensamento com o aumento da dosagem de licor, fenômeno geralmente relacionado ao incremento do limite de liquidez (Das, 2011), embora os limites de consistência não tenham sido determinados naquele estudo.

4 CONCLUSÃO

A incorporação de licor negro kraft, isoladamente ou associada ao cimento CP II-F-32, promoveu incrementos consistentes na resistência à compressão não confinada do solo compactado, com maior eficiência observada para a dosagem de 100 mgNa, especialmente quando combinada ao cimento. De modo geral, mesmo com a redução do grau de compactação, as misturas solo-licor e solo-licor-cimento mantiveram resistência superior ao solo compactado, evidenciando a contribuição do licor negro para o ganho mecânico do material. A resposta mecânica mostrou-se diretamente dependente do desvio de umidade em relação à umidade ótima e do grau de compactação, com maiores ganhos associados às amostras moldadas no ramo seco e sob maiores níveis de compactação. A adição simultânea de cimento intensificou esse comportamento, promovendo aumentos adicionais de resistência e redução das deformações específicas médias, indicando maior rigidez do material. Esses resultados sugerem que a interação entre o Na^+ proveniente do licor negro e o Ca^{2+} do cimento, aliada à reorganização microestrutural durante a compactação, desempenha papel relevante no desenvolvimento da resistência, destacando o potencial dessas misturas para aplicações em camadas de barreira e obras geotécnicas que demandem melhoria do desempenho mecânico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 12023. *Solo-cimento – Método de ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 12770. *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada* – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 7182. *Solos e rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 17086-10. *Cimento Portland – Análise química*: Parte 10: Determinação de óxido de cálcio livre por etilenoglicol. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025a). NBR 17212. *Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025b). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025c). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025d). NBR 7181. *Solos – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025e). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Barman, D., Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319–1342.

Chorom, M., Rengasamy, P. (1995) Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4), p.657-665.

Das, B. M. (2011) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 623 p.

Gustafsson, J. et al. (2011) Pulping. In Fardim, P. (ed) *Chemical Pulping* Part 1: Fibre Chemistry and Technology (2nd ed), Vol. 6, Chapter 2. Paperi ja Puu Oy, p.187–381.

Kumar, M., Singh, J. P., Mishra, M. K. (2018) An Experimental Study of Soil Stabilisation Using Sodium Hydroxide Additive. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 3 (5), p.7–11.

Queiroz, B. P. (2021) *Efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo de alta compressibilidade*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 136 p.

Queiroz, B. P. et al. (2025) Hydraulic conductivity of compressible clayey soil stabilized with kraft black liquor and composite cement. *Environmental Earth Sciences*, 84, 47.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/103

Integração de Geotecnologias para Identificação de Vulnerabilidade Geotécnica em Encostas Urbanas

Dayrla Mayrla Mendes de Paiva
Estudante, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, dmmp@poli.br

Ester da Silva Mangueira
Estudante, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, esm@poli.br

Maria Eduarda Barbosa Fabrício
Estudante, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, mebf3@poli.br

Kalinny Patrícia Vaz Lafayette
Docente de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, klafayette@poli.br

Jonas da Silva Bezerra
Docente de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, jonas.bezerra@poli.br

RESUMO: A ocupação desordenada do solo urbano, somada à falta de fiscalização e políticas públicas eficazes, intensifica os impactos em áreas suscetíveis a deslizamentos, sobretudo em encostas. O desmatamento, a sobrecarga do solo e as chuvas intensas ampliam os riscos, tornando essencial compreender os fatores que influenciam os movimentos de massa para subsidiar medidas preventivas. Nesse contexto, o geoprocessamento surge como ferramenta estratégica no planejamento urbano, permitindo identificar áreas prioritárias e apoiar decisões técnicas e políticas. A pesquisa foi realizada no bairro de Dois Unidos, localizado na Região Político-Administrativa 2 (RPA 2), em Recife/PE, com o objetivo de elaborar mapas temáticos para avaliar a vulnerabilidade geotécnica. A metodologia integrou análise da declividade do terreno e do uso e cobertura da terra, utilizando técnicas de geoprocessamento. Os dados foram processados em ambiente SIG, no software QGIS (versão 3.32), com suporte da linguagem Python, garantindo precisão e automação. Adotou-se o sistema de coordenadas UTM, fuso 25S, baseado no SIRGAS 2000. Os resultados mostraram que as maiores declividades se concentram nas porções norte e oeste da RPA 2, predominando terrenos ondulados (8% a 20%), o que aumenta a vulnerabilidade a movimentos de massa. A análise de uso da terra revelou predominância de áreas urbanizadas, intensificando a instabilidade do solo. Logo, conclui-se que o uso de geotecnologias é fundamental para identificar áreas de risco e apoiar estratégias de mitigação socioambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnologias, Vulnerabilidade Geotécnica, Declividade, Uso e Cobertura da Terra, Movimentos de Massa.

ABSTRACT: The disorganized occupation of urban land, coupled with a lack of oversight and effective public policies, intensifies the impacts on areas susceptible to landslides, especially on slopes. Deforestation, soil overload, and intense rainfall increase the risks, making it essential to understand the factors that influence mass movements to support preventive measures. In this context, geoprocessing emerges as a strategic tool in urban planning, allowing the identification of priority areas and supporting technical and political decisions. The research was conducted in the Dois Unidos neighborhood, located in Political-Administrative Region 2 (RPA 2), in Recife/PE, with the objective of developing thematic maps to assess geotechnical vulnerability. The methodology integrated analysis of terrain slope and land use and cover, using geoprocessing techniques. The data were processed in a GIS environment, using QGIS software (version 3.32), with support from the Python language, ensuring precision and automation. The UTM coordinate system, zone 25S, based on SIRGAS 2000, was adopted. The results showed that the steepest slopes are concentrated in the northern and western portions of RPA 2, with undulating terrain predominating (8% to 20%), which increases vulnerability to mass movements. Land use analysis revealed a predominance of urbanized areas, intensifying soil

instability. Therefore, it is concluded that the use of geotechnologies is fundamental to identifying risk areas and supporting socio-environmental mitigation strategies.

KEYWORDS: Geotechnologies; Geotechnical Vulnerability; Slope; Land Use and Land Cover; Mass Movements.

1 INTRODUÇÃO

O processo de industrialização acelerou o crescimento urbano brasileiro e provocou intensos fluxos migratórios para as cidades. A ausência de planejamento adequado resultou na ocupação de áreas ambientalmente frágeis, como encostas, margens fluviais e zonas de proteção, favorecendo a urbanização desordenada em capitais e regiões metropolitanas. A insuficiência de políticas públicas eficazes agravou a escassez de habitações adequadas e evidenciou desigualdades estruturais persistentes no espaço urbano. Nesse contexto, a expansão desordenada do território, associada à limitada fiscalização, contribuiu para a instalação de moradias em áreas de risco, ampliando a vulnerabilidade geotécnica e a suscetibilidade a movimentos de massa (Fernandes; Nunes, 2025; Nunes; Costa, 2023).

Os movimentos de massa, configuram-se como eventos de caráter temporal, resultantes da interação entre múltiplos fatores condicionantes e desencadeantes. Esses processos integram a dinâmica natural de transformação e reconfiguração da crosta terrestre, desempenhando papel relevante na evolução geomorfológica. Entretanto, a intervenção antrópica, por meio da ocupação desordenada do espaço físico, promove alterações significativas nas características geomorfológicas originais, intensificando a vulnerabilidade geotécnica dos terrenos. Essa modificação do meio físico, contribui para o aumento da suscetibilidade a acidentes geológicos, especialmente em áreas de encosta, onde os mecanismos de desestabilização se manifestam com maior intensidade (Dinis; Pappalardo Jr.; Seko, 2026).

Diante disso, a análise dos problemas decorrentes da ocupação em áreas de risco constitui etapa fundamental para ampliar a percepção sobre o meio e compreender os processos de degradação ambiental. Entretanto, o conhecimento isolado acerca das questões ambientais não garante mudanças de valores e atitudes. Com isso, torna-se essencial que a sensibilização ocorra de forma integrada ao acesso à informação e à prática de ações concretas, articulando razão e sentimento. Não se trata de escolher entre essas dimensões, mas de promover sua aplicação simultânea, de modo a fortalecer a consciência socioambiental e estimular comportamentos voltados à redução da vulnerabilidade geotécnica e à mitigação dos impactos urbanos.

O desenvolvimento de técnicas de geoprocessamento representa um avanço significativo para o planejamento territorial, ao permitir maior sistematização das metodologias aplicadas. Seja por meio de métodos diretos, como a coleta de dados in loco, ou por metodologias indiretas, baseadas na modelagem e representação espacial. A partir disso, o geoprocessamento se consolida como recurso essencial para a mitigação de riscos socioambientais e para a promoção de uma gestão urbana mais eficiente e sustentável. (Eniyew et al., 2021; Bousetta et al., 2022; Aoragh et al., 2023).

A capacidade de criar, manipular e cruzar dados amplia a precisão das análises e fortalece a confiabilidade dos resultados. Nesse contexto, concepções teóricas e empíricas passaram a alcançar maior robustez com a incorporação de técnicas quantitativas e computacionais, que integram o geoprocessamento como suporte científico e prático. Diante disso, a integração entre Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto (SR) potencializa ainda mais o processo analítico, permitindo identificar restrições e potencialidades de uma região com elevada eficiência. Essa combinação proporciona avaliações rápidas, precisas e de baixo custo, superando limitações dos modelos empíricos tradicionais (Ayer et al., 2015; Oliveira et al., 2023; Silva et al., 2022).

Nesse âmbito, o mapeamento de áreas de risco configura-se como ferramenta fundamental para o estudo e análise voltados ao planejamento de futuras expansões urbanas. Sua aplicação contribui para orientar a instalação de redes de infraestrutura em novas regiões e oferece suporte aos gestores públicos na identificação e previsão de possíveis problemas geotécnicos e socioambientais que possam ocorrer nesses espaços (Bispo et al., 2020).

Com base nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo elaborar mapas temáticos para avaliar a vulnerabilidade geotécnica no bairro de Dois Unidos, em Recife-PE, por meio da análise integrada da declividade do terreno e do uso e cobertura da terra. A produção dessas bases cartográficas permitiu

compreender as condições reais de risco em uma área marcada pela ocupação desordenada, além de evidenciar a relevância da educação ambiental na percepção e na conexão entre sociedade e meio ambiente. Os resultados obtidos permitiram identificar áreas de maior suscetibilidade a movimentos de massa e demonstraram o potencial do geoprocessamento para subsidiar decisões técnicas e políticas voltadas ao planejamento territorial e à mitigação de riscos socioambientais.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Entre 1950 e 1970, a cidade do Recife, capital de Pernambuco, passou por um intenso processo de crescimento demográfico. Esse aumento populacional impulsionou a ocupação das áreas de morros da Zona Sul, especialmente nos bairros de Jordão e Ibura, que já apresentavam demanda habitacional significativa. Na década de 1980, o avanço da urbanização alcançou regiões mais afastadas do centro, com ocupações em encostas nos bairros de Dois Unidos, Córrego do Jenipapo, Brejo da Guabiraba, Guabiraba, Nova Descoberta e Macaxeira. O processo se intensificou na década seguinte, quando, entre 1991 e 2000, os morros concentraram aproximadamente 60% do crescimento populacional da cidade, evidenciando a expansão desordenada em áreas de maior vulnerabilidade (Cavalcanti et al., 2024; Diniz, 2010).

A cidade do Recife (Figura 1) convive historicamente com a ocorrência de deslizamentos em áreas de morro, onde reside uma parcela significativa da população, predominantemente de baixa renda. Esses eventos já resultaram em dezenas de mortes e feridos, sendo intensificados pela combinação entre chuvas, intervenções antrópicas inadequadas e ausência de políticas públicas voltadas ao atendimento das comunidades mais vulneráveis (Ferreira, 2023).

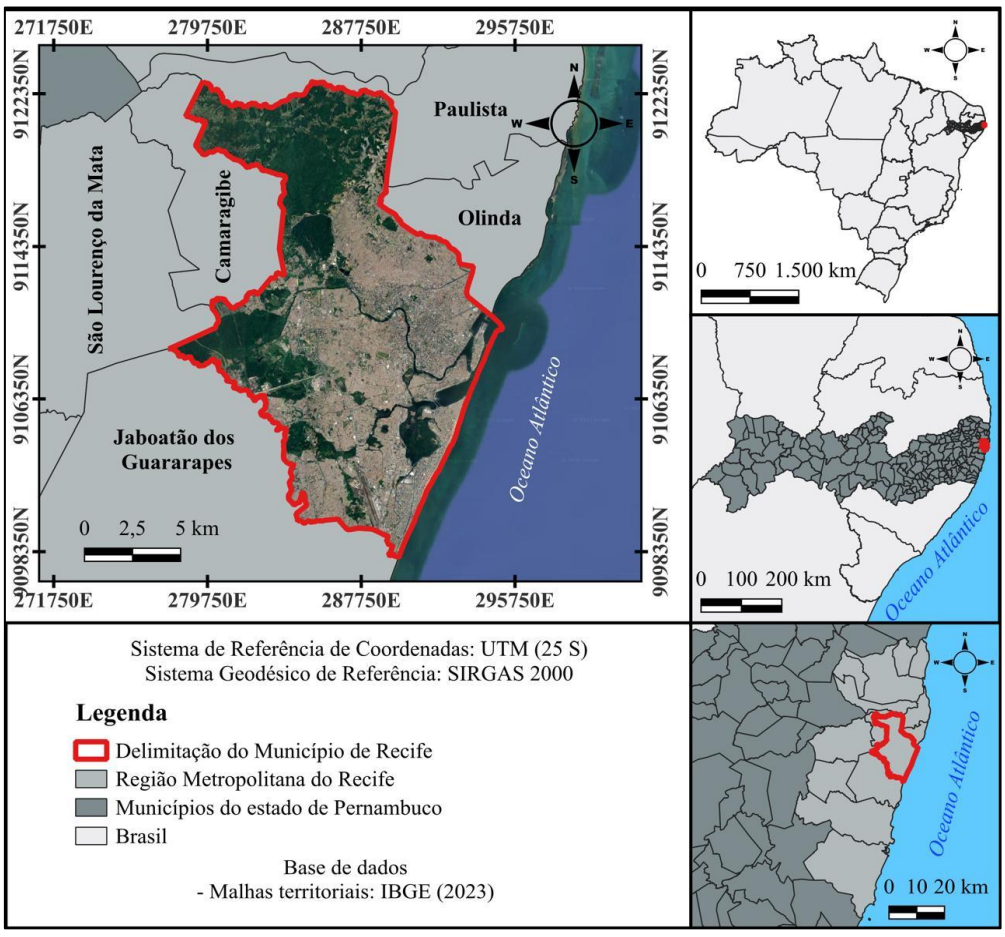


Figura 1. Mapa de Localização do município de Recife-PE

De acordo com dados do IBGE (2018), Recife ocupa a quinta posição entre os municípios brasileiros com maior número de moradores em áreas de risco de desastres naturais, totalizando 206.761 habitantes, o que

corresponde a 13,4% da população municipal. Estima-se que cerca de 35% das famílias recifenses estejam concentradas em áreas de morro, caracterizadas por ocupações irregulares e moradias precárias. A configuração territorial do município reforça essa vulnerabilidade, com 67,43% de sua extensão composta por morros e apenas 23,26% por planícies (PCR, 2024).

A área de risco analisada corresponde ao bairro de Dois Unidos (Figura 2), situado na região norte do município do Recife e integrante da Região Político-Administrativa 2 (RPA 2). Com extensão aproximada de 312 hectares, o bairro abriga uma população de cerca de 32.805 habitantes, distribuídos em 9.374 domicílios, com média de 3,5 moradores por residência. O bairro de Dois Unidos limita-se aos bairros de Passarinho, Brejo do Beberibe e Linha de Tiro, configurando-se como uma área de significativa densidade populacional e marcada por ocupações em áreas de risco (PCR, 2010).

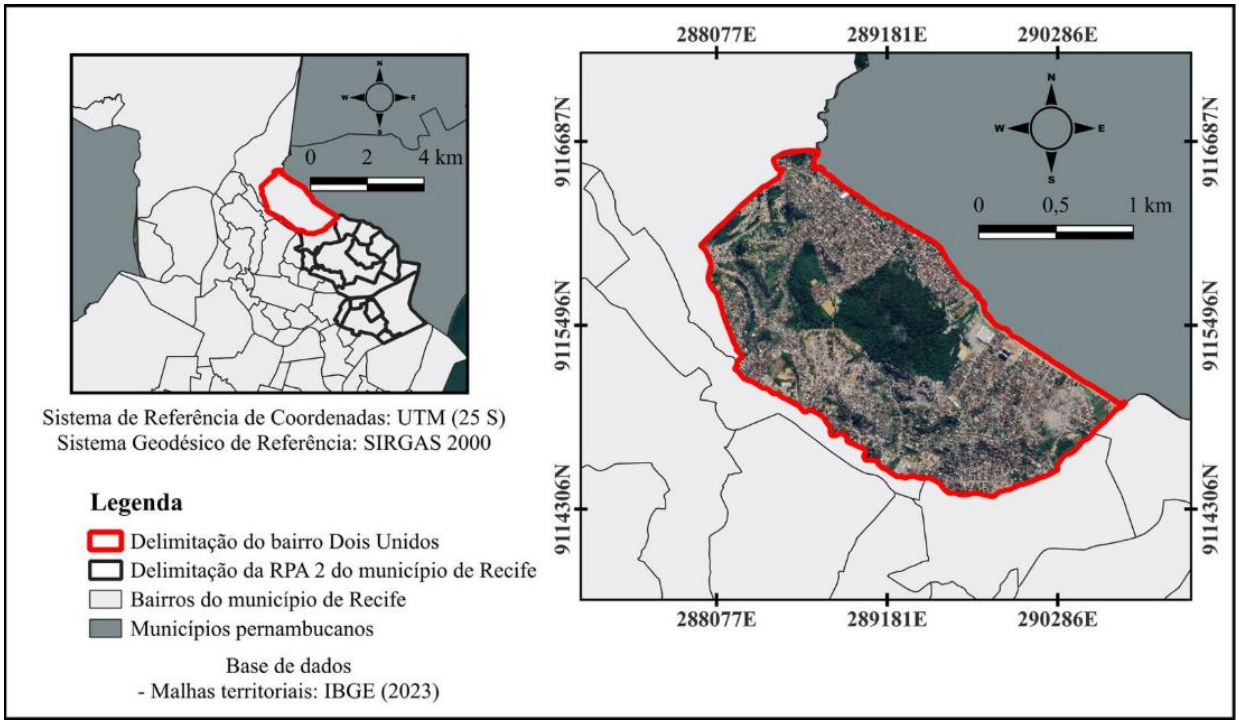


Figura 2. Localização do bairro Dois Unidos, Recife-PE.

A geologia do município de Recife é marcado por solos areno-argilosos ricos em caulinitas, ilitas e filossilicatos ferros-magnesianos, além de arenitos da Formação Beberibe e materiais da Formação Gramame. Essa composição mineralógica origina solos expansivos com alta capacidade de retenção hídrica e variação volumétrica conforme a umidade, fatores que impactam diretamente o comportamento geotécnico e a instabilidade dos terrenos na região (Verde; Santos, 2019).

Destacam-se três principais solos em Recife: os Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos – típicos de colinas e tabuleiros, profundamente intemperizados, sendo os Argissolos presentes em relevos acidentados e mais suscetíveis a deslizamentos –, e os Gleissolos, restritos a áreas de drenagem deficiente e saturação hídrica (Torres; Pfaltzgraff, 2014; Jatobá; Silva, 2022; Bócoli, 2021). Atualmente, grande parte dessa diversidade de solos encontram-se coberta pela intensa ocupação urbana antrópica, o que aumenta a suscetibilidade a movimentos de massa.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na compreensão e análise de dois fatores condicionantes que exercem grande influência sobre a ocorrência de movimentos de massa: a declividade e o uso e cobertura da terra. O processo metodológico seguiu as etapas sistematizadas no fluxograma apresentado na Figura 3, que orienta desde a identificação dos fatores até a elaboração dos mapas temáticos de cada um dos fatores e a análise dos resultados.

METODOLOGIA



Figura 3. Sintetização dos procedimentos metodológicos aplicados no estudo.

3.1 Seleção e Análise dos Fatores Condicionantes dos Movimentos de Massa

Em um primeiro momento, procedeu-se ao levantamento bibliográfico acerca dos principais fatores condicionantes relacionados à ocorrência de movimentos de massa, com base em estudos já consolidados na literatura científica. A partir dessa análise comparativa, foram selecionados dois elementos de grande relevância: a declividade e o uso e cobertura da terra. A escolha desses fatores fundamenta-se em sua influência direta sobre os processos de instabilidade dos terrenos, sendo considerados variáveis determinantes para a identificação e caracterização das áreas mais suscetíveis a deslizamentos.

A declividade de uma vertente corresponde ao ângulo formado entre sua superfície e o plano horizontal, sendo que valores mais elevados indicam maior inclinação do terreno. Vertentes com graus acentuados de inclinação apresentam, consequentemente, maiores índices de declividade, condição que intensifica a instabilidade e aumenta a vulnerabilidade a processos erosivos e movimentos de massa. Nesse sentido, a análise da declividade constitui um parâmetro essencial para compreender a dinâmica geomorfológica e identificar áreas de maior risco (Silva, 2023).

A cobertura da terra, refere-se ao estado biofísico da superfície terrestre e de seu subsolo imediato, enquanto o uso da terra está relacionado às finalidades atribuídas pela população às diferentes áreas. Alterações nesses dois componentes implicam mudanças em suas proporções e características, refletindo diretamente na dinâmica ambiental. A mensuração dessas transformações ao longo do tempo e do espaço possibilita a identificação de indicadores-chave, uma vez que tais variáveis integram aspectos bióticos e abióticos relevantes para a compreensão da instabilidade dos terrenos. Logo, para tornar a análise mais precisa, é importante que a avaliação das mudanças na cobertura e no uso da terra seja feita de forma espacialmente detalhada. (Meyer; Turner II, 1996).

3.2 Coleta de Dados

Para a construção da base de dados, cada mapa temático foi elaborado a partir de fontes específicas, conforme apresentado na Tabela 1. As informações foram obtidas por meio de sensoriamento remoto, utilizando a plataforma Google Earth, o que permitiu a representação dos fatores condicionantes associados à ocorrência de movimentos de massa.

No caso da declividade, os valores foram expressos em porcentagem e organizados em seis categorias, seguindo a classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Já para o uso e cobertura da terra, foram consideradas duas classes principais na área de estudo: área urbana e vegetação florestal

Tabela 1. Fontes de obtenção dos dados espaciais.

Mapa	Fonte de Dados
Declividade	Proveniente do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que produziu Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resolução espacial de 1 metro para todo o estado pernambucano, a partir de perfilamento a laser aerotransportado (LiDAR)
Uso e Cobertura da Terra	Obtido pela Coleção 6 do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas), no formato matricial e com resolução espacial de 30 metros.

3.3 Integração dos Dados Espaciais e Elaboração dos Mapas

O processamento e a fotointerpretação dos dados espaciais foram realizados com o apoio da linguagem de programação Python, integrada ao software QGIS (versão 3.32). Para garantir a padronização e precisão das análises, adotou-se o sistema de coordenadas UTM, fuso 25S, baseado no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). A partir desse procedimento, foram elaborados os mapas temáticos de declividade e de uso e cobertura da terra, que serviram como base para a análise dos fatores condicionantes dos movimentos de massa.

4 RESULTADOS

A utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitiu a elaboração de mapas temáticos que representam o comportamento da Região de Planejamento e Administração 2 (RPA 2), conforme ilustrado nas Figura 4.

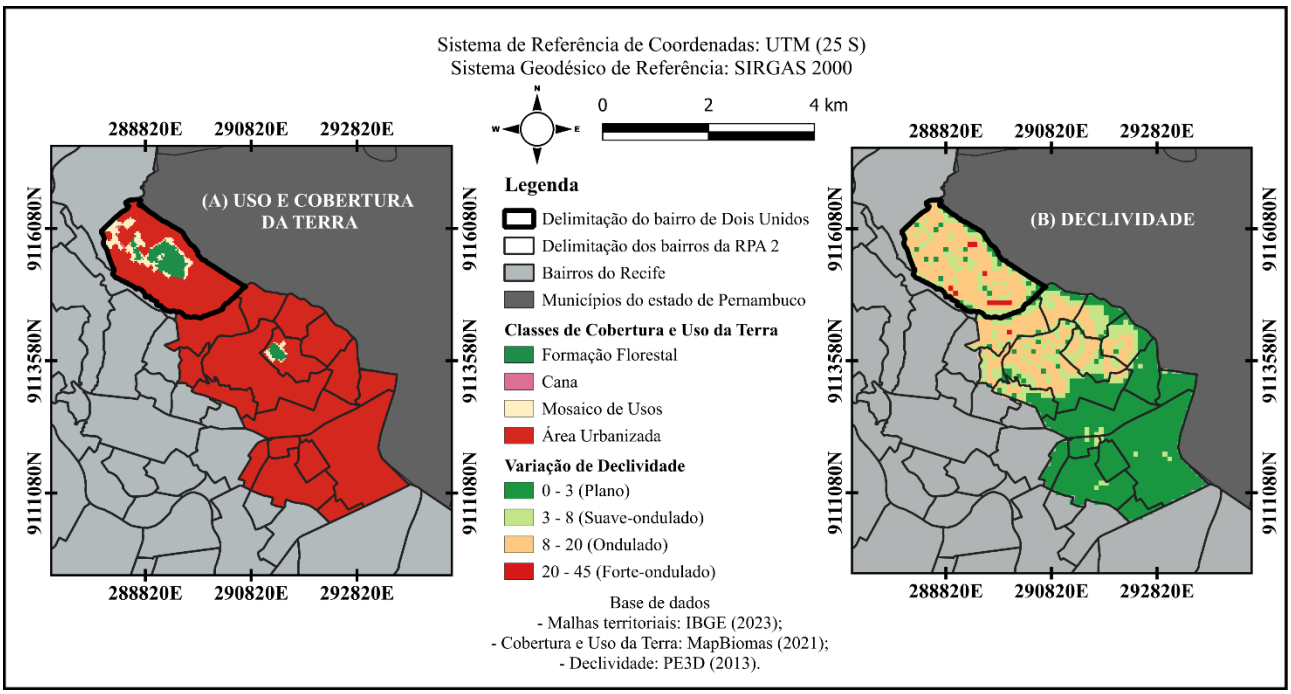


Figura 4. Mapa de Declividade e de Uso e Cobertura da Terra da RPA 2.

No que se refere à declividade, observa-se que a Região de Planejamento e Administração 2 (RPA 2) apresenta uma ampla predominância de áreas planas, caracterizadas por baixos valores de inclinação. Entretanto, o bairro selecionado para análise distingue-se por apresentar terrenos majoritariamente classificados como ondulados, com variação de declividade entre 8% e 20%. Essa condição geomorfológica implica maior predisposição à ocorrência de movimentos de massa, uma vez que a inclinação acentuada favorece processos de instabilidade do solo, como deslizamentos e erosão acelerada. Dessa forma, a declividade constitui um fator determinante para compreender a vulnerabilidade da área estudada e para subsidiar estratégias de planejamento e gestão territorial.

No que se refere à cobertura e ao uso da terra, verifica-se que na RPA 2 predominam áreas urbanizadas, especialmente em regiões de morro. Essa ocupação em terrenos mais inclinados contribui de maneira significativa para a intensificação dos movimentos de massa, uma vez que a retirada da vegetação e a impermeabilização do solo reduzem sua estabilidade natural. Em contrapartida, a formação florestal, considerada a classe menos suscetível à indução desses processos, está concentrada principalmente na porção central da RPA 2 e onde está localizado o bairro Dois Unidos. A presença dessa cobertura vegetal exerce papel fundamental na proteção do solo, atuando como barreira contra movimentos de massa e favorecendo a infiltração da água, o que reduz os riscos de instabilidade.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a combinação entre declividade e uso e cobertura da terra exerce papel central na definição da vulnerabilidade da RPA 2 e, em especial, do bairro Dois Unidos. A predominância de terrenos ondulados, associados à ocupação urbana em áreas de morro, reforça a predisposição a movimentos de massa, uma vez que a inclinação acentuada e a ausência de cobertura vegetal aumentam a instabilidade do solo. Em contrapartida, as áreas de vegetação florestal demonstram importância estratégica na proteção ambiental, atuando como fator de equilíbrio frente às pressões antrópicas. Dessa forma, os mapas permitem compreender de maneira integrada os condicionantes físicos e antrópicos, fornecendo subsídios relevantes para o planejamento territorial e para a adoção de medidas preventivas voltadas à redução dos riscos de deslizamentos.

Com base na análise realizada, conclui-se que o bairro Dois Unidos apresenta elevada suscetibilidade a deslizamentos, configurando-se como área de risco para a população local. A combinação entre fatores naturais, ocupação urbana em áreas inadequadas e carência de infraestrutura intensifica a vulnerabilidade. Nesse contexto, estudos dessa natureza são fundamentais para orientar políticas de ordenamento territorial e práticas sustentáveis, como a preservação da cobertura vegetal e o uso racional do solo, que podem reduzir significativamente a ocorrência de movimentos de massa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Pernambuco (UPE) pelo suporte institucional e pela infraestrutura técnica e laboratorial colocada à disposição para a execução deste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aoragh, M.H., Ijlil, S., Essahlaoui, N., Essahlaoui, A., Hmaidi, A.E., Ouali, A.E.; Mridekh, M., 2023. Remote sensing and GISbased machine learning models for spatial gully erosion prediction: A case study of Rdat watershed in Sebou basin, Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment [online] 30.* Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100939>. Acesso em: 26 set. 2025.

Ayer, J. E. B., Olivetti, D., Mincato, R. L., Silva, M. L. N., 2015. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. *Pesquisa Agropecuária Tropical [online] 45.* Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4531197>. Acesso em: 13 out. 2025.

Bispo, C. O., Listo, F. L. R., Falcão, N. A. M., Listo, D. G. S. Previsão de escorregamentos no município de Maceió (AL) a partir do modelo AHP. Revista do Departamento de Geografia. v. 39, n. 1, p. 88-101, 2020.

Bócoli, F. A. Caracterização de latossolos em topossequência e de argissolos em hidrossequências com apoio de sensores próximos, 2021. Dissertação em Ciência do Solo - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

Bousetta, A., Niculescu, S., Bengoufa, S., Zagrarni, M.F., 2022. Spatio-temporal analysis of shoreline changes and erosion risk assessment along Jerba island (Tunisia) based on remotesensing data and geospatial tools. *Regional Studies in Marine Science [online] 55*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102564>. Acesso em: 24 set. 2025.

Cavalcanti, E. et al. Áreas de morros da cidade do Recife (Pernambuco, Brasil): a importância da governança adaptativa diante dos riscos geológicos. Territorium. *Revista Internacional de Riscos*, n. 31 (II), p. 37-53, Universidade de Coimbra, Portugal, 2024.

Dinis, H., Pappalardo Jr, A., & Seko, K. R. C. (2026). Segurança das encostas em situação de ocupação antrópica: critérios para análise e avaliação de riscos geológicos. *Revista Aracê* [S. l.], v. 8, n. 1, p. e11783, 2026. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/11783>. Acesso em: 5 fev. 2026.

Diniz, F. R. Drainage et gestion du développement urbain durable. Les enjeux en milieu urbain au Brésil. In: Maillefert, M., Petit, O., Rousseau [dir.]. *Ressources, patrimoines, territoires et développement durable*. Bruxelas, Ed. Peter Lang, 2010.

Eniyew, S., Teshome, M., Sisay, E., Bezabih, T., 2021. Integrating RUSLE model with remote sensing and GIS for evaluation soil erosion in Telkwonz Watershed, Northwestern Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment [online] 24.* DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100623.

Fernandes, D. S., Nunes, M. N. C. A. Urbanização e os Impactos Ambientais no Solo. *Revista Interlocus*. v. 1, n. 1, 2025. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.15663892.

Ferreira, L. M. V. *Variabilidade espacial do cisalhamento em locais de risco de deslizamento de taludes na cidade do Recife - PE*. 49p. Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Ciência Florestal. Curso de Graduação em Engenharia Florestal, 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). População em áreas de risco no Brasil. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101589.pdf>, Acesso em: 07 fev. 2026.

Jatobá, L.; Silva, A. F. Estruturação natural de paisagens da Zona da Mata do Estado de Pernambuco. Ciência Geográfica. v. 26, n. 1, p. 9-33, 2022.

Meyer, W. B., Turner II, B. L. Land-Use/Land-Cover Change: Challenges for Geographers. *Geojournal*, v. 39, n. 3, p. 237-240, 1996.

Nunes, W. P., Costa, C. R. Uma cidade em questão: apontamentos da participação cidadã e processo de urbanização sobre o caso de Floriano-PI. *Sociedade em Debate*, v. 5, n. 1, p.182-205, 2023.

Oliveira, L. D., Alves, W. S., Castro, R. M., Pereira, M. A. B., Possa, E. M., Morais, W. A., Martins, A. P., 2023. Estimativa da erosão hídrica em uma bacia hidrográfica no estado de Goiás (Brasil) por meio de modelagem e inteligência geoespacial. *Revista Brasileira de Geografia Física [online] 16.* Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p081- 100>. Acesso em: 11 nov. 2025.

Prefeitura da Cidade do Recife (PCR). Caracterização do território, 2024. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio> . Acesso em: 07 nov. de 2025.

Prefeitura da Cidade do Recife (PCR). Dois Unidos, 2010. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/servico/dois-unidos?op=NzQ1NQ==>. Acesso em: 14 dez. 2025

Silva, D. B. da., Guedes, R. de M. A. Ocupação Desordenada em Áreas de Proteção Permanente e a Relação com o Desenvolvimento Sustentável de Grandes Centros Urbanos. *Scientific Journal ANAP*, [S. l.], v. 1, n. 1, 2023. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap/article/view/3449>. Acesso em: 25 jan. 2025.

Silva, E. R. dos S. da., Oliveira, V. F. R. de., Vick, E. P., Lima, C. G. da R., Bacani, V. M., Chavéz, E. S. Geotecnologías aplicadas al análisis de la fragilidad ambiental a los procesos erosivos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, v. 31, n. 1, p. 222-240, 2022.

Torres, F. S. M.; Pfaltzgraff, P. A. S. Geodiversidade do estado de Pernambuco. Recife: CPRM, 2014. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16771. Acesso em: 15 jun. 2026.

Verde, V.G.R.V; Santos, A.C. Riscos Geológicos Urbanos Nos Morros Da Cidade De RecifePernambuco. Revista de Geografia (Recife), v. 36, n. 3, 2019. https://doi.org/10.51359/22386211.2019.241288.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/104

Interpretação de Ensaios em Coluna em Solos Residuais com Sorção no Equilíbrio e Limitada Cineticamente

Paulo Scarano Hemsi
Professor Associado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, paulosh@ita.br

Maria Eugenia Gimenez Boscov
Professora Titular, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, meboscov@usp.br

RESUMO: Esse artigo visa discutir a ambiguidade que pode ocorrer na interpretação de curvas experimentais de chegada de metais em ensaios de transporte em colunas usando solos tropicais, quando os modelos de transporte de advecção-dispersão com sorção no equilíbrio (AD) e advecção-dispersão com sorção limitada cineticamente (*two site model*, ADTSM) são ambos capazes de ajustar os dados experimentais com altos coeficientes de determinação. Nos ensaios da literatura analisados, em amostras indeformadas de um solo saprolítico e de um laterítico, o ajuste do modelo ADTSM resultou na consideração de que 70 a 80% dos sítios de sorção apresentariam sorção limitada cineticamente (não-equilíbrio). Por outro lado, o ajuste do modelo AD exigiu considerar coeficientes de dispersão hidrodinâmica 10 a 30 vezes superiores aos valores prévios, reduzindo o número de Péclet das colunas para apenas cerca de 1,0, e com dispersividade longitudinal nos ensaios próxima ao comprimento das colunas. Ao final, o artigo discute um contexto de interpretação em que ensaios complementares são recomendados para ajudar a elucidar na escolha do modelo de transporte mais adequado para a interpretação dos dados de transporte de metais em solos tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Advecção-dispersão, soluções analíticas, curva de chegada, ensaio em coluna, sorção, solo tropical.

ABSTRACT: This article aims to discuss the ambiguity that can occur in the interpretation of experimental breakthrough curves of metals in transport column tests using tropical soils, when the advection-dispersion model with equilibrium sorption (AD) and advection-dispersion with kinetically-limited sorption (two-site model, ADTSM) are both capable of fitting the experimental data with high coefficients of determination. In the literature tests analyzed, in undisturbed samples of a saprolitic and a lateritic soil, the fit of the ADTSM model resulted in the consideration that 70 to 80% of the sorption sites would present kinetically limited sorption (non-equilibrium). On the other hand, the fit of the AD model required considering hydrodynamic dispersion coefficients 10 to 30 times higher than the previous values, reducing the Péclet number of the columns to only about 1.0, and with longitudinal dispersivity in the tests near the length of the columns. Finally, the article discusses an interpretative context in which complementary tests are recommended to help elucidate the choice of the most appropriate transport model for interpreting metal transport data in tropical soils.

KEYWORDS: Advection-dispersion, analytical solutions, breakthrough curve, column tests, sorption, tropical soil.

1 INTRODUÇÃO

O transporte miscível de espécies químicas em fase aquosa através do meio poroso é descrito macroscopicamente pela advecção e dispersão hidrodinâmica, essa última incluindo dispersão mecânica e difusão. Em camadas arenosas, o transporte é dominado por advecção e dispersão mecânica, enquanto a difusão é o mecanismo predominante em solos de baixa condutividade hidráulica (argilas). A migração do soluto pode ser, ainda, afetada pela sorção, quando os solutos particionam-se para a superfície dos grãos do meio poroso. Se a transferência de massa entre as fases aquosa e sorvida ocorrer rapidamente em relação à velocidade de transporte, a sorção ocorre em equilíbrio local. Nesse contexto, as isotermas de sorção, como a linear, de Freundlich e de Langmuir, podem ser utilizadas. No entanto, quando a taxa de sorção do soluto é

menor em relação à sua taxa de migração, a sorção se torna um processo limitado cineticamente, com componentes dependentes do tempo.

No Brasil, vários estudos avaliaram a migração e retenção de metais pesados em solos residuais e lateríticos, utilizando ensaios em batelada, coluna e difusão, muitas vezes com o objetivo de avaliar o potencial de uso desses solos como camadas de revestimento de fundo em aterros sanitários e industriais (por exemplo, Demulenaere, 2004; Nascentes et al., 2008; Korf et al., 2008; Stuermer et al., 2008; Boscov et al., 2011; Thomé et al., 2013; Gabas et al., 2016). Outros trabalhos concentraram-se no estudo da sorção em equilíbrio e não-equilíbrio em solos brasileiros (por exemplo, Hemsi et al., 2002; Coelho, 2016; Guimarães, 2020; Borges et al., 2022; Cavalcante et al., 2024). Por exemplo, Guimarães (2020) mostrou que a sorção dos metais Cd, Cu, Pb e Zn em um solo laterítico exibiu comportamento dependente do tempo em ensaios em batelada e colunas.

Do ponto de vista conceitual, a sorção cineticamente limitada ocorre quando existem barreiras físicas, químicas ou estruturais que dificultam o acesso do soluto aos sítios de sorção, como difusão intrapartícula, reações químicas ou limitações de acesso aos sítios de sorção. Neste caso, a modelagem requer a inclusão de um termo cinético na equação de advecção-dispersão. As equações que governam o transporte advectivo-dispersivo com sorção limitada cineticamente e suas soluções analíticas encontram-se na literatura há muitos anos (por exemplo, van Genuchten & Wierenga, 1976; Parker & van Genuchten, 1984).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Transporte Advectivo-Dispersivo

Na forma unidimensional, a equação que governa o transporte de solutos por advecção-dispersão com sorção no equilíbrio, admitindo meio homogêneo, fluxo em regime permanente e sem fontes/sorvedouros, pode ser escrita como (por exemplo, ver Hemsi, 2024):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_d}{n}\frac{\partial S}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

onde x é a coordenada espacial na direção do transporte, t é o tempo, C e S são as concentrações do soluto nas fases aquosa e sorvida, respectivamente, ρ_d é a massa específica seca do solo, n é a porosidade do solo, v é a velocidade de percolação (dada pela velocidade de Darcy dividida por n) e D é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica, dado pela soma dos coeficientes de dispersão mecânica e de difusão efetivo. Supondo que a sorção seja instantânea, linear e reversível, tem-se:

$$S = K_d C \tag{2}$$

onde K_d é o coeficiente de partição, denominado coeficiente de distribuição do soluto no solo. A partir daí, o fator de retardamento, R_d, pode ser definido como:

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} K_d \tag{3}$$

E a partir dessas definições, a Equação 1 pode ser escrita como:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} \tag{4}$$

Por outro lado, quando a sorção é lenta (não-equilíbrio), o modelo abaixo pode ser utilizado para representar o transporte advectivo-dispersivo unidimensional acoplado a sorção limitada cineticamente, para as mesmas hipóteses da Equação 1 (Parker & van Genuchten, 1984; Goltz & Huang, 2017):

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\rho_d}{n}\frac{\partial S}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-v\frac{\partial C}{\partial x} \\ &\frac{\partial S}{\partial t}=\alpha(K_d C-S) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

onde α é a taxa de sorção (T^{-1}). A Equação 5 representa um modelo com um único tipo de sítio de sorção na superfície das partículas do solo (*one-site model*), isto é, apenas sítios com sorção limitada cineticamente (não-equilíbrio).

Uma formulação mais geral, dada pela Equação 6, considera o transporte advectivo-dispersivo acoplado a um modelo de sorção com dois tipos de sítios de sorção (*two-site model*), ou seja, sítios com sorção no equilíbrio e sítios em que a sorção é limitada cineticamente:

$$\left.\begin{aligned} &\left(1+f\,\frac{\rho_d}{n}K_d\right)\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\rho_d}{n}\frac{\partial S_2}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-v\frac{\partial C}{\partial x} \\ &\frac{\partial S_2}{\partial t}=\alpha\left[(1-f)K_d C-S_2\right] \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

onde f representa a fração dos sítios que apresentam a sorção instantânea (equilíbrio) e (1 – f) a fração dos sítios do solo que apresentam sorção limitada cineticamente (não-equilíbrio). Na Eq. 6, a concentração S_2 corresponde à concentração em fase adsorvida nos sítios de sorção limitada cineticamente.

2.2 Ensaios em Coluna

Os ensaios de transporte em coluna permitem verificar o comportamento dinâmico do transporte (unidimensional) do soluto no meio poroso, muitas vezes acoplado à sorção em equilíbrio ou não-equilíbrio. O ensaio se baseia em utilizar um tubo cilíndrico preenchido com uma amostra indeformada ou compactada do solo de interesse. O procedimento de ensaio (Shackelford, 2021) envolve algumas etapas. Inicialmente, a coluna é permeada com o solvente, normalmente água pura, a fim de estabelecer o fluxo em regime permanente e saturar o corpo-de-prova. Em seguida, o solvente é "instantaneamente" substituído por uma solução aquosa contendo o soluto de interesse em concentração conhecida, C_0, enquanto se mantém o fluxo em regime permanente. A solução fonte pode ser mantida constante ao longo do ensaio (fonte contínua) ou por apenas um intervalo de tempo (fonte em pulso).

As concentrações do soluto na saída da coluna (efluente), C(x=L, t), são monitoradas ao longo do tempo e plotadas em um gráfico da concentração relativa efluente, $C(x=L, t)/C_0$ versus o tempo ou número de volumes de poros percolados, o qual se denomina curva de chegada ou *breakthrough curve*. Em condições ideais (transporte dominado por advecção, sorção no equilíbrio), a curva de chegada possui formato sigmoidal simétrico (fonte contínua) (Shackelford, 2021; Hemsi, 2024). Quando o transporte é dominado pela difusão ou a sorção é limitada cineticamente, a curva resulta assimétrica.

Dois números adimensionais são úteis ao interpretar ensaios em coluna, o número de Péclet da coluna (P_L) e o número de volumes de poros percolados, ou fator tempo, T_f, definidos como:

$$P_L=\frac{vL}{D} \tag{7}$$

$$T_f=\frac{vt}{L} \tag{8}$$

Outros dois números adimensionais relevantes relacionam a taxa de sorção fora do equilíbrio com a dinâmica do transporte, o primeiro e o segundo números de Dämkholer, D_I e D_{II}:

$$D_I = \frac{\alpha L}{v} \tag{9}$$

$$D_{II} = \frac{\alpha L^2}{D} \tag{10}$$

pode-se observar que o segundo número de Dämkholer (D_{II}) é igual ao primeiro número (D_I) multiplicado pelo número de Péclet da coluna (P_L).

3 METODOLOGIA

A metodologia neste trabalho inclui o ajuste das soluções analíticas abaixo, para advecção-dispersão com sorção no equilíbrio (Eq. 4) e advecção-dispersão com o modelo de dois sítios de sorção (*two-site model)* (Eq. 6), aos dados experimentais (*breakthrough curves*) de três ensaios em coluna da literatura, sendo os ensaios 2 e 3 em solos brasileiros. Os valores dos parâmetros ajustados são então comparados, chegando-se a algumas conclusões relevantes.

3.1 Soluções Analíticas

A partir da Equação 4, a solução analítica mais apropriada para simular a curva de chegada das concentrações efluentes do soluto é a solução de Ogata & Banks (1961) (ver Shackelford, 1994, Hemsi, 2024). Desse modo, a solução de Ogata & Banks (Tabela 1), com x = L, é utilizada nesse trabalho para advecção-dispersão com sorção no equilíbrio (solução AD). Para advecção-dispersão com o modelo de dois sítios de sorção (*two-site model)* (Eq. 6), a solução analítica ADTSM foi adaptada com base em Goltz & Huang (2017). Essa solução possui as mesmas condições iniciais e de contorno da solução de Ogata & Banks (1961) sendo, portanto, apropriada para simular curvas de chegada das concentrações efluentes. Na solução, quando f = 1, os adimensionais N_2 e N_5 reduzem-se a R_d e 0,0, respectivamente, e a solução simplifica-se para a solução AD. Como observado na Tabela 1, a solução ADTSM é apresentada apenas no domínio da transformada de Laplace, conforme explicado a seguir.

Tabela 1. Soluções analíticas AD e ADTSM.

Solução	Domínio do espaço-tempo	Domínio de Laplace
AD	$\frac{C(L,t)}{C_0} = 0{,}5\left\{ erfc\left[\frac{R_d L - vt}{2(DR_d t)^{1/2}}\right] + \exp\left(\frac{vL}{2D}\right) erfc\left[\frac{R_d L + vt}{2(DR_d t)^{1/2}}\right]\right\}$	$\frac{\bar{C}(L,s)}{C_0} = \left(\frac{1}{s}\right)\exp\left\{N_1 - \sqrt{N_1^2 + \frac{L^2 s}{D} R_d}\right\}$
ADTSM	Sem forma analítica	$\frac{\bar{C}(L,s)}{C_0} = \left(\frac{1}{s}\right)\exp\left\{N_1 - \sqrt{N_1^2 + \frac{L^2 s}{D} N_2 + N_3 N_4 N_5 \frac{s}{(s+\alpha)}}\right\}$

Adimensionais:

$N_1 = \frac{vL}{2D} = \frac{P_L}{2}$ $\quad N_2 = 1 + \frac{f\,\rho_d K_d}{n}$ $\quad N_3 = \frac{\alpha L^2}{D} = D_{II}$

$N_4 = \frac{\rho_d K_d}{n} = R_d - 1$ $\quad N_5 = 1 - f$

Freqüentemente, as transformadas de Laplace são usadas para resolver as equações diferenciais que regem o transporte. A solução resultante é obtida no domínio da transformada de Laplace, ou seja, uma concentração transformada (C barra) em função de x (variável espacial) e s (variável de tempo transformada). O próximo passo é aplicar a transformada inversa de Laplace para obter a solução no domínio espaço-tempo. Em cenários complexos, a inversão analítica não é possível, como é o caso da solução ADTSM. Desse modo, um algoritmo de inversão numérica deve ser utilizado para avaliar numericamente valores discretos da concentração C, no domínio espaço-tempo, para valores pontuais de x e t. Neste trabalho, foi utilizada uma função do programa MATLAB (Mathworks) denominada INVLAP (Juraj, 2024), que se baseia no algoritmo de Hoog para inversão numérica de transformadas de Laplace.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados de três ensaios em coluna da literatura são ajustados usando as soluções analíticas AD e ADTSM, sendo os ensaios 2 e 3 em solos tropicais.

4.1 Ensaio 1

Esse primeiro ensaio em coluna visa mostrar a aplicabilidade da solução ADTSM. O ensaio 1 foi realizado e apresentado por Parker & van Genuchten (1984), tratando do transporte de um pulso do elemento boro (B) através de uma amostra indeformada de solo franco-argiloso (*clay loam*) de origem calcárea de Glendale. Quando se simula uma fonte em pulso de duração t_0, as soluções analíticas no domínio de Laplace devem ser multiplicadas pelo termo $[1-\exp(-t_0 s)]$. O comprimento da coluna foi de 0,30 m e a velocidade de percolação 0,385 m/d (4,45 x 10^{-6} m/s). A duração do pulso (t_0) foi de 5,06 d (concentração constante C_0). Os parâmetros de referência relatados por Parker & van Genuchten (1984) para a simulação do ensaio com o *two-site model* foram D = 0,00477 m^2/d (5,52 x 10^{-8} m^2/s), P_L = 24, e R_d = 4,3, e também os parâmetros β = 0,6 e ω = 0,424, equivalentes a D_I = 0,25 e f = 0,48 (com base em n = 0,4 e ρ_d = 1600 kg/m^3). Conforme mostrado na Figura 1, a solução analítica ADTSM com os valores dos parâmetros de referência dos autores resulta em um bom ajuste (R^2 = 0,982) dos dados experimentais. Por outro lado, a solução AD (com D = 5,52 x 10^{-8} m^2/s e R_d = 4,3) resulta em uma curva simétrica que não passa pelos pontos experimentais. Como é visível na Figura 1, devido à sorção fora do equilíbrio, a curva experimental é assimétrica, com chegada mais precoce do soluto devido à sorção lenta e com cauda de concentração nos tempos posteriores devido à dessorção lenta.

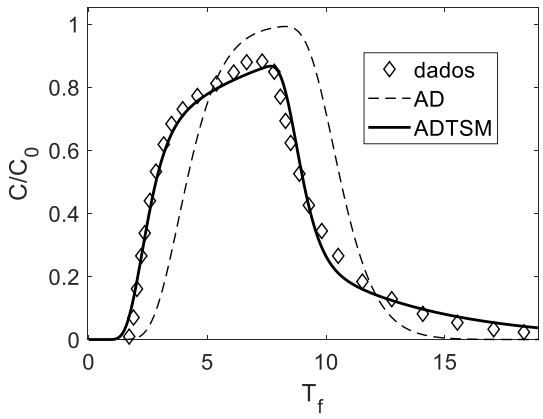


Figura 1. Dados da curva de chegada na coluna 1, com ajuste da solução ADTSM.

4.2 Ensaio 2

O segundo ensaio em coluna considerado foi realizado e apresentado por Demulenaere (2004) utilizando um solo brasileiro. O ensaio visou avaliar o transporte do metal pesado zinco (Zn), em fonte contínua, através

de corpo-de-prova de amostra indeformada de um solo residual gnáissico silto-arenoso de Duque de Caxias (RJ). O comprimento da coluna foi de 0,10 m e a velocidade de percolação de 3,88 m/d (4,5 x 10^{-5} m/s). A porosidade e massa específica seca do solo foram de, respectivamente, 0,44 e 1450 kg/m^3. A distribuição granulométrica do solo indicou 5% de pedregulho, 56% de areia, 32% de silte e 6% de argila. A mineralogia da fração grossa compreendeu quartzo, biotita e feldspato, e a da fração fina caulinita e gibsita. Os resultados do ensaio consistiram da curva de chegada de Zn na forma de C/C_0 versus T_f (até 14). A solução ADTSM foi utilizada para aproximar os dados experimentais, com os valores dos parâmetros D = 0,042 m^2/d (4,9 x 10^{-7} m^2/s) (P_L = 9), R_d = 5,66, D_I = 0,15 e f = 0,30, e alcançando R^2 = 0,99 (Figura 2a). Outra interpretação realizada foi utilizar a solução AD. Como mostrado na Figura 2b, a solução AD com os mesmos valores para D e R_d resulta em uma curva de chegada que não aproxima os pontos experimentais. Porém, com o coeficiente de dispersão hidrodinâmica aumentado por um fator de 10 (0,42 m^2/d = 4,9 x 10^{-6} m^2/s, correspondendo a P_L = 0,9), e R_d = 5,66, a solução AD é capaz de aproximar os dados (R^2 = 0,98), como mostrado na Figura 2b.

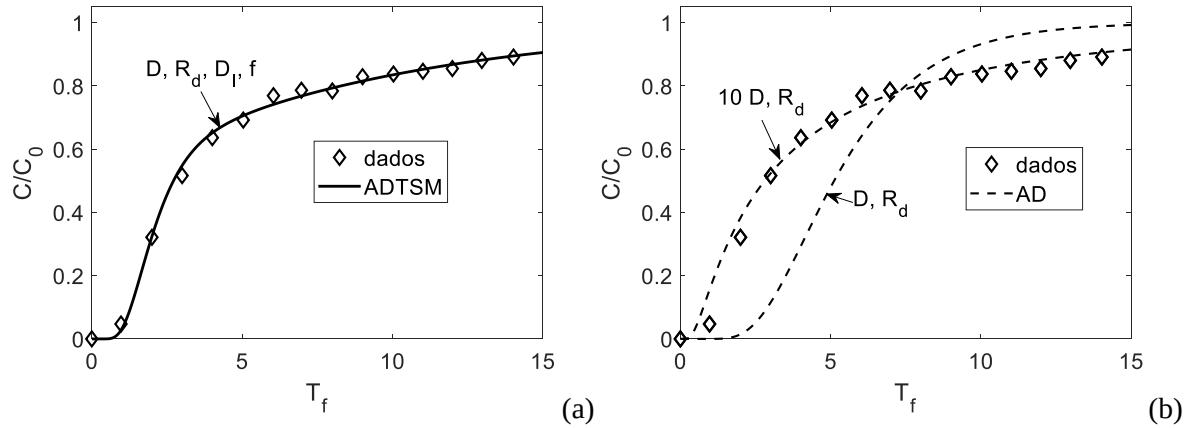


Figura 2. Dados experimentais do ensaio 2 e aproximação com as soluções analíticas: (a) ADTSM, e (b) AD.

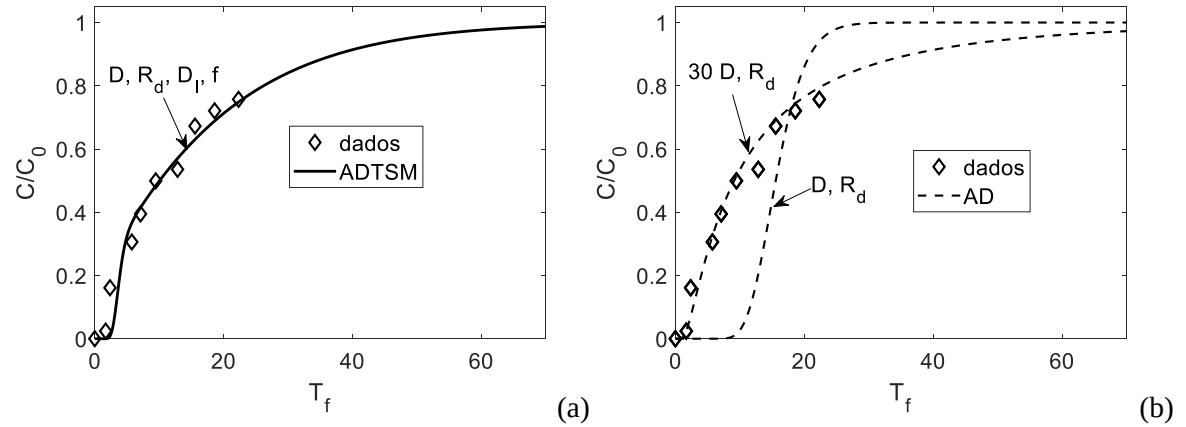


Figura 3. Dados experimentais do ensaio 3 e aproximação com as soluções analíticas: (a) ADTSM, e (b) AD.

4.3 Ensaio 3

Por fim, o ensaio em coluna 3 se refere a um ensaio realizado e apresentado por Thomé et al. (2013), com o transporte do metal pesado cádmio (Cd), em fonte contínua, através de um corpo-de-prova de amostra indeformada de um solo areno-argiloso laterítico de Passo Fundo (RS). O comprimento da coluna foi de 0,121 m e a velocidade de percolação de 17,3 m/d (2 x 10^{-4} m/s). A porosidade e massa específica seca do solo foram de, respectivamente, 0,56 e 1560 kg/m^3. A distribuição granulométrica do solo englobou 27% de areia, 5% de silte e 68% de argila. A mineralogia do solo laterítico compreendeu caulinita e óxidos de ferro. Os resultados do teste consistiram da curva de chegada de Cd na forma de C/C_0 versus T_f até 22. A Figura 3a mostra os

resultados obtidos usando a solução analítica ADTSM para aproximar os pontos experimentais, com os valores dos parâmetro D = 0,057 m^2/d (6,6 x 10^{-7} m^2/s) (P_L = 36), R_d = 16, D_I = 0,10 e f = 0,20, e atingindo R^2 = 0,95. Semelhante ao que aconteceu com o ensaio 2, a solução AD também foi utilizada, com os mesmos valores acima para D e R_d, sem conseguir aproximar os dados experimentais. Entretanto, com valor do coeficiente de dispersão hidrodinâmica 30 vezes maior (1,710 m^2/d = 2 x 10^{-5} m^2/s, correspondendo a P_L = 1,2), e R_d = 16, a solução AD foi capaz de atingir um bom ajuste (R^2 = 0,97) aos dados do ensaio.

Os resultados das Figuras 2 e 3 permitem destacar alguns aspectos para discussão. Mais de um modelo de transporte (AD e ADTSM) pode ser capaz de aproximar os dados experimentais da *breakthrough curve* de ensaios em coluna. A escolha do modelo para interpretação dos dados reflete uma decisão quanto aos processos físicos e químicos a serem priorizados. Ajustar a curva de chegada por meio da solução ADTSM implica admitir que 70 a 80% dos sítios de sorção do solo apresentam sorção limitada cineticamente, atribuido a esse efeito o formato assimétrico observado nesta curva. Por outro lado, o ajuste dos dados empregando a solução AD requer considerar um valor elevado para o coeficiente de dispersão hidrodinâmica (10 a 30 vezes maior que no caso anterior), alcançando baixos valores de P_L, da ordem de 1,0, que se justificariam apenas no caso do corpo-de-prova apresentar um elavado grau de heterogeneidade. Para solos tropicais, ambas as considerações acima podem ser pertinentes, tendo em vista que solos saprolíticos são heterogêneos e que ensaios laboratoriais da literatura têm revelado que a sorção apresenta componente dependente do tempo.

Visando ajudar a esclarecer qual dos modelos de transporte priorizar na interpretação dos dados, o ensaio em coluna com o metal pesado de interesse no solo tropical poderia ser complementado com:
- ensaios prévios em batelada, usando o mesmo metal e o mesmo solo, com o objetivo de avaliar se a sorção ocorre instantaneamente ou se é cineticamente limitada;
- ensaios prévios em coluna, usando o mesmo corpo-de-prova do solo e um íon traçador não reativo, com o intuito de aferir um valor para o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do corpo-de-prova. É importante testar o traçador, visto que solos lateríticos podem sorver ânions devido à carga variável. O brometo, por exemplo, apresentou coeficiente de retardo igual a 1,0 em ensaio em coluna em argila laterítica, enquanto cloreto, iodeto e fluoreto foram sorvidos pelo solo (Borges, 2024), e, ainda,
- repetir os ensaios em coluna com o metal de interesse, desta vez utilizando o solo tropical destorroado e recompactado no mesmo índice de vazios da amostra indeformada, mas sem sua estrutura, para verificar as variações obtidas nos parâmetros.

5 CONCLUSÕES

Os ensaios em coluna da literatura utilizados nas análises desse artigo permitiram concluir quanto à possibilidade de interpretação de curvas experimentais de chegada de metais em solos tropicais utilizando tanto o modelo de transporte de advecção-dispersão com sorção no equilíbrio (AD) quanto de advecção-dispersão com sorção limitada cineticamente (*two site model*, ADTSM). Embora os coeficientes de ajuste R^2 tenham sido elevados para todas as simulações, o modelo AD necessitou considerar valores de dispersão hidrodinâmica muito elevados, compatíveis com alto grau de heterogeneidade nas amostras. Já o ajuste do modelo ADTSM exigiu considerar que 70 a 80% dos sítios de sorção dos solos apresentariam sorção limitada cineticamente (não-equilíbrio). Ao final, o artigo discutiu um contexto de interpretação em que ensaios complementares são recomendados para ajudar a elucidar na escolha do modelo de transporte preferível para a interpretação dos dados de transporte de metais em solos tropicais, mostrando a necessidade de se estudar os fenômenos envolvidos, em condições controladas, de forma mais detalhada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borges, Y.I.S.; Ferrari, V.M.; Alves, L.Z.; Boscov, M.E.G. (2022). Modelagem matemática da cinética de sorção em solos estruturados e não-estruturados. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas - SP.

Borges, Y.I.S. (2024). Microestrutura de um latossolo compactado e o transporte de solutos em não-equilíbrio físico. Tese de doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo.

Boscov, M.E.G.; Hachich, W.C.; Mahler, C.F.; Oliveira, E. (2011). Properties of a lateritic red soil for pollutant containment. *Journal of Environmental Protection*, 2: 923-931, https://doi.org/10.4236/jep.2011.27105.

Cavalcante, A.L.B.; Santos, D.B.; Alcantara, D.V.; Garzón, M.C.O.; Souza, N.M.; Boscov, M.E.G. (2024). Coupled kinetics adsorption-desorption model applied to batch tests. *International Journal of Geomechanics*, 24(5), 04024067. http://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-8932.

Coelho, C.R.B. (2016). Estudo teórico e experimental de fluxo de água e transporte de solutos em equilíbrio e não-equilíbrio em solos tropicais. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.

Demuelenaere, R.G.A. (2004). Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), PUC Rio, Rio de Janeiro.

Gabas, S.G.; Sarkis, J.E.S.; Boscov, M.E.G. (2016). Heavy metal diffusion and retention in a mineral barrier of compacted lateritic soil. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 4:9-22.

Goltz, M.; Huang, J. (2017). Analytical Modeling of Solute Transport in Groundwater: Using Models to Understand the Effect of Natural Processes on Contaminant Fate and Transport, 1st Edition, John Wiley & Sons, NY, USA.

Guimarães, T.A. (2020). Estudo da cinética de sorção de metais em solo laterítico. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasilia, UnB.

Hemsi, P.S. (2024). Transporte de poluentes nos solos com exercícios resolvidos usando soluções analíticas. Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Hemsi, P.S.; Boscov, M.E.G.; Shackelford, C.D. (2002). Points of zero charge and adsorption for a Brazilian residual soil. In Proceedings of the 4th International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro. Balkema.

Juraj (2024). INVLAP, Numerical Inversion of Laplace Transforms in Matlab (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32824-numerical-inversion-of-laplace-transforms-in-matlab), MATLAB Central File Exchange.

Korf, E.P.; Melo, E.F.R.Q.; Thomé, A.; Escosteguy, P.A.V. (2008). Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de passo fundo–RS. *Revista de Ciências Ambientais*, 2(2): 43-60.

Nascentes, R.; Azevedo, I.C.D.; Matos, A.T.; Fontes, M.P.F.; Azevedo, R.F.; Guimaraes, L.M. (2008). Laboratory study on the mobility of heavy metals in compacted residual soil. *Soils and Rocks*, 31(1): 29-44. http://doi.org/10.28927/SR.311029

Ogata, A.E.; Banks, R. B. (1961). A solution of the differential equation of longitudinal dispersion on porous media. U.S. Geological Survey Professional Paper, 411-A.

Parker, J.C.; van Genuchten, M.T. (1984). Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Virginia Agricultural Experiment Station. Blacksbug: Virginia Polytechnic Institute and State University. 89p. Bulletin 87-3.

Shackelford, C.D. (2021). Fundamental considerations for column testing of engineered, clay-based barriers. *Third International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 9(10): 441-460, https://doi.org/10.3208/jgssp.v09.cpeg024

Stuermer, M.M.; Boscov, M.E.G.; Oliveira, E. (2008). Metal transport parameters of a gneiss saprolitic silty soil for liner design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1): 417-554. http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:4(509)

Thomé, A.; Korf, E.P.; Tímbola, R.S.; Consoli, N.C. (2013). Cadmium Transport Parameters in a Clayey Residual Soil with Different Values of Contaminant pH. *Soils and Rocks*, São Paulo, 36(3): 311-316.

van Genuchten, M.T.; Wierenga, P. J. (1976). Mass-transfer studies in sorbing porous-media .1. Analytical solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 40(4): 473-480.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/105

Mapeamento de Inundações com HEC-RAS no Rio São Francisco: trecho Pirapora–Buritizeiro (MG) e aplicações ao Planejamento Urbano

Marcus Vinícius Ramos de Souza
Discente em Engenharia Civil , IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcusramosdesouza@gmail.com

Breno Alcântara Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, breno.silva@ifnmg.edu.br

RESUMO: Em 2024, o aumento das temperaturas intensificou a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, com destaque para inundações urbanas influenciadas por fatores físicos e antrópicos. Este trabalho tem como objetivo simular e mapear áreas suscetíveis a inundações urbanas nos municípios de Pirapora e Buritizeiro (MG), utilizando modelagem hidrológica e hidráulica integrada a sistemas de informações geográficas. A metodologia compreendeu a estimativa de vazões máximas para diferentes períodos de retorno por meio de métodos estatísticos de valores extremos, com base em séries históricas fluviométricas. As vazões estimadas foram empregadas na modelagem hidráulica bidimensional no software HEC-RAS, considerando coeficientes de rugosidade de Manning e modelo digital de elevação em ambiente SIG. Foram gerados cenários de inundação para distintos tempos de retorno, resultando em mapas de manchas de inundação. Os resultados indicam maior extensão das áreas inundáveis no município de Pirapora em comparação a Buritizeiro, com ambos apresentando impactos significativos em bairros situados próximos ao leito do rio São Francisco. As análises evidenciam a influência da ocupação da planície fluvial na ampliação da vulnerabilidade urbana e reforçam a necessidade de integrar medidas estruturais e não estruturais ao planejamento territorial, visando à mitigação de riscos e ao aumento da resiliência urbana.

PALAVRAS-CHAVE: Hec-Ras, Inundação, Simulação, Modelagem, Pirapora, Buritizeiro.

ABSTRACT: In 2024, rising temperatures intensified the occurrence of extreme hydrological events, particularly urban flooding influenced by physical and anthropogenic factors. This study aims to simulate and map areas susceptible to urban flooding in the municipalities of Pirapora and Buritizeiro (MG), using hydrological and hydraulic modeling integrated with geographic information systems. The methodology involved estimating peak discharges for different return periods using extreme-value statistical methods based on historical fluviometric series. The estimated flows were applied in two-dimensional hydraulic modeling using HEC-RAS, considering Manning's roughness coefficients and a digital elevation model within a GIS environment. Flood scenarios were generated for multiple return periods, resulting in flood inundation maps. The results indicate a greater spatial extent of flood-prone areas in Pirapora compared to Buritizeiro, with both municipalities experiencing significant impacts in neighborhoods located near the main river channel of the São Francisco River. The analyses highlight the influence of floodplain occupation on increased urban vulnerability and emphasize the need to integrate structural and non-structural measures into territorial planning aimed at risk mitigation and enhanced urban resilience.

KEYWORDS: Hec-Ras, Flooding, Simulation, Modeling, Pirapora, Buritizeiro

1 INTRODUÇÃO

O ano de 2024 foi marcado por recordes de temperatura e pela intensificação de eventos hidrológicos extremos. Estima-se que as anomalias climáticas tenham provocado mais de 8.700 mortes, deslocado cerca de 40 milhões de pessoas e gerado prejuízos superiores a 550 bilhões de dólares. Entre os principais desastres,

destacaram-se as inundações, os deslizamentos de terra e os ciclones tropicais, fenômenos agravados pelo aumento das temperaturas globais, pelas mudanças no regime de chuvas e pela maior frequência de precipitações intensas. Esse quadro torna-se ainda mais crítico em regiões com infraestrutura deficiente e em áreas urbanas em expansão, onde o crescimento desordenado amplia os problemas de drenagem e a vulnerabilidade socioambiental, especialmente em países em desenvolvimento (Silva, 2018; Dijk, 2025).

A simulação hidrodinâmica integra fatores topográficos, hidrológicos e hidráulicos, permitindo representar o escoamento em múltiplas direções. Para isso, recomenda-se o uso de modelos bidimensionais ou tridimensionais, já que os unidimensionais apresentam limitações. O mapeamento de inundações pode ser feito a partir de registros diretos durante o evento, como medições, fotos e relatos, embora esse método seja restrito e não permita a definição de períodos de retorno. Outra alternativa é a modelagem hidrodinâmica, que utiliza modelos físicos ou matemáticos e deve ser calibrada com dados reais. A qualidade dos mapas está ligada à precisão do modelo digital de terreno e influencia diretamente os mapas de perigo (Giglio, Kobiyama, 2011; Monteiro, Kobiyama, 2013).

O SIG constitui uma ferramenta essencial para o mapeamento e a análise de áreas suscetíveis a inundações, permitindo a compreensão da dinâmica das cheias e contribuindo para a mitigação de seus impactos. As inundações figuram entre os desastres naturais de maior relevância socioeconômica, porém seus efeitos podem ser reduzidos por meio da modelagem hidráulica preventiva. Nesse contexto, o uso de algoritmos computacionais associados a softwares como o HEC-RAS possibilita a elaboração de mapas de risco integrados a ambientes SIG, com elevada precisão na identificação das áreas vulneráveis, inclusive em regiões de topografia complexa, sendo amplamente empregado em estudos de risco, previsões e reconstituição de eventos de inundação (Cabral et al., 2016; Huţanu et al., 2020; Peker et al., 2024; Engelhardt, Silva, Nobrega, 2024).

No Brasil, as inundações são recorrentes e frequentemente resultam em calamidades públicas, porém muitos municípios ainda não adotam medidas eficazes de gestão do risco. Mesmo com iniciativas institucionais pontuais, a avaliação dos prejuízos potenciais raramente é incorporada ao planejamento e aos investimentos em controle de cheias (Fadel, Marques, Goldenfum, 2018). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) (2002), a bacia do rio São Francisco possui cerca de 639 mil km² de área de drenagem, estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, além do Distrito Federal, o que corresponde a aproximadamente 7,5% do território brasileiro. Essa bacia é subdividida em unidades fisiográficas, destacando-se o Alto São Francisco, que se estende da nascente até o município de Pirapora e Buritizeiro, em Minas Gerais, e o Médio São Francisco, responsável por cerca de 55% da área total da bacia (Pereira et al., 2007).

Pirapora e Buritizeiro carecem de estudos que quantifiquem com precisão a magnitude das inundações provocadas por eventos extremos. Diante dessa lacuna, este trabalho tem como objetivo produzir mapas de mancha de inundação para os dois municípios, utilizando geotecnologias e modelos hidrológicos e hidráulicos do HEC-RAS, integrados em ambiente SIG, de modo a identificar regiões propensas a inundações e fornecer subsídios técnicos ao planejamento urbano e à tomada de decisão do Poder Público Municipal.

2 METODOLOGIA

Pesquisa aplicada, de natureza quantitativa, com abordagem descritivo-analítica baseada em modelagem computacional. A metodologia consistiu no levantamento de dados fluviométricos históricos e simulação hidrodinâmica de eventos de inundação por meio do software HEC-RAS.

2.1 Caracterização da região do estudo

A área de estudo compreende os municípios de Pirapora e Buritizeiro, localizados no norte do estado de Minas Gerais, às margens do rio São Francisco. Em conjunto, os dois municípios totalizam uma área territorial de 7.767 km², com população de 79.516 habitantes conforme o último censo, com densidade demográfica média de 10,24 hab/km². Os municípios configuram um conjunto urbano contíguo de relevância regional para o estado. A Figura 1 apresenta a localização geográfica dos municípios abordados.

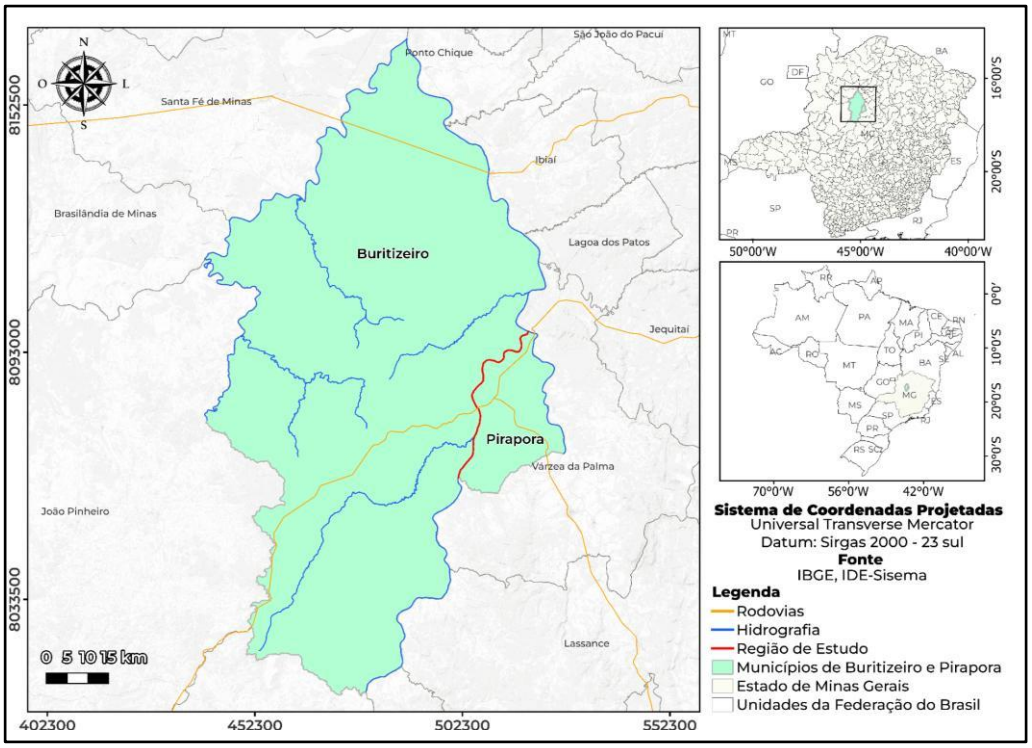


Figura 1. Localização dos municípios abordados no norte de Minas Gerais
Fonte: Autores, 2026

2.2 Levantamento de dados

Os dados de cota e vazão obtidos a partir do banco de dados HidroWeb, registrado pela estação Pirapora Barreiro (41135000), compreendem as vazões máximas anuais e as respectivas cotas fluviométricas observadas no período de 1969 a 2024, com exceção dos anos de 2015 a 2019, por haver meses sem dados de registro de vazões. A Tabela 1 mostra os dados usados para ajustar a curva-chave de cota-vazão.

Tabela 01 - Dados de cota-vazão extraído da Agência Nacional de Águas

Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)	Ano	Qmax (m³/s)	Cota (m)
1969	2121,68	292	1982	3815,34	367	1995	1526,02	266	2008	2482,68	319
1970	1743,09	272	1983	5648,92	428	1996	1635,95	273	2009	3357,28	354
1971	1477,66	257	1984	3049,24	337	1997	2569,53	321	2010	2012,79	297
1972	2450,20	305	1985	3550,10	357	1998	1619,99	272	2011	4429,13	390
1973	3540,66	353	1986	3319,83	348	1999	1464,13	259	2012	4301,07	386
1974	2064,83	291	1987	1453,05	258	2000	1987,89	288	2013	1856,55	289
1975	2082,50	292	1988	1656,59	270	2001	2226,17	300	2014	927,05	226
1976	1621,70	268	1989	4118,57	378	2002	2609,86	318	2020	3033,00	269
1977	2565,67	316	1990	1049,15	233	2003	1808,46	291	2021	1168,18	266
1978	3244,85	345	1991	3220,05	344	2004	1772,32	289	2022	3893,07	408
1979	6615,54	456	1992	4581,10	394	2005	3783,64	375	2023	2094,14	330
1980	5037,92	409	1993	2185,48	298	2006	4760,82	406	2024	1175,62	263
1981	2930,18	332	1994	3446,77	353	2007	4932,12	411			

Os dados de cota e vazão obtidos no banco HidroWeb foram organizados e submetidos ao processo de calibração da equação por meio de ajuste de regressão não linear, visando à minimização dos desvios entre os valores observados e estimados. Esse procedimento permitiu a correção de possíveis discrepâncias e a obtenção de uma relação contínua e representativa entre cota e vazão. Como resultado, foi estabelecida a curva-chave final utilizada nas etapas subsequentes de análise e modelagem hidráulica.

As vazões máximas associadas aos períodos de retorno analisados foram estimadas por meio da Distribuição de Valores Extremos do Tipo I (Gumbel), amplamente utilizada na hidrologia para a modelagem de cheias anuais máximas. O método estabelece uma relação linear entre a vazão extrema e os parâmetros estatísticos da série histórica, conforme expresso pela Equação (1), descrita por Subramanya (2008):

$$XT = \overline{x} + K \cdot \sigma n{-}1 \quad (1)$$

em que XT representa a vazão associada ao período de retorno T, $\overline{x}$ é a média da série de vazões máximas anuais, σ o desvio padrão amostral e K o fator de frequência, determinado em função do período de retorno e do tamanho da amostra. As vazões estimadas foram utilizadas como condições hidrológicas na modelagem hidráulica.

A adoção de intervalos de confiança permitiu avaliar a consistência estatística das vazões estimadas e as incertezas associadas à extrapolação para maiores tempos de retorno. A aplicação do método de Gumbel-Subramanya às séries hidrológicas de Pirapora e Buritizeiro resultou em estimativas mais robustas das vazões máximas anuais, utilizadas como dados de entrada na modelagem hidráulica no HEC-RAS. Essas vazões subsidiaram a simulação dos cenários de cheia e a delimitação das manchas de inundação associadas a cada período de retorno, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Vazões obtidas pela distribuição Gumbel-Subramanya

TR (anos)	Yt	Yn	Sn	k	Xt (Vazão m³/s)	Cota (m)
2	0,367	0,5489	1,1623	-0,1569	2580,81	322,27
5	1,5	0,5489	1,1623	0,8182	3847,71	374,58
10	2,25	0,5489	1,1623	1,4639	4686,51	403,75
15	2,674	0,5489	1,1623	1,8281	5159,76	418,87
20	2,97	0,5489	1,1623	2,0832	5491,11	428,97
30	3,384	0,5489	1,1623	2,4395	5953,98	442,5
35	3,541	0,5489	1,1623	2,5742	6129,01	447,45
40	3,676	0,5489	1,1623	2,6907	6280,31	451,67
45	3,795	0,5489	1,1623	2,7932	6413,55	455,33
50	3,902	0,5489	1,1623	2,8848	6532,58	458,57
60	4,086	0,5489	1,1623	3,0431	6738,27	464,08
70	4,241	0,5489	1,1623	3,1768	6911,92	468,65
80	4,376	0,5489	1,1623	3,2925	7062,18	472,55
90	4,494	0,5489	1,1623	3,3944	7194,62	475,95
100	4,6	0,5489	1,1623	3,4855	7313,02	478,96
110	4,696	0,5489	1,1623	3,5679	7420,06	481,66
120	4,783	0,5489	1,1623	3,6431	7517,75	484,1

2.3 Modelagem computacional

Com base nessas informações, o modelo permitiu a simulação do escoamento ao longo do sistema fluvial e a delimitação das manchas de inundação associadas a cada evento hidrológico, possibilitando a representação espacial das áreas suscetíveis a inundações e a análise da variação da lâmina d'água na planície fluvial. A geometria do sistema fluvial foi definida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), por meio

do módulo HEC-RAS Mapper, utilizando river lines, bank lines e flow paths para representar, respectivamente, o eixo do curso d'água, às margens do canal e os comprimentos hidráulicos nas áreas de inundação, garantindo uma caracterização geométrica consistente do sistema.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi atribuído com base no mapa de uso e ocupação do solo de Pirapora e Buritizeiro, sendo os valores definidos conforme o Manual de Referência Hidráulica do HEC-RAS, Tabela 3.1, de acordo com a cobertura predominante do terreno (Afzal et al., 2022). A Figura 2 apresenta o traçado adotado para o rio São Francisco.

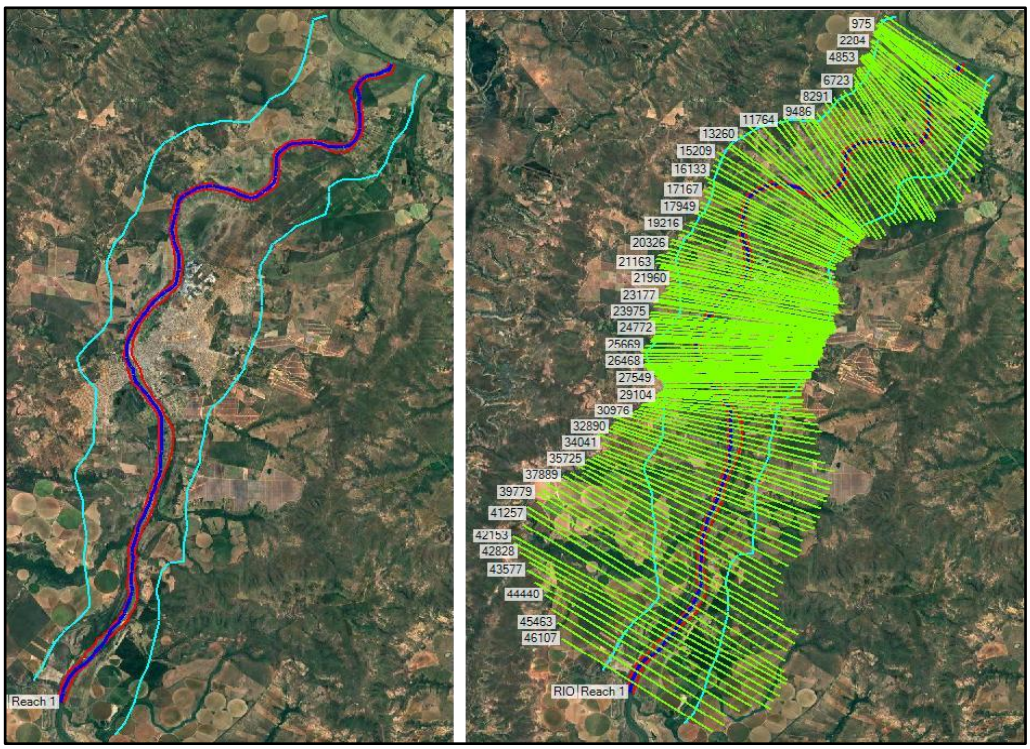


Figura 2. Elementos geométricos do modelo hidráulico no RAS Mapper
Fonte: Autores, 2026

As vazões de projeto foram inseridas no módulo Steady Flow Data do HEC-RAS, adotando-se a hipótese de escoamento permanente. As vazões associadas aos diferentes tempos de retorno foram definidas nos campos Profile Names and Flow Rates, de modo que cada perfil hidráulico representasse um cenário específico de cheia.

Como condições de contorno, adotaram-se, a montante, os níveis d'água correspondentes a cada vazão, e, a jusante, uma curva-chave que relaciona vazão e nível d'água, garantindo coerência hidráulica na propagação do escoamento e na obtenção das superfícies livres d'água utilizadas para a delimitação das áreas inundáveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ressalta-se que, do ponto de vista hidrológico, a estação Formoso (41130000) seria a mais indicada por estar a montante, porém a presença de longos períodos com falhas na série histórica inviabilizou sua utilização. Assim, optou-se pela estação Pirapora Barreiro (41135000), que apresentou dados mais completos e contínuos, conferindo maior confiabilidade às simulações hidráulicas. Os coeficientes de Manning foram estabelecidos com base no mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo, seguindo metodologia consolidada na literatura técnica e compatível com o nível de detalhamento adotado. Considera-se que, devido à variabilidade espacial das superfícies e às simplificações associadas à escala dos dados disponíveis, podem ocorrer pequenas variações locais nesses valores.

A delimitação espacial das áreas suscetíveis, associada à estimativa das profundidades da lâmina d'água, permite identificar zonas de maior vulnerabilidade e subsidiar ações de ordenamento urbano, definição de áreas prioritárias para mitigação de impactos e elaboração de planos de contingência para eventos de cheia. A Figura 3 apresenta o mapa da mancha de inundação gerado a partir da modelagem hidráulica, para um tempo de retorno de 120 anos, evidenciando a extensão espacial das áreas alagadas e a variação das profundidades associadas aos diferentes cenários de vazão analisados.

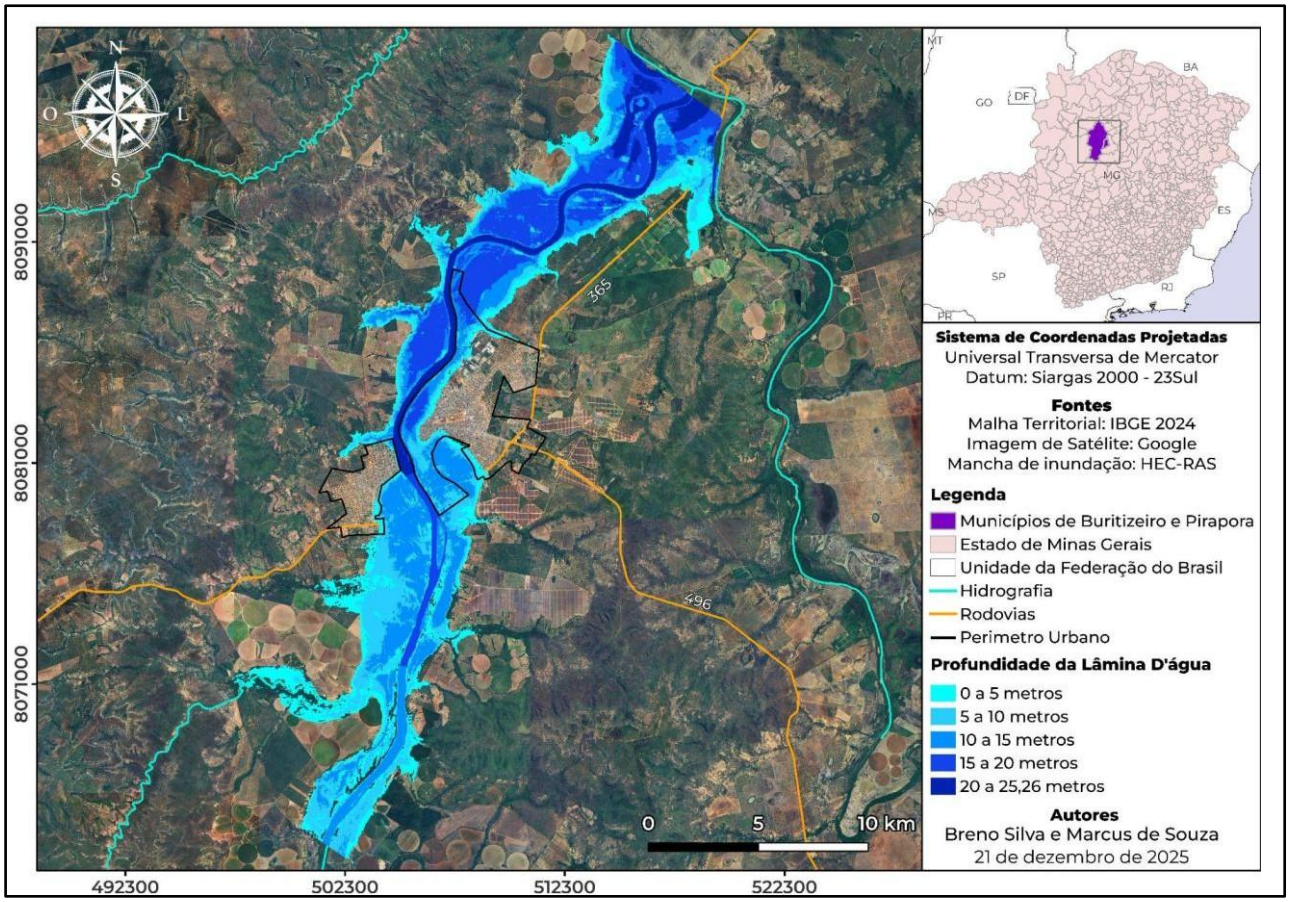


Figura 3. Simulação de Mancha de Inundação: Evento de 120 anos
Fonte: Autores, 2026

Os resultados indicam a formação de manchas de inundação com extensão superior a 3 km ao longo do trecho analisado, realçando a ampla propagação dos eventos de cheia e o potencial impacto sobre moradores urbanos e populações ribeirinhas de Pirapora e Buritizeiro. No município de Pirapora, as áreas potencialmente afetadas concentram-se nos bairros Distrito Industrial, São Francisco, Industrial, Pernambuco, Cinquentenário, Bom Jesus, Centro, Sagrada Família, Cidade Jardim, Nossa Senhora de Fátima e Santo Antônio, abrangendo tanto zonas residenciais quanto áreas com atividades produtivas. Em Buritizeiro, os bairros identificados como suscetíveis à inundação foram Vila Maria, Jardim dos Buritis, Vale do Sol e o Centro do município.

O planejamento urbano no município de Pirapora deve ser orientado por critérios técnicos rigorosos, sobretudo nas áreas localizadas ao norte do território municipal, que apresentam maior propensão à expansão urbana. A análise das manchas de inundação destaca que essa porção do município é majoritariamente composta por áreas com elevada suscetibilidade a eventos de cheia, o que impõe limitações significativas à ocupação antrópica. Nesse contexto, o crescimento urbano deve ser conduzido de forma planejada e cautelosa, priorizando o ordenamento do uso e ocupação do solo e a restrição de atividades incompatíveis com a dinâmica fluvial e hidráulica do sistema analisado. A Figura 4 apresenta os limites da urbanização e as manchas de inundação.

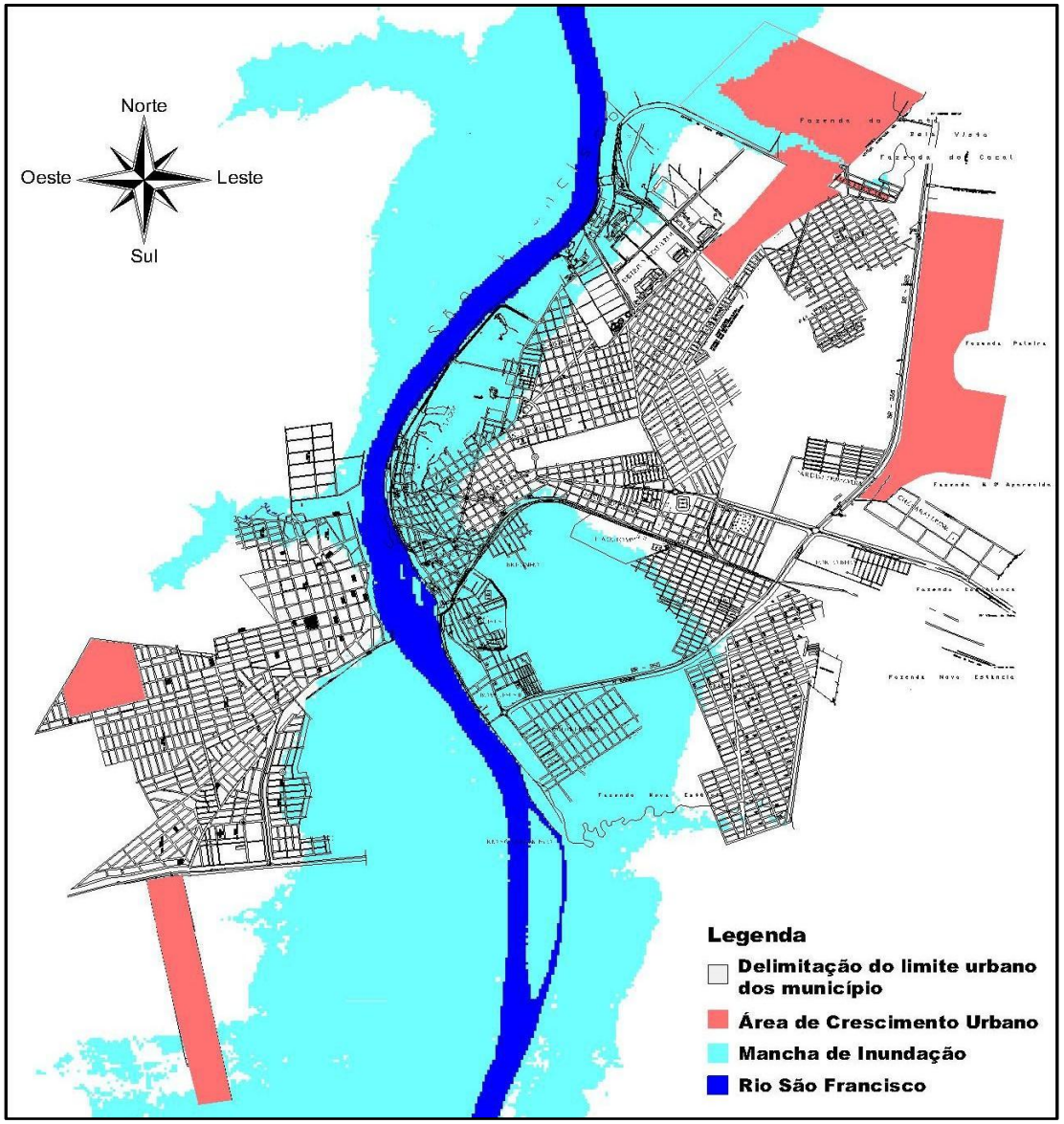


Figura 4. Relação entre a expansão da cidade e as áreas de risco
Fonte: Adaptado de Cardoso (2019); Prefeitura Municipal de Pirapora; Prefeitura Municipal de Buritizeiro.

4 CONCLUSÃO

Em consonância com o objetivo proposto, os mapas de manchas de inundação elaborados para os municípios de Pirapora e Buritizeiro, a partir da integração de geotecnologias e da modelagem hidrológica e hidráulica no HEC-RAS em ambiente SIG, permitiram identificar, de forma técnica e espacialmente detalhada, as áreas mais suscetíveis à ocorrência de inundações, fornecendo subsídios ao planejamento urbano e à tomada de decisão pelo Poder Público.

A análise comparativa indicou maior suscetibilidade à inundação em Pirapora, onde se concentram áreas urbanas inseridas na planície fluvial, abrangendo zonas residenciais, industriais e de uso misto. Em Buritizeiro, embora a extensão das áreas afetadas seja menor, foram identificados setores urbanos vulneráveis, especialmente nas proximidades do leito principal do rio, evidenciando a relação entre a ocupação histórica da planície aluvial, a baixa cota altimétrica e a exposição ao risco.

Do ponto de vista do ordenamento territorial, a sobreposição das manchas de inundação com os limites atuais e projetados da expansão urbana, sobretudo em Pirapora, indica a necessidade de revisão das diretrizes de uso e ocupação do solo, uma vez que a manutenção da ocupação em áreas de elevada suscetibilidade tende a intensificar os danos associados a eventos de cheia.

Em síntese, os resultados demonstram que a integração entre geotecnologias e modelagem hidráulica constitui um instrumento eficaz para a identificação de áreas suscetíveis à inundação e para a avaliação da magnitude espacial dos impactos associados a eventos extremos, contribuindo para o planejamento urbano e ambiental e para o fortalecimento da gestão do risco hidrológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio e Desenvolvimento do Ensino Tecnológico (FADETEC) pelo financiamento da pesquisa e ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), campus Pirapora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afzal, M. A. et al. Flood inundation modeling by integrating HEC–RAS and satellite imagery: a case study of the Indus River Basin. *Water*, v. 14, n. 19, p. 2984, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/w14192984.

ANA – Agência Nacional de Águas. *A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2002. 64p. Edição comemorativa do dia mundial da água.

Cabral, S. L. et al. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Granjeiro-CE. *Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 90-101, 2016. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/10994. Acesso em: 16 nov. 2025.

Cardoso, J. Layout De Limite Urbano - Pirapora Mg. Arquivo digital (DWG). Pirapora: Prefeitura Municipal de Pirapora, 2019.

Engelhardt, R. C. B.; Silva, A. F. da; Nobrega, S. L. da. Simulação de inundação utilizando software HEC-RAS e modelo de elevação MERIT, análise de situação em Boa Vista, Roraima, Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, *[S. l.]*, v. 17, n. 4, p. e6101, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.4-105. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/6101. Acesso em: 22 dez. 2025.

Fadel, A. W.; Marques, G. F.; Goldenfum, J. A. Mapeamento do risco de prejuízo como medida de gestão e adaptação às inundações. *Geociências*, v. 37, n. 1, 2018. DOI: 10.5016/geociencias.v37i1.11822.

Giglio, J. N.; Kobiyama, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. *In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,* 2011: Maceió Maceió: ABRH, Anais, 17p., 2011.

Gumbel, E. J. *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press, 1958.

Huţanu, E et al. Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*, v. 12, n. 6, p. 1624, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12061624.

Monteiro, L.R.; Kobiyama, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação, Rega 10 (2013) 13–35. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Monteiro-e-Kobiyama-2013-REGA.pdf

Peker, et al. Integração de HEC-RAS e HEC-HMS com GIS em modelagem de inundações e mapeamento de perigos de inundação. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 1226, 2024. DOI: 10.3390/su16031226.

Pereira, S. B.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. da; Ramos, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 615–622, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000600010.

Silva, C.. *Vulnerabilidades e desastres: reconstrução e resiliência*. 2018. Tese (Doutorado em Sociologia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018. Disponível em: https://dot.uff.br/wp-content/uploads/sites/476/2023/06/51-TESE-Claudia-THAUMATURGO-2018.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.

Subramanya, K. Engineering hydrology. 3. ed. New Delhi: McGraw-Hil, 2008.

Van Dijk, A., et al. *Global Water Monitor 2024*: Summary Report. Global Water Monitor Consortium, 2 jan. 2025. Disponível em: https://globalwater.online/globalwater/report/index.html. Acesso em: 19 out. 2025.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/106

Melhoramento com Cal de Solos Dispersivos da Planicie Costeira Sul do Rio Grande do Sul

Cezar Augusto Burkert Bastos
Docente, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande/RS, Brasil, cezarbastos@furg.br

Lisiane Moreira Ramis
Acad. Eng. Civil Empresarial, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande/RS, Brasil, lisianeramis@hotmail.com

Regis Pinheiro Maria
Eng. Civil, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande/RS, Brasil, regis.pinheiro@furg.br

Rinaldo José Basbosa Pinheiro
Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, rinaldo@ufsm.br

RESUMO: A dispersão dos solos é um fenômeno relevante na Geotecnia e na conservação ambiental, impactando a estabilidade estrutural e a integridade dos solos. Solos dispersivos possuem uma estrutura vulnerável à ação da água, o que resulta em fácil desagregação e transporte de partículas em suspensão. Como resultado, tem-se frequentemente processos erosivos acelerados em terrenos com solos dispersivos. Essa vulnerabilidade estrutural está associada a presença de íons de sódio trocáveis e a fatores como mineralogia da argila, pH e sais dissolvidos na água intersticial. Na Planície Costeira Interna do RS, a ocorrência de solos dispersivos é um desafio geotécnico reconhecido. Perfis com solos dispersivos são encontrados em terrenos das bordas de um terraço aluvionar, onde se tem a ocorrência de argilas sódicas em horizontes subsuperficiais. O artigo apresenta dados obtidos na caracterização geotécnica de solos dos horizontes pedogenéticos B e C presentes em terreno de um empreendimento de habitação social situado no município de Pelotas/RS, com destaque a avaliação da dispersibilidade pelo Crumb Test e pelo ensaio sedimentométrico comparativo, assim como apresenta os resultados obtidos com o melhoramento de tais solos com cal hidráulica. A cal promove a troca iônica do sódio pelo cálcio e é elemento reconhecido no melhoramento de solos dispersivos. Foi avaliado o efeito mitigador da dispersão nos teor de 2% de cal hidráulica. Os resultados confirmam que os solos são dispersivos e que 2% de cal hidraulica já inibe a dispersão, indicando a viabilidade técnica de seu emprego.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Dispersivos, Planície Costeira, Melhoramento com Cal, Ensaios de Laboratório.

ABSTRACT: Soil dispersion is a relevant phenomenon in geotechnics and environmental conservation, affecting the structural stability and integrity of soils. Dispersive soils have a structure vulnerable to the action of water, resulting in easy disaggregation and transport of suspended particles. As a result, accelerated erosion processes are frequently observed in terrains with dispersive soils. This structural vulnerability is associated with the presence of exchangeable sodium ions and factors such as clay mineralogy, pH, and dissolved salts in interstitial water. In the Inner Coastal Plain of Rio Grande do Sul, the occurrence of dispersive soils is a recognized geotechnical problem. Profiles with dispersive soils are found in terrains on the edges of an alluvial terrace, where sodic clays occur in subsurface horizons. This paper presents data obtained from the geotechnical characterization of soils from pedogenetic horizons B and C present in a social housing development located in the municipality of Pelotas/RS, highlighting the evaluation of dispersibility using the Crumb Test and the comparative sedimentometric test, as well as presenting the results obtained with the improvement of these soils using hydraulic lime. Lime promotes the ion exchange of sodium for calcium and is a recognized element in the improvement of dispersive soils. The mitigating effect on dispersion at a 2% hydraulic lime content was evaluated. The results confirm that the studied soils are dispersive and that 2% hydraulic lime already inhibits dispersion, indicating technical viability.

KEYWORDS: Dispersive Soils, Coastal Plain, Lime Improvement, Laboratory Tests

1 INTRODUÇÃO

A dispersão dos solos é um fenômeno em que as partículas finas do solo, especialmente de argila, se separam e dispersam na presença de água. Esse processo vem a ocorrer em solos com alto teor de sódio. É importante ressaltar que os processos erosivos relacionados à dispersão apresentam uma variedade de impactos, como a degradação dos terrenos e a instabilidade estrutural de maciços de solo (colapsos e rupturas em taludes), assim como podem vir a comprometer a funcionalidade e a durabilidade de obras de engenharia.

No sul do estado do Rio Grande do Sul, particularmente em terraços aluvionares da Planície Costeira Interna, a ocorrência de solos dispersivos é um desafio reconhecido. Nesse sentido, esse estudo tem como foco um estudo de caso, no terreno das unidades habitacionais do Projeto XXV de Julho, em Pelotas/RS.

O objetivo principal da pesquisa foi estudar os processos erosivos que se manifestam no local, como em taludes de corte e platôs de terraplanagem, e investigar em laboratório o potencial efeito de uma técnica de melhoramento de solos para mitigação dos problemas. No local foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes pedogenéticos B e C para avaliar a dispersibilidade, por meio do ensaio sedimentométrico comparativo e do ensaio do torrão (Crumb Test). Como potencial técnica de remediação dos processos erosivos por dispersão de solos, foi avaliado o melhoramento físico-químico com o uso da cal hidráulica. A cal promove a troca iônica do sódio pelo cálcio e é elemento reconhecido no melhoramento de solos dispersivos. O efeito secundário da cal sobre outras propriedades do solo de importância para fins da obra em questão foi investigada por Ramis (2025). Com esse estudo de caso, busca-se contribuir com o avanço no conhecimento para minimização dos impactos da erosão em obras de engenharia e em áreas degradadas envolvendo os solos dispersivos da região.

2 SOLOS DISPERSIVOS

A dispersão dos solos é associada à presença de íons sódio trocáveis em sua estrutura (Figura 1), e sua ocorrência resulta da interação de múltiplos fatores, incluindo mineralogia, pH, teor de umidade, composição química das argilas e concentração de sais dissolvidos na água intersticial (Umesh et al., 2011). A dispersão de um solo ocorre quando partículas finas do solo, especialmente de argila, desagregam e dispersam na presença de água. Esse fenômeno ocorre em solos caracterizados pela Pedologia como sódicos ou solódicos.

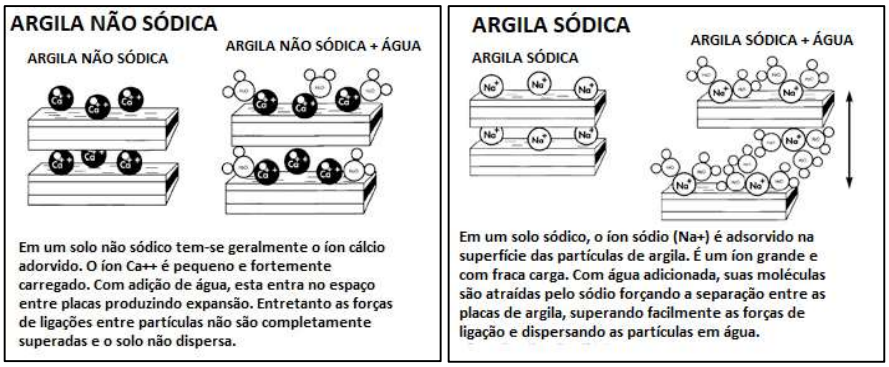


Figura 1. Dispersão dos solos associada à presença de íons sódio (Anon, 1999 apud Hardie, 2009)

Portanto, os solos dispersivos caracterizam-se pela instabilidade micro-estrutural das partículas finas quando em contato com a água, levando a elevada suscetibilidade à erosão mesmo sob baixos gradientes hidráulicos. A dispersão das partículas de argila favorece o carreamento de finos pela água, resultando em fenômenos como erosão interna (piping) e formação de ravinas e voçorocas, levando ao comprometimento da estabilidade de taludes e de obras de terra.

Na Planície Costeira Interna Sul do Rio Grande do Sul, a ocorrência de solos dispersivos é recorrente e tem sido associada a problemas em obras de infraestrutura urbana e rural, sistemas de drenagem pluvial e na implantação de loteamentos urbanos. Maria et al. (2024) destacam que a não identificação desse comportamento contribui para a intensificação dos processos erosivos e para o consequente aumento no custo das obras (p.ex. custos de terraplanagem e instalação de redes de água e esgoto), reforçando a importância da caracterização adequada do solo antes do início das obras.

Existem diferentes métodos para a identificação da dispersibilidade dos solos, a começar pelo reconhecimento em campo e partindo para ensaios de laboratório qualitativos e quantitativos, onde entre os mais usuais estão o Crumb Test, Pinhole Test e o ensaio sedimentométrico comparativo. Esses ensaios podem ser associados a análises químicas, como a determinação da porcentagem de sódio trocável, possibilitando uma avaliação mais precisa do potencial dispersivo do solo, pois, a dispersibilidade está diretamente relacionada ao desequilíbrio eletroquímico no complexo de troca catiônica e ao aumento das forças repulsivas entre partículas de argila (Sherard et al., 1976).

São aspectos característicos da erosão em solos dispersivos o rápido, profundo e regularmente espaçado sulcamento da superfície de solo exposto e a notória remoção dos finos do solo, com deposição destes nos caminhos de drenagem, conforme ilustrado na Figura 2a. Outra característica marcante de processos erosivos envolvendo solos dispersivos é a presença de finos em constante suspensão em poças ou cursos de água naturais ou artificiais próximos, conforme Figura 2b.

(a)  (b) 

Figura 2. Erosão em solos dispersivos: (a) sulcamento colunar em taludes de corte; (b) finos em suspensão

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na Planície Costeira Interna Sul do Rio Grande do Sul, especificamente no terreno das unidades habitacionais do Projeto XXV de Julho, na cidade de Pelotas/RS. É um empreendimento imobiliário de habitação social do Programa Minha Casa Minha Vida, do governo federal do Brasil.

O empreendimento fica localizado na transição entre as planícies alta e baixa de um terraço aluvionar da Planície Costeira, onde se manifestam graves processos erosivos, principalmente quando modificada a estrutura do perfil pedogenético e/ou retirada da cobertura vegetal por ação antrópica, como foi o caso da construção do loteamento. O terreno apresenta processos erosivos intensos e acelerados desde o início de sua terraplanagem. As erosões por sulcos e ravinas atingem os lotes, o arruamento e os taludes lindeiros, prejudicando o andamento das obras e com perspectiva de gerar persistentes problemas aos futuros moradores. A Figura 3 ilustra as obras e os processos erosivos presentes.

(a)  (b) 

Figura 3. (a) Processos erosivos junto às unidades habitacionais comprometendo obras de drenagem pluvial; (b) Ao fundo talude fortemente erodido

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) constitui-se na mais ampla planície costeira do Brasil, possuindo uma área de aproximada de 33.000 km² e alcançando, em alguns setores, larguras superiores a 100 km, possibilitando preservar o registro geológico e geomorfológico do Cenozóico e, em especial, do Quartenário. Durante o Quarternário, a PCRS desenvolveu um amplo leque de sistemas aluviais, situados em sua parte mais interna, próximo das áreas-fonte e do acréscimo lateral de quatro sistemas deposicionais do tipo Laguna-Barreira (Villwock e Tomazelli, 1995).

Na Planície Continental e Costeira Interna são mapeadas duas unidades referentes ao Sistema de Leques Aluviais e sete unidades associadas ao Sistema Laguna-Barreira (Xavier, 2017). O empreendimento tem seu terreno na transição do terraço da unidade depósitos de leques aluviais (dla), a qual ocupa quase 50% da área urbana de Pelotas/RS, com a planície baixa aluvionar (da) (Figura 4). Os depósitos de leques aluviais têm sua formação a partir dos depósitos sedimentares originários, principalmente do segundo evento transgressivo regressivo pleistocênico, que corresponde ao primeiro estágio na evolução do Complexo de Barreiras Múltiplas (Villwock e Tomazelli, 1995). Seus sedimentos são compostos, principalmente por areias finas, síltico-argilosas, pobremente selecionadas e de coloração creme, laminação plano-paralela incipiente, com concreções carbonáticas e ferro-manganíferas. Os depósitos de leques aluviais apresentam-se totalmente retrabalhados em ambiente marinho e lagunar, durante os eventros transgresivos pleistocênicos, o que explica os teores de sódio presentes junto aos minerais de argila nos sedimentos.

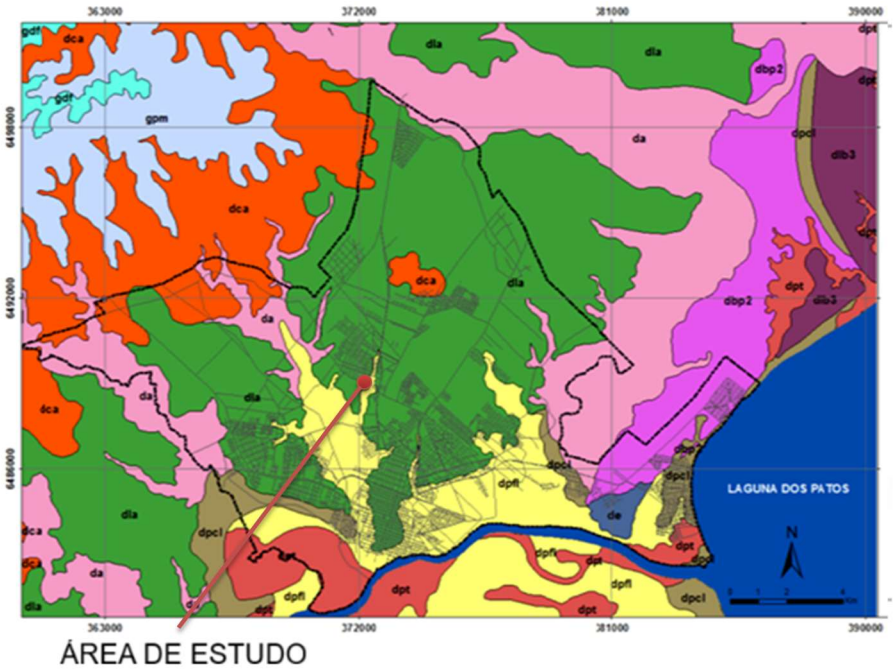


Figura 4. Recorte do mapa geológico de Pelotas (modificado de Xavier, 2017) e indicação da área de estudo

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Trabalho de campo e amostragem

Foi realizado trabalho de campo para identificação e registro dos processos erosivos, caracterizando as feições erosivas e materiais envolvidos. Cabe destacar que os processos erosivos já haviam sido inicialmente identificados em investigações pretéritas, realizadas nos anos de 2019 e 2023 (Maria et al., 2024).

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes pedogenéticos B e C junto ao talude lindeiro ao loteamento, conforme ilustrado na Figura 5. As amostras deformadas foram coletadas para realização dos ensaios laboratoriais de análise granulométrica, determinação dos limites de Atterberg, ensaio sedimentométrico comparativo e Crumb Test.



Figura 5. Amostragem dos horizontes B e C em talude de corte

4.2 Caracterização geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados segundo as normas brasileiras: NBR 6457/2024 (Amostras de Solos – Preparação de Amostras para Ensaios de Compactação e Caracterização e Determinação de Umidade), NBR 7181/2025 (Solo – Análise Granulométrica), NBR 6459/2025 (Solos - Determinação do Limite de Liquidez) e NBR 7180 (Solos – Determinação do Limite de Plasticidade).

4.3 Ensaios para avaliação da dispersibilidade

Para avaliação da dispersibilidade foram realizados Crumb Tests (ensaios do torrão), segundo NBR 13601/2020, e ensaios sedimentométricos comparativos, pela NBR 13602/2020.

No Crumb Test, um torrão de pequenas dimensões é submetido a imersão em água destilada e registra-se qualitativamente o comportamento apresentado pelo mesmo sob efeito da água (p.ex. desboroamento, fragmentação, formação de nuvem coloidal). O Grau de Dispersibilidade é conferido conforme a Figura 6. Os ensaios Crumb Test foram realizados com os torrões dos solos na condição natural (agregados coletados no talude) e também obtidos de corpos de prova compactados (sem e com melhoramento com cal).

No ensaio sedimentométrico comparativo se compara o teor de argila (neste caso < 0,005mm) avaliado com e sem agente defloculante no ensaio de sedimentação. Define-se como Porcentagem de Dispersão (% dispersão) a relação porcentual entre teor de argila sem e com agente defloculante.

Grau	Comportamento
1	**Comportamento não dispersivo:** o torrão de solo pode absorver água, sofre esborroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido;
2	**Comportamento levemente dispersivo:** há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão;
3	**Comportamento moderadamente dispersivo**: observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos espalhando-se no fundo do béquer;
4	**Comportamento fortemente dispersivo:** observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.

Figura 6. Graus de dispersibilidade pelo Crumb Test segundo a NBR 13601/2020

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização Geotécnica

As frações granulométricas (segundo NBR 6502/2022), o peso específico dos grãos e os limites de Atterberg são apresentados na Tabela 1. A Figura 7 apresenta as curvas granulométricas das amostras com e sem o uso de defloculante.

Tabela 1. Resultados dos ensaios para caracterização geotécnica

Amostra	Pedregulho (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	γ_s (kN/m^3)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Hor.B cd	3	9	9	18	29	32	26,3	43	19	24
Hor.B sd	3	10	11	13	43	20				
Hor.C cd	4	8	9	18	28	33	26,4	36	20	16
Hor.C sd	4	10	10	17	29	30				

Hor. B: Horizonte B; Hor. C: Horizonte C; cd: com defloculante; sd: sem defloculante; γs: peso específico real dos grãos; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade.

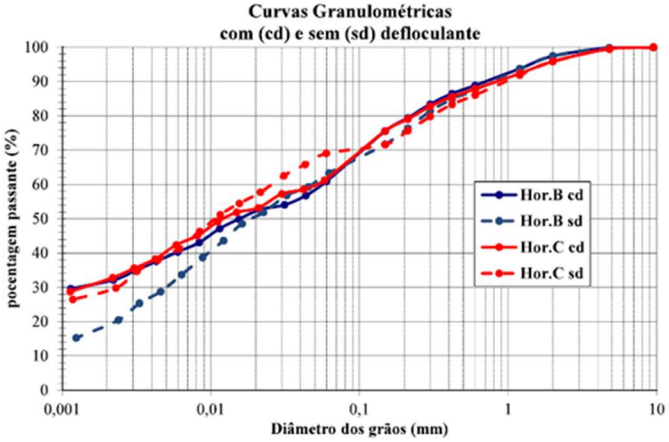
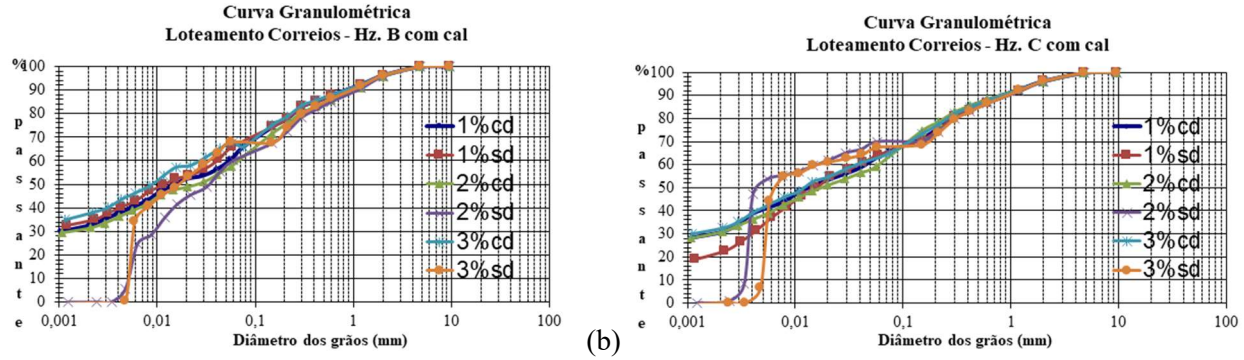


Figura 7. Curvas granulométricas dos solos

Os solos são caracterizados texturalmente como areias silto-argilosas. Entretanto, as significativas porcentagens passante na peneira 200 (maior que 50%) definem os solos dos dois horizontes como finos. Com valores de IP > 15% são considerados altamente plásticos. Pelo Sistema Unificado de Classificações dos Solos (SUCS), os solos dos horizontes B e C são classificados como CL (solos argilosos de baixa compressibilidade).

O efeito da cal na floculação das partículas dos solos foi avaliado a partir de análises granulométricas com a adição de 1%, 2% e 3% de cal hidráulica comercial em peso seco (Figura 8). Percebe-se que o teor de 2% é suficiente para promover a agregação das partículas finas dos solos. Logo, foi o teor adotado nesse estudo.



(a) (b)

Figura 8. Curvas granulométricas dos solos melhorados com diferentes teores de cal

4.2 Dispersibilidade dos solos e sua mitigação com o melhoramento com cal

A Tabela 2 sumariza os resultados obtidos nos Crumb Tests nas três condições (natural, compactado sem cal e compactado com 2% de cal). Tempos de cura da cal de 7 e 28 dias foram adotados. A título de ilustração, a Figura 9 mostra ensaios de Crumb Test com os solos dos horizonte B e C.

Tabela 2. Resultados dos Crumb Tests.

	Condição	Grau de Dispersão
Hz. B	Natural	3 – moderadamente dispersivo
	Compactado sem cal	1 – não dispersivo
	Compactado com cal – 7 dias	1 – não dispersivo
	Compactado com cal – 28 dias	1 – não dispersivo
Hz. C	Natural	4 – altamente dispersivo
	Compactado sem cal	4 – altamente dispersivo
	Compactado com cal – 7 dias	1 – não dispersivo
	Compactado com cal – 28 dias	1 – não dispersivo

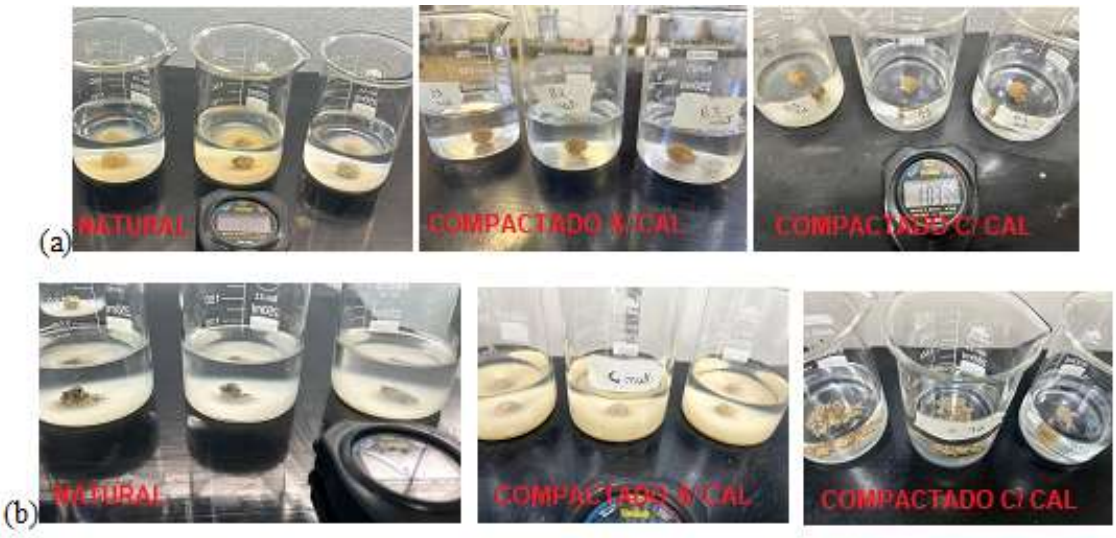


Figura 9. Crumb Tests com solos dos (a) horizonte B e (b) horizonte C

O solo do horizonte B, na condição natural, apresenta grau de dispersão 3 (moderadamente dispersivo), onde é observada uma reação moderada, com uma nuvem de suspensão coloidal nitidamente visível ao redor do torrão. Após a compactação do corpo de prova, ou seja, ainda sem a adição de cal, o ensaio já mostrou grau de dispersão 1 (não dispersivo). Logo, para o horizonte B, apenas a compactação foi o suficiente para mitigar esse problema de dispersibilidade. A adição de cal manteve a avaliação positiva. Já para o horizonte C, na condição natural o solo apresenta grau de dispersão 4 (altamente dispersivo), onde é observada uma reação forte com uma nuvem de suspensão coloidal. Após a compactação do corpo de prova foi observado que o comportamento se manteve o mesmo, mas após o tratamento com 2% de cal, na condição de cura em 7 dias, o grau de dispersão passou a ser 1 (não dispersivo). Logo, para o horizonte C o tratamento com cal foi fundamental para mitigar o problema de dispersão.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios sedimentométricos comparativos dos solos dos horizontes B e C, com e sem adição da cal hidráulica (no teor de 2%). Segundo critério explicitado na norma do ensaio, uma % de dispersão acima de 50% já caracteriza o solo como erodível por dispersão. Logo, a adição de 2% de cal já reverte a expectativa de se ter erosão associada à dispersão natural dos solos estudados.

Tabela 3. Resultados dos ensaios sedimentométricos comparativos.

Amostra	Condição	Argila (%)	Condição	Argila (%)	% dispersão
Hz.B – natural	cd	35	sd	30	77%
Hz.B - 2% cal	cd	32	sd	0	0%
Hz.C - natural	cd	41	sd	39	95%
Hz.C - 2% cal	cd	28	sd	1	3%

5 CONCLUSÕES

A pesquisa conduzida atingiu seus objetivos ao estudar os processos erosivos decorrentes do fenômeno de dispersão dos solos que se manifestam no empreendimento habitacional XXV de Julho, em Pelotas/RS, bem como investigar em laboratório o potencial efeito de uma técnica para mitigação do problema, o melhoramento com cal. A análise granulométrica, realizada com diferentes teores de cal hidráulica comercial, permitiu definir o teor de 2% em peso como o mínimo capaz de produzir a completa floculação das partículas finas dos solos dos dois horizontes. O Crumb Test realizado com solos compactados dos horizonte B e C, sem e com cal, em tempos de cura de 7 e 28 dias, mostraram que o melhoramento com cal reduz o grau de dispersão para 1 (não dispersivo). A reversão da dispersão através do melhoramento com 2% de cal foi também confirmada com o ensaio sedimentométrico comparativo, com porcentagem de dispersão de no máximo 3% verificada no solo do horizonte C melhorado com cal.

Logo, é possível concluir que o comportamento dispersivo dos solos estudados são identificados por ensaios de laboratório indicados por normas brasileiras (Crumb Test e ensaios sedimentométrico comparativo) e que o melhoramento com 2% de cal mitiga o problema. Cabe ainda destacar que com o melhoramento com cal existirá o ganho secundário em outras propriedades geotécnicas de interesse para obras dessa natureza (aumento em capacidade de suporte, resistências ao cisalhamento e à compressão simples e rigidez e a redução na expansibilidade), como foi registrado e discutido no trabalho ampliado conduzido por Ramis (2025).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos responsáveis pela obra por permitirem as atividades de investigação e à FAPERGS pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hardie, M. (2009) *Dispersive Soils and their Management - Technical Reference Manual*. Department of Primary Industries and Water of Tasmania. 1996.

Maria, R. P.; Bastos, C. A. B. ; Pinheiro, R. J. B.; Rodrigues, L. C. (2024) *Avaliação expedita do potencial dispersivo de perfil de solo pertencente à Planície Interna Costeira Sul do Rio Grande do Sul*. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais... ABMS: Balneário Camboriú/SC, 2024.

Ramis, L. M. (2025) *Caracterização de Solos Dispersivos e Técnica de Estabilização – estudo de caso Projeto XXV DE JULHO - Cooperativa Habitacional dos Correios – Pelotas/RS*. Projeto de Graduação em Engenharia Civil Empresarial. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. 91p. 2025.

Sherard, J. L.; Dunnigan, L. P.; Decker, R. S.; Steele, E. F. (1976) Pinhole test for identify dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v 102, p. 65-85, 1976.

Umesh, T.S.; Dinesh, S.V.; Sivapullaiah, P.V. (2011) Characterization of dispersive soils. *Materials Sciences and Applications*, v. 2, p.629-633, 2011.

Villwock, J. A.; Tomazelli, L. J. (1995) *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul*. Notas Técnicas. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 8. p. 1-45, 1995.

Xavier, S.C. (2017) *Mapeamento geotécnico aplicado ao planejamento do uso e ocupação do solo da cidade de Pelotas/RS - estudo voltado à expansão urbana*. Tese de Doutorado - UFRGS. Porto Alegre, 339p. 2017.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/107

MELHORAMENTO DE SOLO ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CÍVIL NO BRASIL: REVISÃO SISTEMÁTICA

Mailson Augusto Almeida Cartaxo
Egresso do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, mailsoncartaxo@gmail.com

Juliette Macena de Souza
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, juliette-souza@hotmail.com

Jucimara Cardoso da Silva
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, jucimara.engenhariacivil@gmail.com

Luiz Henrique de Lima Aureliano
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, luizlima.ec@gmail.com

Sonaly Mendes Arruda
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, sonaly_mendes@hotmail.com

Carina Silvani
Doutora Professora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

RESUMO: Dentre as técnicas de melhoramento de solo as que utilizam agregados mostram-se como boa opção para solos que apresentam baixa capacidade de suporte, e o RCD vem se tornando esse material que além de agregado, é reutilizado e de grande disponibilidade, contribuindo para o alcance da ODS 11 estabelecida na Agenda 2030, que prioriza a seguridade e sustentabilidade das construções. Nesse contexto, a presente pesquisa objetiva identificar as tendências do uso de RCD no melhoramento de solo no Brasil através de estudos acadêmicos nos últimos dez anos. A pesquisa foi realizada nos moldes da revisão sistemática, mais especificamente pelo método Systematic Search Flow (SSF), que consiste na definição das plataformas de coleta dos trabalhos científicos nos últimos dez anos, que foram a CAPES E COBRAMSEG, em seguida avaliou-se todos os trabalhos que assemelhavam com o tema de estudo, o que elimina o viés do autor. De todos os trabalhos avaliados, encontrou-se 34 trabalhos científicos que discutiam a estabilização do solo através de misturas solo-RCD. Os estudos envolvendo as misturas de solo RCD vem crescendo nos últimos dez anos, alcançando o maior número em 2018, com 14 produções acadêmicas, com posição de destaque para o Nordeste com 14 publicações. Foram identificadas as finalidades de pavimentação, filtro de barragens e aterro sanitário para as misturas solo-RCD avaliadas por 19 tipos de ensaios distintos, com 94% dos resultados acenando positivamente para o uso do RCD na estabilização dos solos. Como conclusões gerais os estudos realizados com resíduos de construção e demolição apontam para a viabilidade do reuso do RCD visando substituir recursos naturais, escassos, diminuir a deposição ilegal de resíduos sólidos, e até mesmo melhorar propriedades geotécnicas dos materiais usados nas obras.

Palavras-chave: Estabilização de solo, RCD, Sustentabilidade, Systematic Search Flow.

ABSTRACT: Among soil improvement techniques, those that use aggregates have proven to be a good option for soils with low bearing capacity, and C&D waste is becoming that material which, in addition to being an aggregate, is reused and widely available, contributing to the achievement of SDG 11 established in the 2030 Agenda, which prioritizes the safety and sustainability of buildings. In this context, the present research aims to identify trends in the use of recycled construction and demolition waste (RCD) for soil improvement in Brazil through academic studies over the last ten years. The research was conducted using the systematic review method, more specifically the Systematic Search Flow (SSF) method, which consists of defining the platforms for collecting scientific works from the last ten years, which were CAPES and COBRAMSEG, and then evaluating all works that were similar to the study topic, thus eliminating author bias. Of all the studies evaluated, 34 scientific papers discussed soil stabilization through soil-CDW mixtures. Studies involving soil-CDW mixtures have been growing in the last ten years, reaching the highest number in 2018, with 14 academic productions, with the Northeast region standing out with 14 publications. The purposes of paving, dam filtration, and sanitary landfill for soil-CDW mixtures evaluated by 19 different types of tests were identified, with 94% of the results indicating a positive use for CDW in soil stabilization. In general conclusions, the studies carried out with construction and demolition waste point to the viability of reusing CDW to replace scarce natural resources, reduce illegal dumping of solid waste, and even improve the geotechnical properties of materials used in construction.

Keywords: Soil stabilization, C&D waste, Sustainability, Systematic Search Flow.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, as soluções adotadas para solos com baixa capacidade de suporte podem, frequentemente, ser onerosas e inviáveis, a depender do porte do empreendimento. Por isso, um dos grandes desafios da Engenharia Geotécnica atual é encontrar formas mais econômicas de resolver os problemas de estabilização de solos em obras de fundações superficiais, pavimentação e barragens (DALLA ROSA, 2009).

Embora solos granulares sejam ideais para obras de engenharia por sua estabilidade e alta resistência mecânica, é comum não deparar-se com esse tipo de solo nas áreas em que se deseja construir. Nesses casos, técnicas de melhoramento são essenciais para garantir a segurança da construção em terrenos menos favoráveis.

Dentre as técnicas de melhoramento de solo, a estabilização granulométrica com adição de agregados mostra-se como boa opção para solos que apresentam baixa capacidade de suporte (LEITE et al., 2016). Segundo Silva et al. (2019) um material que pode tornar-se agregado, reutilizado e de grande disponibilidade, que vem sendo utilizado no melhoramento de solos são os Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

O Brasil é um grande gerador de RCD, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), que observou que os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCD em 2017. A ABRELPE destaca ainda que a quantidade total de RCD gerado é maior que o contabilizado, uma vez que os municípios coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

Os RCD podem ser aplicados como agregados reciclados após passar por um processo de beneficiamento. Os agregados reciclados de RCD têm sido empregados em diversas áreas da construção civil de maneira satisfatória, inclusive no reforço de solos, por meio de sua estabilização granulométrica, proporcionando a estas menores deformações e melhores características resistentes (SILVA et al., 2019).

Diversos estudos apontam melhoria dos solos através da adição de RCD. Santos (2007), ao avaliar a aplicação de diferentes teores de agregado reciclado de RCD em estruturas de solo reforçado, como material de preenchimento, observou que o solo apresentou maior resistência mecânica quando comparado ao solo

puro. Ferreira e Thomé (2011) observaram que através do uso do RCD, foi possível aumentar a capacidade de carga de um solo residual de basalto, bem como reduzir seu recalque. Dias (2014), utilizou agregados reciclados de RCD misturados a um solo tropical. Os resultados mostraram que o acréscimo de RCD ao solo melhorou o comportamento hidromecânico do solo, evidenciando-se como uma alternativa viável e econômica para uso do melhoramento dos solos destinados às obras de engenharia.

A busca por opções que proporcionem a melhoria das características de solos para serem aplicados em atividades de construção, assim como a adequada destinação dos resíduos RCD's justificam as pesquisas que envolvam o uso destes no melhoramento de solos. Estas pesquisas contribuem também para o alcance do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável ODS 11 estabelecido na Agenda 2030, que prioriza a seguridade e a sustentabilidade das construções. Nesse contexto, a presente pesquisa objetivou ampliar a diversidade de parâmetros geotécnicos, catalogar resultados para fornecer embasamento para soluções práticas, através de uma revisão sistemática sobre uso de RCD no melhoramento de solo no Brasil através de estudos acadêmicos nos últimos dez anos.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão sistemática da literatura, essa metodologia foi aplicada para identificar, selecionar e avaliar criticamente estudos relevantes referente ao tema aqui estudado, garantindo maior confiabilidade aos resultados e permitindo identificar lacunas na produção científica que podem orientar pesquisas futuras. Para condução da revisão sistemática foi adotado o método Systematic Search Flow (SSF), proposto por Farenhof e Fernandes (2016). O método é estruturado em fases que envolvem o mapeamento do campo de estudo, pesquisa exaustiva da literatura, avaliação da qualidade dos trabalhos, extração e síntese dos dados e, por fim, a elaboração do texto científico.

Inicialmente foi definido o protocolo de pesquisa, estabelecendo-se a temática do estudo: produções científicas brasileiras relacionadas ao uso de resíduos de construção e demolição (RCD) no melhoramento de solos. Em seguida foram selecionadas as bases de dados utilizadas para coleta das informações. As fontes escolhidas foram o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES e os anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), por representarem grande parte da produção científica nacional na área de geotecnia.

Posteriormente, foi definido um recorte temporal entre os anos de 2010 e 2019, com o objetivo de identificar as publicações mais recentes sobre o tema. Na plataforma CAPES, a busca foi realizada por meio de filtros como palavras-chave relacionadas ao tema (RCC, RCD e resíduos de construção), grande área de conhecimento (Engenharias), área de conhecimento (Engenharia Civil) e áreas de concentração associadas à geotecnia e gerenciamento de resíduos. Já nos anais do COBRAMSEG, foi realizada a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos disponíveis nos eventos do período analisado.

Em seguida, foi realizada a etapa de filtragem, na qual foram analisados os resumos dos trabalhos encontrados, excluindo aqueles que não apresentavam relação direta com o tema da pesquisa. Ao todo foram identificadas 3417 produções científicas, das quais 48 trabalhos foram inicialmente selecionados por apresentarem maior afinidade com a temática. Em seguida, procedeu-se à leitura completa desses estudos, resultando na seleção final de 34 trabalhos científicos considerados representativos para a análise.

Na fase de análise dos dados, as informações extraídas dos trabalhos selecionados foram organizadas em uma base de dados no software Excel. Foram coletadas variáveis como ano de publicação, região e estado onde a pesquisa foi realizada, tipo de solo estudado, finalidade da mistura solo-RCD, tipo e beneficiamento do resíduo, ensaios realizados e principais resultados obtidos. Essa organização permitiu identificar padrões, tendências e lacunas nas pesquisas relacionadas ao uso de RCD no melhoramento de solos no Brasil.

Por fim, realizou-se a síntese das informações obtidas, consolidando os resultados e permitindo uma visão geral da produção científica sobre o tema. A última etapa consistiu na redação do trabalho científico, apresentando as tendências identificadas, as aplicações do RCD em obras geotécnicas e as principais contribuições dos estudos analisados para o avanço do conhecimento na área.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição dos trabalhos encontrados. Os anos apresentados em sua maioria são anos pares, pois o COBRAMSEG é realizado em anos pares. Os trabalhos obtidos, nas bases do COBRAMSEG e CAPES possuem uma distribuição mais concentrada nos anos de 2016 e 2018, registrando o maior número de publicações no ano de 2018. A linha de frequência acumulada da Figura 1 mostra o crescimento das publicações envolvendo o uso do RCD no melhoramento do solo ao longo dos anos, com crescimento acentuado entre os anos de 2014 e 2016.

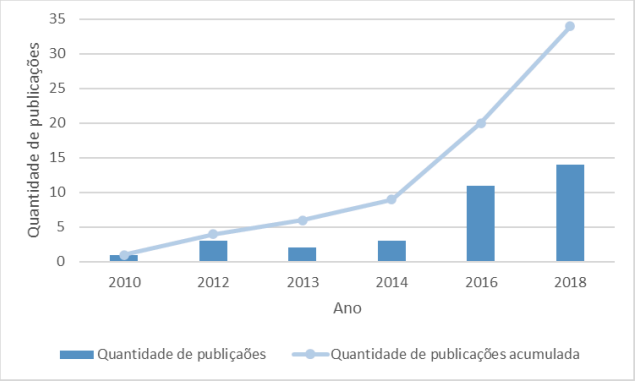


Figura 1. Linha do tempo, publicações por ano
Fonte: Cartaxo (2020).

Pode-se entender o crescimento de publicações devido a três principais motivos: crescimento da construção civil no Brasil na última década, compromisso da humanidade com o desenvolvimento sustentável e aumento do investimento em ensino superior e pesquisa no Brasil. Kureski (2018) expõe que construção Civil é fundamental para os ciclos de crescimento no Brasil, e incentivos como concessão de créditos, juros mais compatíveis e incentivos fiscais aumentaram nos últimos anos a produção da indústria da construção civil.

A Figura 2 apresenta a distribuição de trabalhos pelas regiões do Brasil e observa-se que a região Nordeste apresentou 14 publicações, isolando-se como a região que mais publicou sobre o assunto. Em seguida, a região Sul com 8 publicações, Centro-Oeste com 7 publicações, Sudeste com 4 publicações e a região Norte representada por 1 publicação.

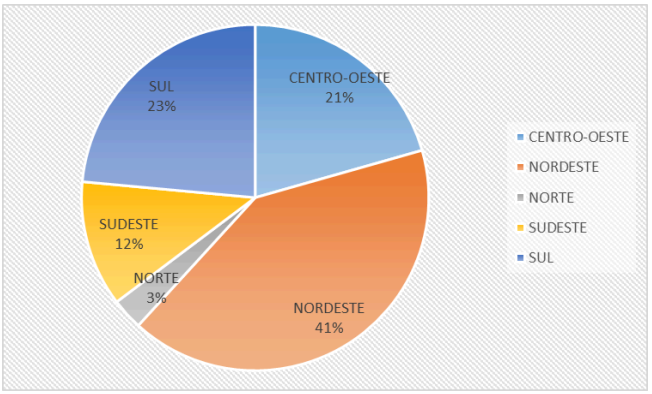


Figura 2. Publicações por região Dos 27 estados federativos, 10 estados foram representados com publicações (Figura 3).
Fonte: Cartaxo (2020).

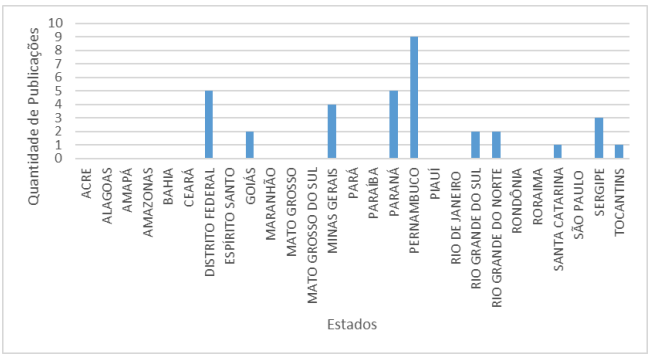


Figura 3. Publicações por estado
Fonte: Cartaxo (2020).

Segundo a ABRECON (2020) o ano de 2018 a região Nordeste apresentou o segundo maior volume de RCD do Brasil, foram 24.123 toneladas por dia, evidenciando o problema ambiental da destinação incorreta desses resíduos. Outro fator que contribui para o destaque dessa região, é a quantidade de cursos de pós-graduação na área de Engenharia Civil, de acordo com a plataforma sucupira da CAPES, no Nordeste possui 16 pós-graduações e destas 4 são no estado de Pernambuco.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos tipos de solo dentre os trabalhos científicos selecionados. Pode-se perceber que uma grande parte dos solos não foi identificada e não apresenta os resultados dos ensaios necessários para sua classificação. A areia argilosa SC foi estudada em 9 trabalhos, representando 41% dos trabalhos científicos identificados, em seguida a argila de baixa compressibilidade CL e silte de baixa compressibilidade ML, constituíram fonte de pesquisa em 4 trabalho, areia siltosa SF em 3 trabalhos argila plástica em 2 trabalhos.

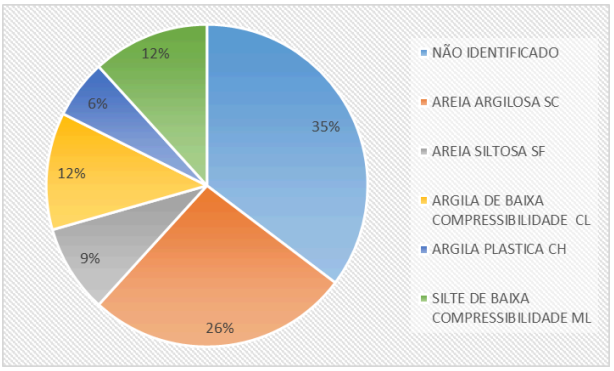


Figura 4. Classificação dos solos
Fonte: Cartaxo (2020).

Alguns trabalhos selecionados indicavam a aplicação da mistura Solo-RCD estudada, quando não indicada, interpretou-se como melhoramento das características do solo avaliada por ensaios laboratoriais, a Figura 5 exibe a distribuição dos usos dessas misturas.

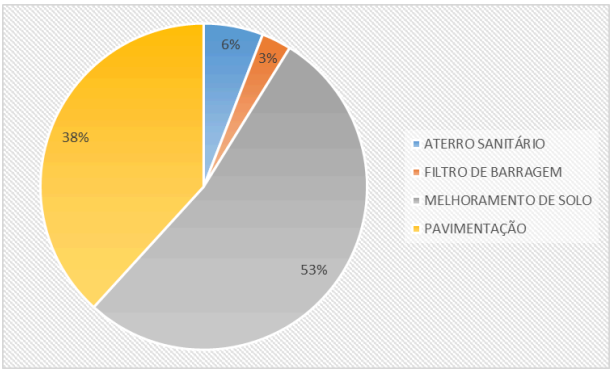


Figura 5. Finalidade da mistura solo-RCD
Fonte: Cartaxo (2020).

A figura 6 exibe que 91% dos trabalhos científicos identificaram a classe do resíduo e entre os que identificaram, foi unânime a escolha da classe A do resíduo da construção civil.

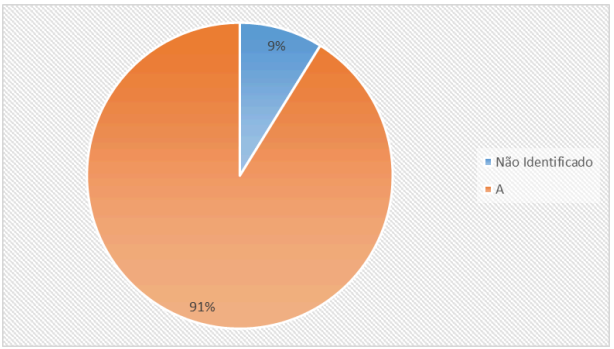


Figura 6. Classificação do RCD
Fonte: Cartaxo (2020).

Os RCD são divididos em 4 classes de acordo com os critérios definidos pelo CONAMA, a classe A compreende a resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: solos provenientes de terraplanagem, argamassa, componentes cerâmicos e concreto. Os processos de beneficiamento do resíduo

consistem em britagem, peneiramento e separação magnética. Todos os trabalhos científicos apresentaram processo de beneficiamento do RCD (Figura 7).

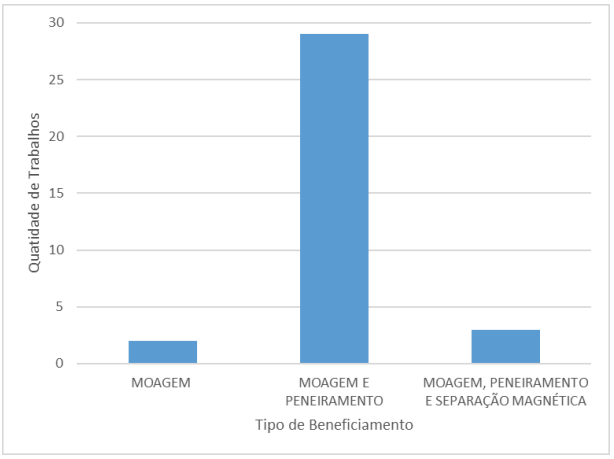


Figura 7. Processos de Beneficiamento
Fonte: Cartaxo (2020).

A Figura 8 apresenta o material predominante nos materiais estudados, percebe-se que o resíduo cinza foi material predominante do RCD em 53% dos trabalhos científicos e o resíduo cerâmico foi considerado material predominante em apenas 6% dos estudos. É importante destacar que 41% não apresentaram esta caracterização.

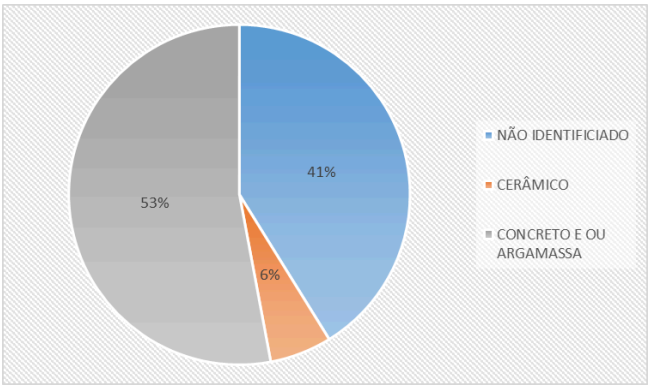


Figura 8. Material predominante do RCD
Fonte: Cartaxo (2020).

A Figura 9 expõe o desempenho da adição de RCD ao solo. Os resultados foram classificados como: positivo, negativo ou indiferente mediante aos ensaios realizados por cada produção científica. Os resultados globais mostraram-se predominantemente positivos ao uso do RCD em mistura com solo para todas as aplicações da mistura, representando 94% dos trabalhos científicos, totalizando 32 produções. Um trabalho mostrou resultado negativo e um apresentou resultado indiferente.

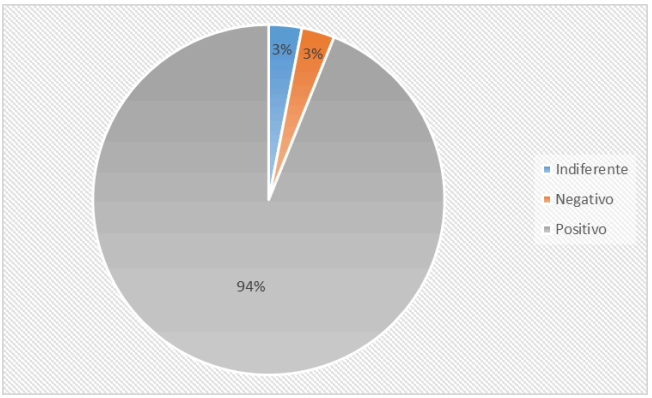


Figura 9. Resultado global dos trabalhos científicos
Fonte: Cartaxo (2020).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusões gerais, os estudos apontam a viabilidade do reuso do RCD em substituição a recursos naturais escassos. Além de reduzir a deposição ilegal de resíduos, essa prática melhora as propriedades geotécnicas dos materiais empregados nas obras.

A partir da revisão sistemática, foi possível concluir que as aplicações mais comuns para as misturas solo-RCD são: aterro sanitário, filtro de barragem e pavimentação, com grande destaque para última. As misturas de solo-RCD avaliadas por 19 ensaios distintos para avaliar a resistência, permeabilidade, deformação e formação de fissuras. Observou-se um desempenho positivo.

A região Nordeste apresentou mais publicações sobre o uso do RCD para o melhoramento do solo, com 14 publicações dos 34 trabalhos científicos.

Nos últimos anos, houve um aumento considerável das produções científicas envolvendo o uso do RCD para estabilização de solos, com destaque para o ano de 2018, totalizando 14 publicações.

Devido às suas características técnicas e logísticas, o uso do RCD em melhoramento de solo vem aumentando, representando uma alternativa na busca por construções mais sustentáveis e evidenciando o grande potencial da reciclagem desse material.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira Para Reciclagem De Resíduos Da Construção Civil E Demolição (ABRECON). Mapa. [S. l.], 2020. Disponível em: https://abrecon.org.br/mapa/. Acesso em: 18 nov. 2020.

Cartaxo, M. A. A. *Melhoramento de solo através da adição de resíduo da construção cívil no Brasil: revisão sistemática*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

Dalla Rosa, A. *Estudo dos parâmetros-chave no controle de resistência de misturas solo-cinza-cal*. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2009.

Dias, M. C. C. *Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário*, Dissertação de M. Sc., EEC/UFG, Goiânia, GO, Brasil, 2014.

Farenhof, H.A; Fernandes, R.F. *Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método ssf*. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, [s. l.], ano 2016, 2016.

Ferreira; M.C. Thome; A. *Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um*

solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. Passo Fundo, 2011.

Leite, C.; Neto, T.; Aguiar, M.; Oliveira, F.H. *Análise de melhoramento de solo com brita e resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do Ceará.* Conexões - Ciência e Tecnologia. 2016.

Silva, A.C.; Fucale, S.; Ferreira, S.R.M. *Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo arenoargiloso*. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, e12355, 2019.

Silva, L.S.A. Lean *Construction: uma busca sistemática da literatura*. Orientador: Prof. Cristine do Nascimento Mutti. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [S. l.], 2019.

Santos, E. C. G., *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCDR) em estruturas de solo reforçado*, Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2007.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/108

Modelagem Transiente do Desempenho Térmico de Estacas Trocadoras de Calor em Solo Argilo Silto Arenoso: Estudo de Caso em Ponta Grossa-PR

Maitê Milléo Almeida
Discente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, maitemilleo12@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus
Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

Vitor Pereira Faro
Professor Colaborador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

Luiz Fernando Anchar Lopes
Profissional mestre, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, luiz.anchar@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise numérica do desempenho térmico de um sistema de climatização geotérmica aplicado a um container de 40 pés (12 m) sem isolamento térmico, operando em ciclo de resfriamento em Ponta Grossa, PR. Devido à alta condutividade térmica do aço e à baixa inércia térmica da estrutura, a carga térmica máxima calculada foi de 14.783,09 W. A pesquisa utilizou modelagem computacional por elementos finitos para avaliar o comportamento de trocadores de calor do tipo estaca trocadora sob regime transiente de 48 horas. Os resultados iniciais demonstraram que a aplicação da carga total em uma única estaca causava saturação térmica severa, com temperaturas excedendo 180°C, comprometendo a integridade do sistema. Contudo, ao redistribuir a carga térmica em um campo de cinco estacas (3.385,06 W por unidade), o sistema apresentou estabilização térmica com temperaturas máximas seguras (abaixo de 40°C). Conclui-se que a configuração de campo de estacas é essencial para viabilizar o uso da energia geotérmica em estruturas metálicas de alta demanda, garantindo eficiência operacional e preservação dos componentes.

PALAVRAS-CHAVE: Geotermia, Modelagem, Energia geotérmica, Bomba de calor.

ABSTRACT: This study presents a numerical analysis of the thermal performance of a geothermal air conditioning system applied to a non-insulated 40-foot container operating in a cooling cycle in Ponta Grossa, Brazil. Due to the high thermal conductivity of steel and the low thermal inertia of the structure, the maximum calculated cooling load was 14,783.09 W. The research employed finite element computational modeling to evaluate the behavior of heat exchanger piles under a 48-hour transient regime. Initial results showed that applying the total heat rejection load to a single pile led to severe thermal saturation, with temperatures exceeding 180°C, thereby compromising the system's integrity. However, by redistributing the thermal load across a field of five piles (3,385.06 W per unit), the system achieved thermal stabilization with safe maximum temperatures (below 40°C). The study concludes that a pile field configuration is essential to enable the use of geothermal energy in high-demand metallic structures, ensuring operational efficiency and component preservation.

KEYWORDS: Geothermics, Modeling, Geothermal energy, Heat pump.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento da demanda energética e o avanço das metas globais de sustentabilidade impulsionaram a busca por soluções inovadoras para climatização de edificações com menor impacto ambiental (Morais, 2019). No Brasil, onde as diferenças bioclimáticas regionais intensificam o uso de sistemas de aquecimento e resfriamento, o consumo energético associado ao ar-condicionado representa uma parcela significativa da eletricidade residencial e comercial (International Energy Agency, 2023). Nesse contexto, o aproveitamento da energia geotérmica surgiu como alternativa promissora, capaz de reduzir o consumo elétrico e as emissões de gases de efeito estufa, aliando eficiência energética e sustentabilidade.

Paralelo ao crescimento por soluções de climatização de edificações, também observou-se o uso de containers como unidades habitacionais e comerciais modulares como uma forma de reutilização dessas estruturas, construção limpa e redução no custo de construção (Sajid et al., 2024). No entanto, a alta condutividade térmica do aço, aliada à frequente ausência de isolamento térmico adequado, impõe desafios críticos à climatização interna, resultando em elevado consumo energético em sistemas de condicionamento ambiental convencionais (Olivares, 2010). Pensando em soluções para a climatização desses containers, surgem as bombas de calor geotérmicas (GSHP – *Ground Source Heat Pumps*) como um recurso de alta eficiência (COP > 4), utilizando o solo como reservatório térmico para dissipação de calor Esse tipo de solução costuma apresentar coeficiente de desempenho (COP) superior à 4, indicando que o ssitema entrega quatro vezes mais energia térmica do que consome de eletricidade (Spitler; Gehlin, 2015).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe a análise numérica do desempenho térmico de um sistema de climatização geotérmica aplicado a um container de 40 pés (12 m de comprimento) sem isolamento térmico, operando em ciclo de resfriamento. Para realização da análise, foi realizada uma modelagem computacional para entender o funcionamento de uma configuração de trocadores de calor solo-tubo já estabelecida: estaca trocadora de calor. Essa configuração de modelagem foi selecionada com o objetivo de avaliar se a estaca trocadora de calor oferece desempenho térmico frente à carga térmica variável e extrema do container metálico, considerando a estaca oferece uma otimização do uso da área do terreno e garante contato com o solo em maiores profundidades.

2 METODOLOGIA

O objeto de estudo consiste em um container padrão de 40 pés (*Dry Box*), com dimensões de 12,19 m de comprimento, 2,44 m de largura e 2,60 m de altura. A estrutura é composta predominantemente por chapas de aço Corten de 3 mm de espessura. As especificações do aço corten consideradas foram de 50 W/m.K de conduvitidade térmica, densidade de 7800 kg/m³ e calor específico de 450 J/kg.K.

Para o cálculo da carga térmica do container foram consideradas as normas ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2022), ABNT NBR 16401 (ABNT, 2024) e ASHRAE Handbook of Fundamentals 2017 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017), empregando especificamente as recomendações de cálculo para aquecimento e resfriamento não residencial. Visando representar as condições reais de projeto usual em unidades modulares, o modelo adotado no trabalho apresentou a ausência de isolamento térmico interno e, consequentemente, a estrutura exibiu uma baixa inércia térmica e uma alta transmitância térmica ($U_{paredes} = 5{,}880\ W/m^2.K;\ U_{teto} = 4{,}761\ W/m^2.K$). Para o cálculo da carga térmica máxima foi considerado que o container estava localizado no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) em Ponta Grossa, Paraná, que a temperatura de conforto interna no container seria equivalente à 24ºC e que o container possui uma pintura externa de cor preta. Com essas considerações, obteve-se uma carga térmica máxima de 14.783,09 W (50.440 BTU/h).

Considerando a necessidade de resfriamento para a climatização desse container, foi considerada no dimensionamento uma bomba de calor do tipo água-ar com capacidade nominal de resfriamento de 22,4 kW. Essa capacidade, superior à carga térmica calculada (14,78 kW), visa garantir a estabilidade térmica em condições de radiação solar extrema, destacando-se que o equipamento opera com tecnologia inverter, permitindo a modulação da capacidade conforme a demanda.

Além disso, o equipamento adotado utiliza um compressor do tipo scroll com tecnologia inverter e um fluido refrigerante R410A. A troca térmica com solo ocorre através de um trocador de placas de aço inoxidável,

operando com uma vazão nominal de 77 LPM e um Índice de Eficiência Energética (EER) nominal de 6,90 W/W. O controle de fluxo de refrigerante é gerido por uma válvula de expansão eletrônica, permitindo o ajuste preciso da capacidade frente à baixa inércia térmica da estrutura metálica do container. A partir das especificações do equipamento, foi possível determinar qual seria a carga térmica rejeitada para o solo, que seria a taxa de 16.925,6 W, correspondente à 57.750 BTU/h.

A modelagem computacional foi desenvolvida em um software de simulação de elementos finitos, utilizando o módulo de Transferência de Calor (*Heat Transfer Module*), com interface de Transferência de Calor em Sólidos (*Heat Transfer in Solids*). A simulação foi conduzida em regime transiente (*Time Dependent*), visando capturar a resposta térmica do sistema frente à carga térmica variável do container ao longo do tempo.

O domínio do solo, correspondente ao CEEG-PG, foi modelado considerando duas camadas distintas, baseado no perfil geotécnico do Campo (Niedvieski, 2025): argilo-silto-arenoso e arenoso. O solo argilo-silto-arenoso se encotrou até o limite de 12 m de profundidade e o solo arenoso apresentou espessura de 3 m de profundidade, totalizando 15 m o modelo completo, por 5 m de largura e 5 m de comprimento. As propriedades térmicas inseridas no software foram baseadas em (Niedvieski, 2025) e (Tonus, 2023). Para o solo argilo-silto-arenoso, a condutividade térmica utilizada foi de 2,20 W/m.ºC — sendo esse o valor médio encontrado entre as profundidades de 3m, 5m e 7m —, a densidade de 2630 kg/m³ e capacidade calorífica de 850 J/kg.ºC. Para o solo arenoso foram utilizados os valores de 3,3 W/m.ºC, densidade de 1800 kg/m³ e capacidade calorífica de 1250 J/kg.ºC, considerando o estado saturado. A estaca de concreto considerada apresenta 14 m de comprimento com seção quadrada de 0,2 m por 0,2 m e a tubulação em U considerada apresenta 0,032 m de diâmetro, conforme tubulações PEAD usualmente utilizadas em geotermia.

A simulação foi conduzida considerando um regime de 48 h (172.800 s), com período de operação e de repouso com 12 horas cada, por permitir a observação de dois ciclos completos de operação e repouso de 24 h. Esse intervalo foi considerado suficiente para caracterizar a resposta térmica transiente do sistema e para identificar o fenômeno de saturação térmica, estado em que o solo atinge a sua capacidade máxima de condutividade térmica, garantindo a compreensão da inércia térmica do solo sem a necessidade de um custo operacional excessivo para validação.

A geometria do trocador de calor foi discretizada no domínio sólido, onde se aplicaram as condições de contorno de fluxo de calor baseadas na taxa de rejeição da bomba de calor selecionada. A partir da Figura 1 pode-se observar a geometria do trocador de calor tipo estaca, além de perceber que (a) a região mais externa equivale à massa de solo, a região mais interna corresponde ao concreto da estaca trocadora de calor e a tubulação interna da estaca é a tubulação em U. Na Figura 1 (b) está representado o detalhamento da superfície da modelagem e em (c) observa-se a conexão U realizada para conectar as tubulações PEAD.

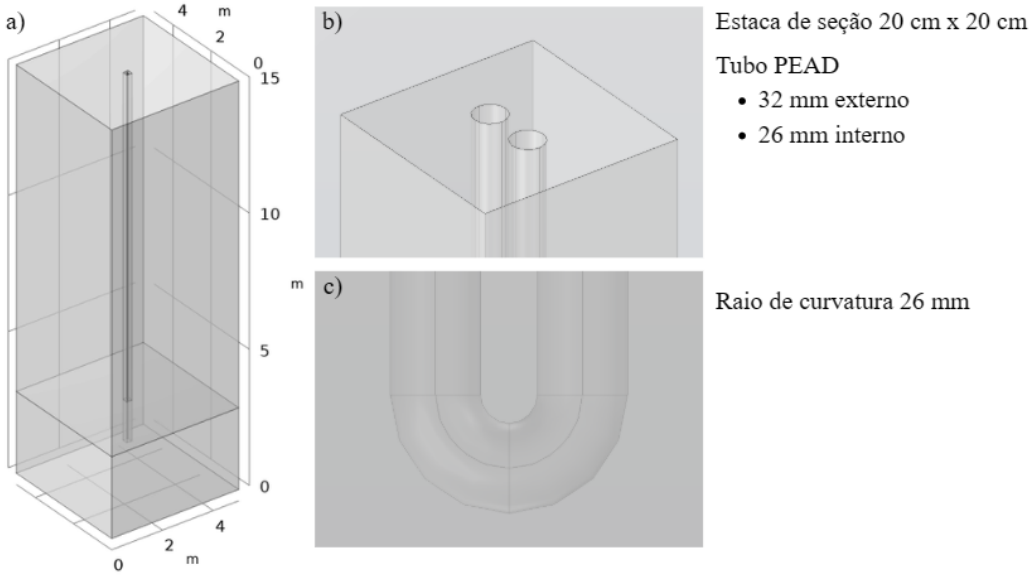


Figura 1. Geometria do trocador de calor tipo estaca (a) modelagem completa (b) aproximação da superfície (c) detalhamento da conexão em U

A malha computacional foi composta por elementos tetraédricos, com refinamento controlado nas interfaces de maior gradiente térmico (contato tubo-solo). Realizou-se um estudo de convergência de malha para garantir a independência dos resultados numéricos. As condições de contorno de temperatura e fluxo de calor foram extraídas do balanço térmico do container e da capacidade de rejeição da bomba de calor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados iniciais encontrados da simulação numérica foram relevantes para realizar a validação do dimensionamento do sistema geotérmico frente à alta carga térmica de resfriamento demandada pelo container sem isolamento térmico.

Nesse contexto, inicialmente foi realizada a simulação do cenário onde a carga total de rejeição de calor do sistema no solo (16,9 kW) era aplicada em uma única estaca trocadora de calor. Como possível de observar na Figura 2 e na Figura 3, a aplicação da carga total em uma unidade isolada de estaca resultou em temperaturas que excediam 80ºC na interface entre a tubulação de PEAD e o concreto da estaca.

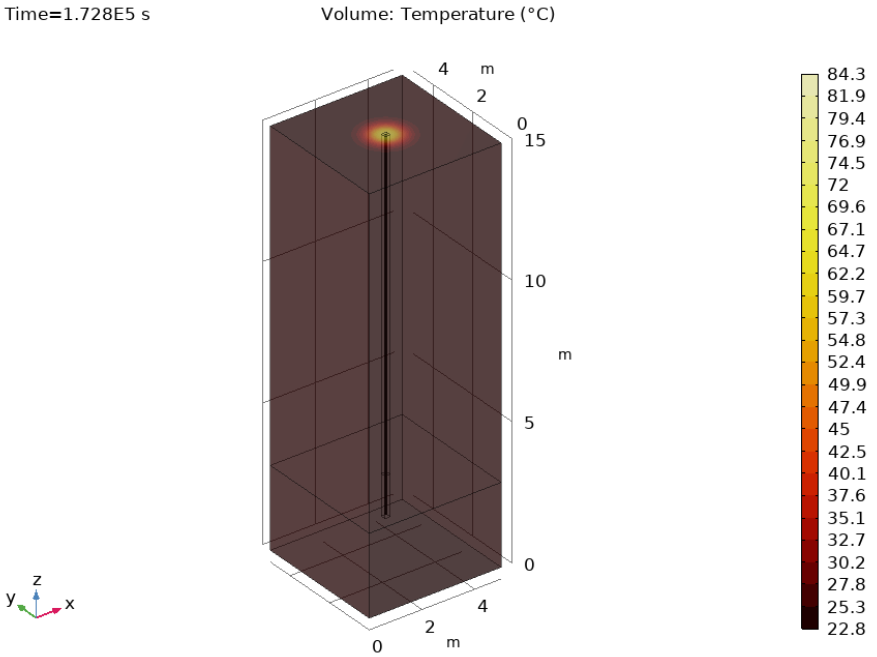


Figura 2. Mapa de calor 3D evidenciando a saturação térmica local (>80ºC) sob carga total

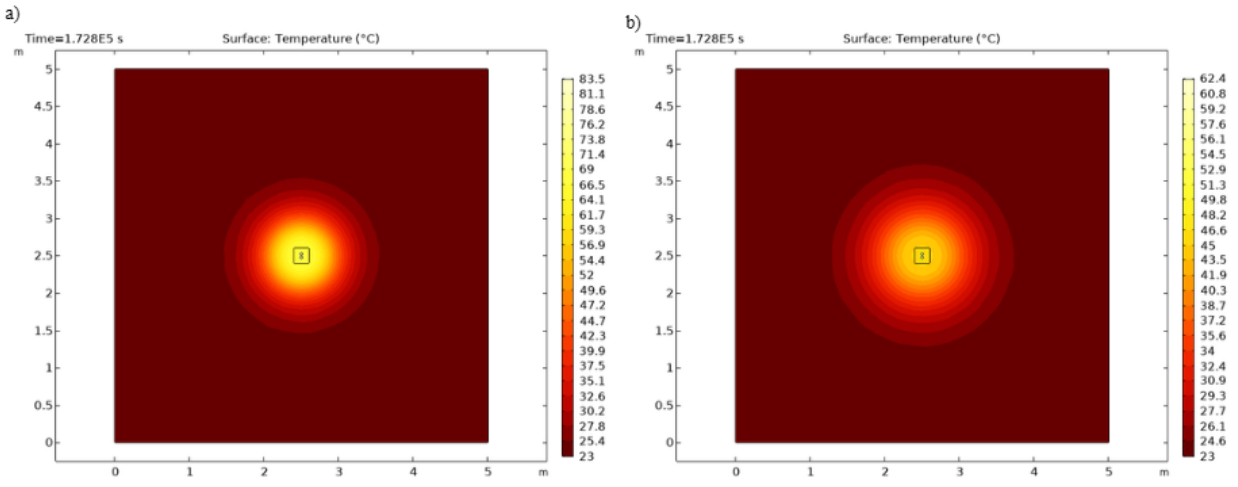


Figura 3. Perfil térmico vertical (Plano de Corte) realizado (a) à 7,5m da superfície e (b) à 12m de profundidade

De forma complementar, a análise do comportamento transiente de temperatura ao longo das 48 horas, possível de observar na Figura 4, revela um padrão de oscilação térmica crítico. Durante os períodos de operação (12 horas), é observada uma rampa de ascensão térmica acentuada. Destaca-se que essas medidas de temperatura obtidas para gerar o gráfico não representam um ponto específico, mas sim a variação de temperatura do modelo. Isso indica que a taxa de injeção de calor é realmente superior à taxa de difusão térmica do solo do CEEG-PG. Nos períodos de repouso (12 horas noturnas), a inclinação negativa da curva não é o suficiente para que a estaca retorne à temperatura basal de 24ºC do solo.

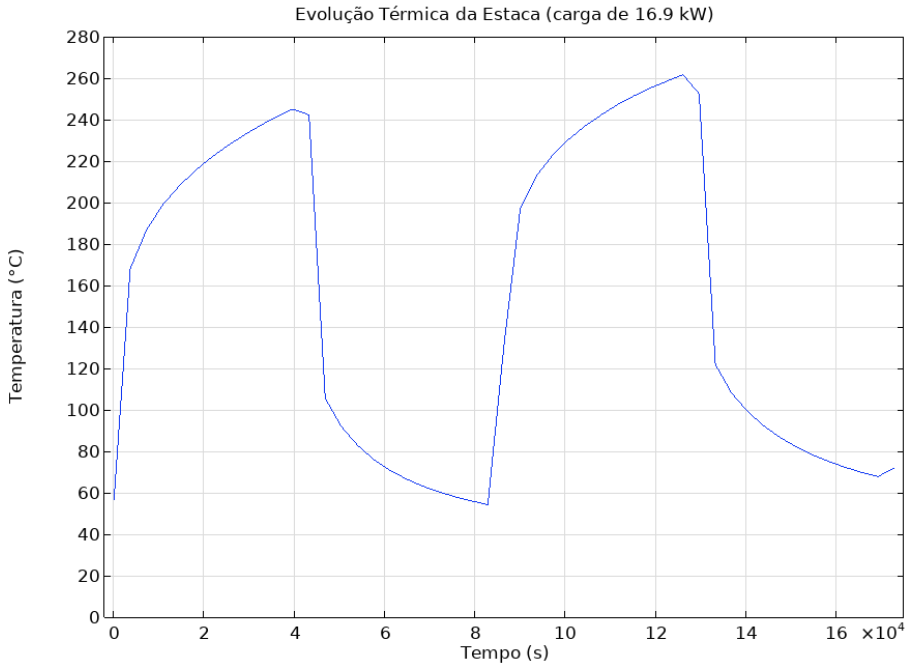


Figura 4. Gráfico Temperatura x Tempo

Esse fenômeno observado evidencia que, para uma única estaca, o calor acumulado no ciclo anterior não é totalmente dissipado antes do início do ciclo seguinte, entendendo como saturação térmica, ou seja, o momento em que o solo atingiu sua capacidade máxima de condutividade térmica. Como resultado disso, cada novo ciclo de operação parte de um patamar térmico mais elevado, conduzindo todo o sistema a uma saturação não reversível em pouco tempo de uso.

Este fenômeno de saturação térmica demonstra que a condutividade térmica da argila silto-arenosa de baixa consistência e da areia do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG) não apresentou capacidade de dissipação suficiente para absorver tal fluxo de calor de forma concentrada em uma única estaca. Temperaturas nessa ordem de grandeza poderiam causar problemas na integridade estrutural da estaca e a eficiência do ciclo de refrigeração, evidenciando a necessidade de um campo de estacas para a distribuição da carga térmica e para manter o sistema em níveis operacionais de segurança (abaixo de 40ºC).

Diante dessa situação, a estratégia de modelagem foi refinada para poder realizar a simulação do comportamento de uma estaca representativa inserida em um campo composto por dez unidades de estacas, equidistantes entre si por 3 m, visto que o efeito de dissipação não chega à metade da distância entre elas, como possível de observar na Figura 7 (b). Dessa forma, a carga térmica rejeitada no solo (16,9 kW) foi dividida, onde cada estaca passou a receber 10% da carga total, ou seja, 1.692,56 W.

As Figura 5 e Figura 6 apresentam o novo mapa de calor e o plano de corte para a estaca com carga térmica reduzida. Com a distribuição da carga, observa-se que as temperaturas se estabilizaram em níveis mais adequados, quando comparada com a única estaca, permitindo que o solo e o concreto da estaca atuem como um dissipador térmico eficiente dentro do regime transiente de 48 horas simulado.

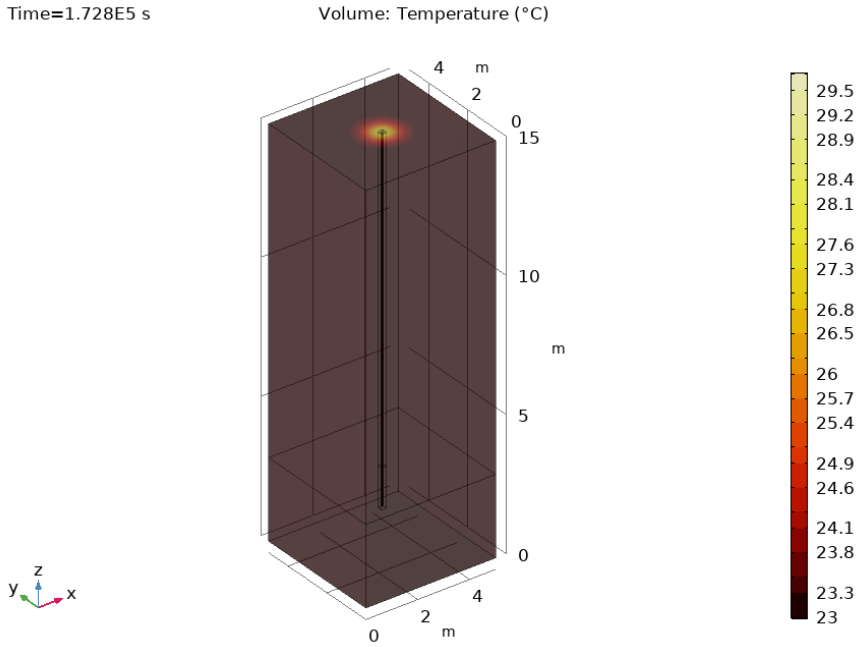


Figura 5. Mapa de calor 3D – Carga Qsolo particionada

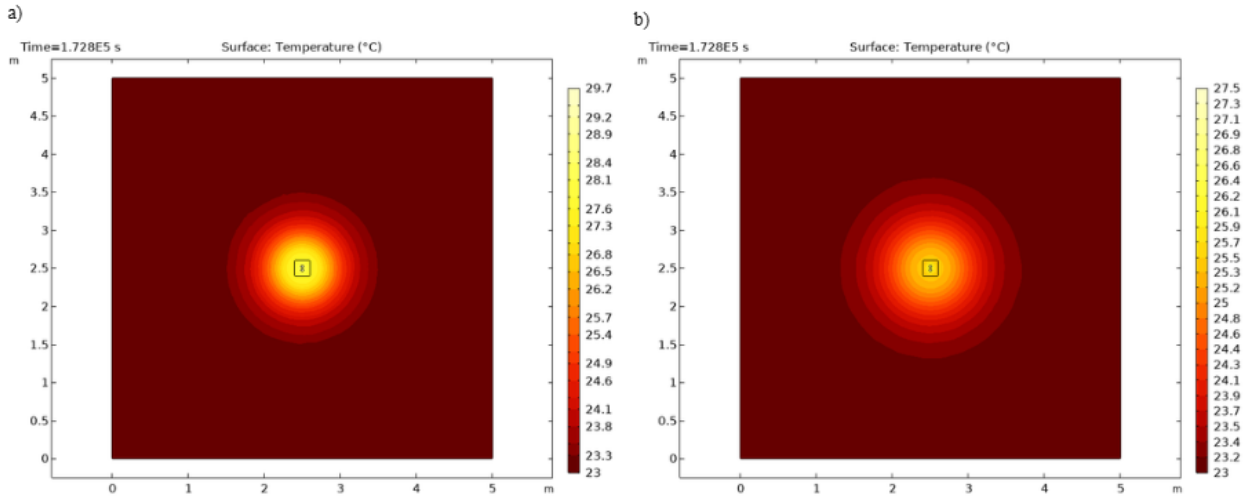


Figura 6. Perfil térmico vertical (Plano de Corte) (a) à 7,5m da superfície e (b) à 12m de profundidade – Carga Qsolo particionada

A eficácia em realizar essa redistribuição da carga térmica em um campo com dez estacas se torna evidente quando se compara o amortecimento da amplitude térmica no perfis de temperatura transiente (Figura 4 (a) e Figura 7). Enquanto no primeiro cenário (estaca única) a temperatura apresentava uma trajetória de ascensão não controlada, o gráfico para a estaca representativa com carga de 1.692,56 W exibe um comportamento de estabilização térmica.

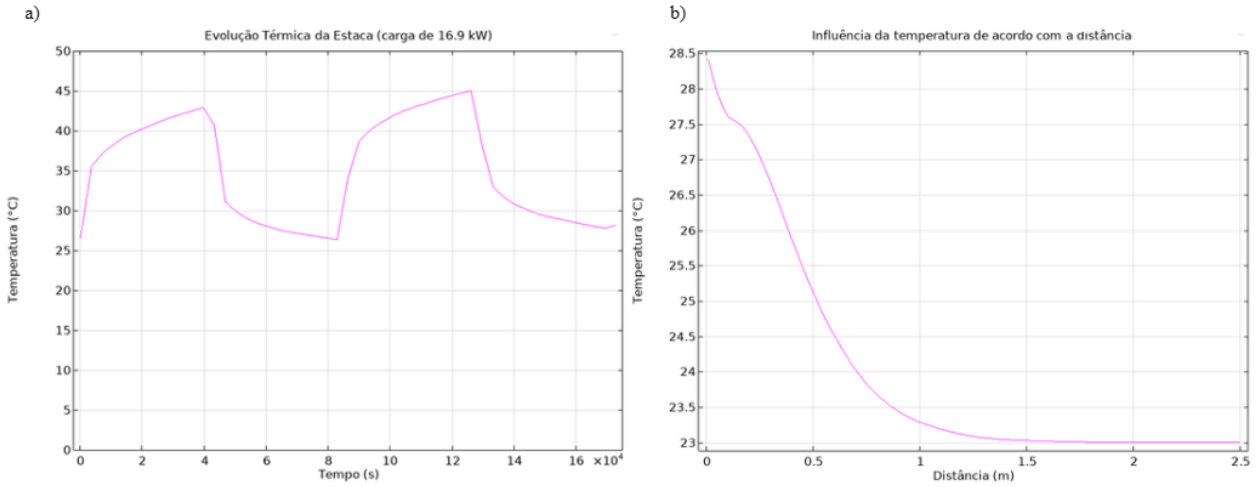


Figura 7. Gráfico (a) Temperatura x Tempo e (b) Temperatura x Distância – Carga Qsolo particionada

Nesse cenário alternativo, a inclinação da rampa de aquecimento durante as 12 horas de operação foi reduzido. Percebe-se também que a taxa de resfriamento durante as 12 horas de repouso mostrou-se o suficiente para dissipar a maior parcela do calor injetado no ciclo anterior. Apesar do fenômeno de saturação térmica ainda poder ser observado em escala reduzida, a temperatura máxima atingida na interface concreto-solo se estabilizou em patamares considerados seguros, não ultrapassando 50ºC.

Essa mudança de comportamento demonstra que o solo do CEEG-PG, apesar de suas limitações de condutividade térmica, pode atuar como um reservatório térmico viável desde que a taxa de injeção de energia seja compatível com a sua capacidade de difusão lateral. Consequentemente, a disposição simulada com dez estacas não somente protege a integridade estrutural do sistema, como garante uma temperatura de entrada mais baixa para o fluido da bomba de calor, otimizando o COP de todo o sistema de climatização do container ao longo do tempo.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo numérico demonstrou a potencial viabilidade técnica da utilização de estacas trocadoras de calor para a climatização de um container sem isolamento térmico, submetido às condições climáticas e geológicas de Ponta Grossa, no Paraná. A modelagem computacional transiente via software de simulação de elementos finitos permitiu identificar que a alta carga térmica de rejeição (16,9 kW) é o fator determinante para o design do projeto de condicionamento ambiental.

A simulação inicial com uma única estaca revelou uma saturação térmica severa, com temperaturas excedendo 180ºC. Esse resultado comprova que a taxa de injeção de calor de um container sem proteção térmica supera a capacidade de dissipação imediata da argila silto-arenosa local, tornando imperativo o fracionamento da carga.

O redimensionamento para um sistema composto por dez estacas (recebendo 1.692,56 W cada) mostrou-se eficaz na estabilização das temperaturas operacionais abaixo de 40ºC. Essa configuração permitiu que o concreto da estaca e o solo adjacente atuassem como um dissipador térmico eficiente dentro do ciclo de 48 horas.

A análise dos comportamentos cíclicos de temperatura confirmou que, embora ocorra o fenômeno de saturação térmica, a distribuição da carga atenua a amplitude térmica e permite uma recuperação parcial do solo durante os períodos de repouso noturno.

Os parâmetros térmicos adotados para o solo de baixa consistência do CEEG-PG mostraram que, apesar da resistência térmica do meio, a inércia do solo é um recurso valioso para a eficiência energética da bomba de calor geotérmica na região.

Em suma, a transição de uma análise de carga total para uma carga particionada validou a estratégia de projeto, garantindo a integridade dos materiais (PEAD e concreto) e a sustentabilidade térmica do sistema a

longo prazo. Como trabalhos futuros, recomenda-se a simulação de períodos sazonais prolongados e a análise do impacto do espaçamento entre as estacas na interferência térmica mútua.

AGRADECIMENTOS

À FUNESPAR, à Solution IPD, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, ao CEEG-PG e à aluna de iniciação científica Karine Saldanha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. 2017. ed. EUA: Mark S. Owen, 2017 [2017]. (ASHRAE HANDBOOK).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2 - Desempenho térmico de edificações - Parte 2 - Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-1 - Instalações de condicionamento de ar - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projeto das instalações**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2023**. Paris, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023. Acesso em: 24 fev. 2026.

MORAIS, T. D. S. O. **Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical**. 2019. Doutorado em Geotecnia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06092022-112023/. Acesso em: 24 fev. 2026.

NIEDVIESKI, L. B. **Análise experimental e numérica de propriedades térmicas de solo residual argiloso empregando trocadores de calor geotérmicos superficiais**. 2025. 102 f. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025. Disponível em: Acesso em: 24 fev. 2026.

OLIVARES, A. A. P. **Sustainability in prefabricated architecture**. 2010. 250 f. Dissertação - Victoria University of Wellington, Wellington, Nova Zelândia, 2010. Disponível em: https://openaccess.wgtn.ac.nz/articles/thesis/Sustainability_in_Prefabricated_Architecture_A_Comparative_Life_Cycle_Analysis_of_Container_Architecture_for_Residential_Structures/16973995?file=31398280. Acesso em: 24 fev. 2026.

SAJID, Z. W. *et al.* Climate Change Mitigation through Modular Construction. **Smart Cities**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 566–596, 2024.

SPITLER, J. D.; GEHLIN, S. E. A. Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 50, p. 1125–1137, 2015.

TONUS, B. P. de A. **Avaliação da utilização do ensaio de cone térmico (TCT) na determinação de propriedades térmicas do solo para dimensionamento de sistemas geotérmicos**. 2023. 210 f. Tese - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/109

Nature-Based Solutions em Geotecnia: Fibras Naturais e Impacto Hidráulico em Solos Arenosos sob Análise Experimental e Numérica

Kauã da Silva Gomes
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, kauagomes555@gmail.com

Augusto Barbosa Silva, Msc.
Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, augusto0412@hotmail.com

André Luís Brasil Cavalcante, Dsc.
Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, abrasil @unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande, Dsc.
Professora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: O uso de soluções baseadas na natureza (nature-based solutions) na geotecnia tem crescido por conciliar sustentabilidade e desempenho técnico. Entre essas abordagens, a incorporação de fibras naturais em solos pode melhorar propriedades mecânicas, porém seus efeitos hidráulicos, especialmente quanto à alteração de permeabilidade e à possível formação de caminhos preferenciais de percolação, ainda demandam verificação experimental. Este trabalho avaliou a influência da adição de fibras de açaí (*Euterpe oleracea*) no comportamento hidráulico de uma areia lavada por meio de abordagem experimental–numérica. Foram determinados granulometria, índices de vazios (emáx e emín) e compacidade relativa, além de ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga variável. Compararam-se solo puro e compósito com 1% de fibras (Cr = 70% e umidade inicial de 10%). Em paralelo, um modelo físico em escala reduzida, representativo da fundação de uma barragem, foi monitorado com traçador colorido para visualização das linhas de fluxo, e uma simulação de percolação no SEEP/W foi realizada para o solo puro, permitindo comparação qualitativa do padrão de escoamento. Observou-se aumento discreto da condutividade hidráulica com a adição de fibras ($3{,}14\times10^{-6}$ para $3{,}92\times10^{-6}$ m/s), mantendo a mesma ordem de grandeza, sem evidências de canalização preferencial nas trajetórias observadas. Conclui-se que, nas condições investigadas, a adição de fibras de açaí não alterou de forma relevante o padrão global de percolação do meio arenoso.

PALAVRAS-CHAVE: Nature-based solutions; Fibras de açaí; Solos reforçados; Linhas de fluxo; Permeabilidade.

ABSTRACT: The use of nature-based solutions in geotechnical engineering has grown due to their ability to combine sustainability and technical performance. Among these approaches, incorporating natural fibers into soils can improve mechanical properties; however, their hydraulic effects—particularly changes in permeability and the potential formation of preferential seepage paths—still require experimental verification. This study evaluated the influence of açaí (*Euterpe oleracea*) fibers on the hydraulic behavior of a washed sand using an experimental–numerical approach. Grain-size distribution, void ratio limits (emin and emax), and relative density were determined, and permeability was measured using a falling-head permeameter. Clean sand and a composite with 1% fibers (Cr = 70% and initial water content of 10%) were compared. In addition, a reduced-scale physical model representative of a dam foundation was monitored with a dye tracer to visualize flow lines, and a SEEP/W seepage simulation was performed for the clean sand, enabling qualitative comparison of flow patterns. A slight increase in hydraulic conductivity was observed with fiber addition (3.14×10^{-6} to 3.92×10^{-6} m/s), with no change in order of magnitude and no evidence of preferential channeling in the observed trajectories. It is concluded that, under the investigated conditions, açaí fiber inclusion did not significantly alter the global seepage pattern of the sandy medium.

KEYWORDS: Nature-based solutions; Açaí fibers; Reinforced soils; Flow lines; Permeability.

1 INTRODUÇÃO

A adoção de soluções baseadas na natureza tem se consolidado como uma diretriz relevante para a engenharia, em especial quando se busca conciliar desempenho técnico, redução de impacto ambiental e aproveitamento de resíduos agroindustriais. Na geotecnia, uma das estratégias mais difundidas nesse contexto é o reforço de solos por meio da incorporação de fibras naturais, com foco em ganhos de resistência e rigidez e em respostas mais dúcteis do compósito. Sob a ótica conceitual, o reforço pode ser entendido como a introdução de elementos capazes de mobilizar esforços de tração no maciço terroso, complementando a capacidade resistente do solo (Castro, 2020). Diversos trabalhos indicam que fibras vegetais, quando adequadamente dosadas e distribuídas, podem melhorar o desempenho mecânico e, em certos casos, contribuir para o controle de fissuração, reduzindo abertura e espaçamento de trincas (Gomes, 2018; Faustino & Ferreira, 2024).

Entretanto, a incorporação de fibras não altera apenas a resposta mecânica: ela também pode modificar o arranjo granular e, consequentemente, o comportamento hidráulico do meio poroso. As propriedades do compósito solo-fibra dependem simultaneamente de parâmetros das fibras (teor, comprimento e características físicas) e do solo de base, com reflexos diretos no comportamento global observado (Curcio, 2008; Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022). Do ponto de vista hidráulico, há registros na literatura de aumento da condutividade hidráulica com o incremento do teor de fibras, hipótese frequentemente associada à criação de descontinuidades e microcanais que facilitariam o escoamento no interior do compósito (Curcio, 2008; Faustino & Ferreira, 2024). Esse aspecto é particularmente relevante em estruturas e maciços sujeitos à percolação, pois mudanças em permeabilidade e em trajetórias de fluxo podem influenciar a evolução de gradientes hidráulicos, elevando a suscetibilidade a processos de carreamento de partículas e erosão.

A compreensão do escoamento em meios porosos parte do fato de que a água ocupa os vazios do solo de forma parcial ou total e, quando submetida a um gradiente hidráulico, tende a deslocar-se no interior do maciço (Pinto, 2011). Para interpretar esse fenômeno, uma representação clássica é a rede de fluxo, construída a partir de linhas de fluxo (trajetórias preferenciais do movimento da água) e linhas equipotenciais (linhas de mesma carga hidráulica), que se cruzam ortogonalmente em regime laminar (Massad, 2003). A análise dessas redes permite avaliar como o fluxo se distribui no maciço e identificar cenários em que há concentração de percolação e elevação de gradientes, condições associadas ao início de mecanismos erosivos. Para estudo e visualização dessas redes, podem ser empregados métodos analíticos, gráficos, numéricos e experimentais; entre eles, modelos físicos em laboratório têm sido amplamente utilizados para reproduzir geometrias e condições hidráulicas de interesse e permitir a observação direta das trajetórias de percolação com auxílio de corantes (Leão, 2018; Oliveira et al., 2018; Moreira, Cavalcante e Costa, 2022).

Apesar do avanço no uso de fibras naturais para reforço e da ampla discussão de ganhos mecânicos, ainda é limitada a base experimental que descreve, de forma clara, se e como a presença das fibras altera as linhas de fluxo e a ocorrência de caminhos preferenciais de percolação em solos arenosos. Essa lacuna é crítica, pois a manutenção de um fluxo “bem distribuído” e previsível é um requisito de segurança hidráulica em diferentes aplicações geotécnicas. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar, por meio de ensaios físicos em modelo reduzido com visualização de linhas de fluxo por traçador colorido, e de simulações numéricas no SEEP/W, se a incorporação de fibras naturais de açaí em um solo arenoso altera a permeabilidade e o padrão de percolação (incluindo a eventual formação de caminhos preferenciais). A comparação entre os resultados experimentais e numéricos busca avaliar a consistência das interpretações e discutir as implicações do comportamento observado para a segurança hidráulica do compósito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solo arenoso

O material de base foi uma areia lavada obtida comercialmente em Brasília/DF. Optou-se por esse solo em função de sua ampla disponibilidade e de sua aplicação recorrente como material padrão em ensaios geotécnicos, além de permitir controle mais direto das condições de percolação no modelo físico.

2.1.2 Fibras naturais de açaí

O reforço foi composto por fibras naturais provenientes do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*), resultantes do processamento industrial após remoção da polpa. As fibras de açaí (Figura 3) foram adquiridas de um fornecedor que comercializa biomassa em Belém – PA, cujas propriedades geométricas e físicas (densidade, área de seção, comprimento e diâmetro) seguem dados previamente determinados pelos autores (Silva et al., 2024), e são apresentados na Tabela 1.



Figura 1. Fibras de açaí (*Euterpe oleracea*).

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas das fibras de açaí. (Silva et al., 2024)

Densidade (g/cm³)	Área da seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0,89	0,15	10,11	0,14

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização física do solo

A distribuição granulométrica da areia foi determinada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), por peneiramento nas faixas granulométricas aplicáveis e sedimentação para eventuais frações finas. Já a massa específica dos grãos foi obtida conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016), utilizando picnômetros.

2.2.2 Determinação de índices de vazio máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$)

Os índices de vazios máximo e mínimo foram medidos para permitir o cálculo da compacidade relativa (C_r) e, consequentemente, a determinação da massa necessária para moldagem das amostras. O índice de vazios máximo (estado mais fofo) foi determinado conforme a NBR 16840 (ABNT, 2020) e o índice de vazios mínimo (estado mais compacto) conforme a NBR 16843 (ABNT, 2020).

2.2.3 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas adotando $C_r = 70\%$ tanto para a areia pura quanto para o compósito solo-fibra, de modo a garantir estabilidade geométrica durante o manuseio, a saturação e a execução do modelo físico. Para melhorar a interação inicial entre os constituintes e favorecer a aderência/dispersão das fibras, foi adotada uma umidade inicial de 10%, conforme procedimento aplicado por Carvalho, Monteiro & Casagrande (2023).

O compósito foi produzido com 1% de fibras de açaí (relação em massa, em relação ao solo seco), incorporadas de forma aleatória e cuidadosamente homogeneizadas durante a mistura. Esse teor foi selecionado com base em resultados prévios do grupo (Silva et al., 2024), que indicaram desempenho mecânico favorável para essa ordem de grandeza de dosagem.

2.2.4 Ensaio de permeabilidade

A condutividade hidráulica foi determinada em laboratório para as duas condições (areia e compósito solo-fibra). Considerando os valores reduzidos de permeabilidade e a maior confiabilidade operacional para esse cenário, adotou-se o permeâmetro de carga variável, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021). Os resultados foram utilizados tanto para comparação direta entre as misturas quanto como dado de entrada para a etapa numérica.

2.2.5 Modelo físico em escala reduzida: montagem e visualização das linhas de fluxo

Para gerar as linhas de fluxo no compósito solo-fibra, foi construído um modelo físico representativo da percolação na fundação de uma barragem de concreto. Utilizou-se um tanque de vidro (aquário) com dimensões internas de 58 cm × 24 cm × 25 cm, no qual foi instalado um protótipo de barragem em acrílico (Figura 2). O interior do protótipo foi então preenchido com pedregulhos de forma a aumentar sua massa, simulando assim uma barragem de gravidade.

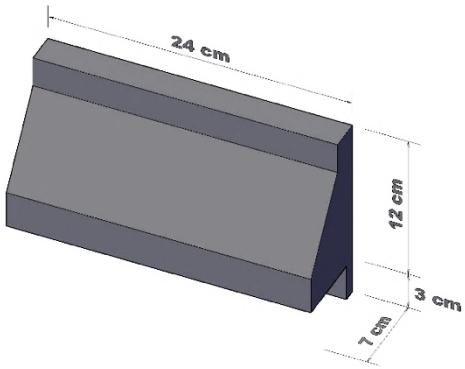


Figura 2. Geometria do protótipo de barragem.

A fundação foi montada em seis camadas com 2,5 cm de altura cada, garantindo a manutenção da compacidade relativa adotada e buscando homogeneidade ao longo do volume. A instalação do protótipo nas camadas superiores demandou maior cuidado para evitar heterogeneidades localizadas, especialmente no contato com a estrutura (Figura 3).

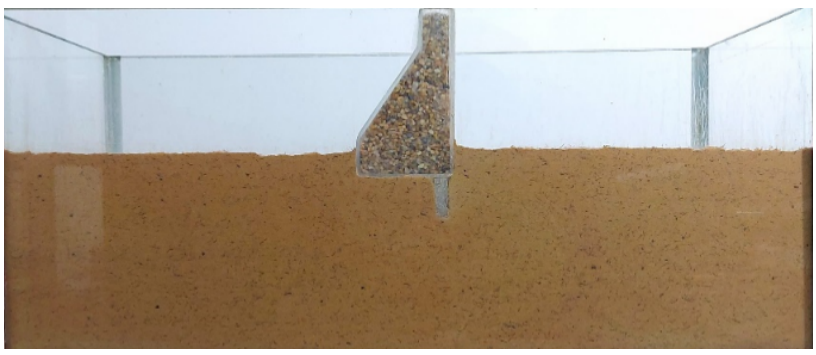


Figura 3. Vista lateral do modelo físico.

Após a moldagem, procedeu-se à saturação gradual do meio poroso por alimentação lenta de água, utilizando equipo conectado a reservatório, com o objetivo de minimizar aprisionamento de ar e perturbações no arranjo do material. A saturação foi conduzida por aproximadamente 24 horas.

Com o sistema saturado, foram então impostas condições de contorno hidráulicas representativas: a montante, a lâmina d'água foi elevada em 9 cm (mantendo borda livre de 1 cm na estrutura), enquanto a jusante foi mantido o nível de 1 cm, estabelecendo gradiente hidráulico controlado. Após a estabilização dos níveis, iniciou-se a injeção de corante a montante no contato fundação-vidro, em três pontos igualmente espaçados,

permitindo o rastreamento visual das trajetórias de percolação.

O desenvolvimento das linhas de fluxo foi registrado com câmera fotográfica de alta resolução ao longo de uma semana, com monitoramento diário, de modo a acompanhar a evolução espacial e temporal do traçador no interior do meio poroso.

2.2.6 Modelagem numérica no SEEP/W

Em paralelo ao modelo físico, foi realizada simulação de percolação no software SEEP/W, adotando-se a mesma geometria do protótipo e as mesmas condições de contorno hidráulicas (níveis a montante e jusante), apenas para o solo puro. Os valores de condutividade hidráulica determinados em laboratório foram inseridos como parâmetros do material, e as linhas de fluxo geradas numericamente foram comparadas às observadas experimentalmente, com foco na identificação de similaridades/diferenças quanto ao padrão de percolação e à ocorrência (ou não) de caminhos preferenciais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização física do solo

A curva granulométrica do material utilizado (Figura 7) evidencia predominância da fração areia, com 78% do total, composta por 55% de areia fina, 19% de areia média e 4% de areia grossa. As frações finas correspondem a 20% de silte e 2% de argila. Esse arranjo granulométrico é compatível com a classificação SM (areia siltosa) pelo sistema SUCS, indicando um solo arenoso com presença significativa de finos não plásticos ou de baixa plasticidade, o que pode influenciar tanto a compactação quanto o regime de percolação observado em laboratório.

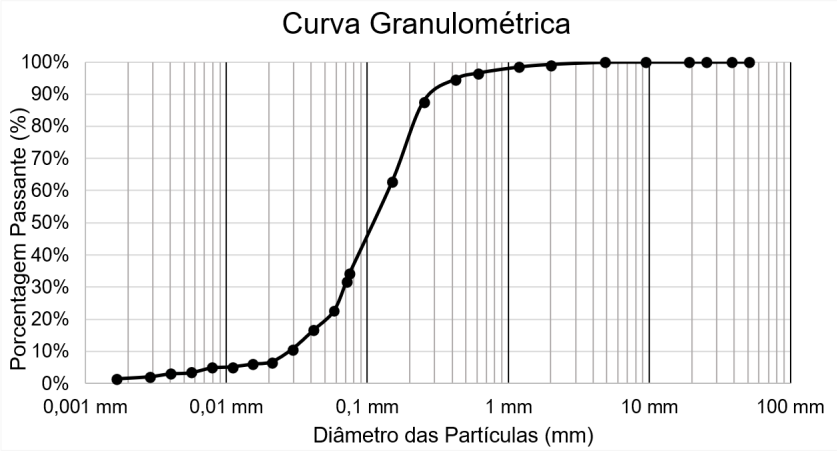


Figura 4. Curva de distribuição granulométrica do solo.

Os índices físicos complementares obtidos — massa específica real dos grãos Gs = 2,63, coeficiente de uniformidade C_u = 5,4 e coeficiente de curvatura C_c = 1,3 — sugerem uma areia com distribuição granulométrica relativamente bem graduada, o que tende a favorecer um esqueleto granular mais estável e reduzir a probabilidade de formação espontânea de macrocanais de fluxo quando a amostra é montada de modo homogêneo.

3.2 Índices de vazios e condições de moldagem

Os valores medidos para os índices de vazios foram $e_{máx}$ = 1,10 e $e_{mín}$ = 0,64, parâmetros fundamentais para o controle do estado de compactação por compacidade relativa. Com base nesses valores e na compacidade relativa adotada de 70%, foi possível definir a massa necessária para moldagem das amostras utilizadas no permeâmetro (aproximadamente 1487 g) e estimar o consumo de material para o modelo físico, que demandou cerca de 31 kg de solo. O controle por C_r é particularmente importante neste estudo, pois

variações locais de densidade poderiam, por si só, alterar a condutividade e o padrão de percolação, dificultando a atribuição de efeitos à presença das fibras.

3.3 Condutividade hidráulica: solo versus compósito areia–fibra

Os resultados do ensaio de permeabilidade indicam que a adição de 1% de fibras de açaí promoveu um aumento numérico discreto na condutividade hidráulica, passando de $3{,}14\times10^{-6}$ m/s (solo puro) para $3{,}92\times10^{-6}$ m/s (compósito solo-fibra). Apesar desse incremento, ambos os materiais permaneceram na mesma ordem de grandeza (10^{-6} m/s), sugerindo que a inclusão de fibras, na dosagem e morfologia adotadas, não foi suficiente para alterar de forma marcante o regime global de percolação do meio poroso.

Esse resultado é coerente com a interpretação de que fibras podem introduzir descontinuidades locais e microvazios adicionais, contribuindo para aumentos modestos de permeabilidade. Em compósitos solo-fibra, Faustino & Ferreira (2024) reportou incrementos de condutividade hidráulica que podem chegar a cerca de 31%, sem necessariamente modificar a ordem de grandeza. No presente estudo, a diferença observada se mantém nessa lógica: há variação numérica, mas não se identifica mudança expressiva do comportamento hidráulico global. Ainda assim, é importante destacar que a permeabilidade, isoladamente, não é suficiente para concluir sobre a existência de caminhos preferenciais, motivo pelo qual a avaliação direta das linhas de fluxo constitui etapa central do trabalho.

3.4 Linhas de fluxo no modelo físico e comparação com SEEP/W

A visualização experimental por traçador permitiu acompanhar a evolução espacial e temporal da percolação no modelo físico (Figura 5). Após a injeção de tinta a montante, observou-se a formação progressiva das trajetórias de fluxo, com desenvolvimento gradual em direção a jusante. A linha de fluxo mais próxima à estrutura foi a que apresentou maior avanço ao longo do período monitorado, completando a trajetória montante–jusante no intervalo observado. Esse comportamento é consistente com a tendência de maiores gradientes hidráulicos e maior “atratividade” do fluxo na região adjacente à barragem, como também observado por Moreira, Cavalcante & Costa (2022).

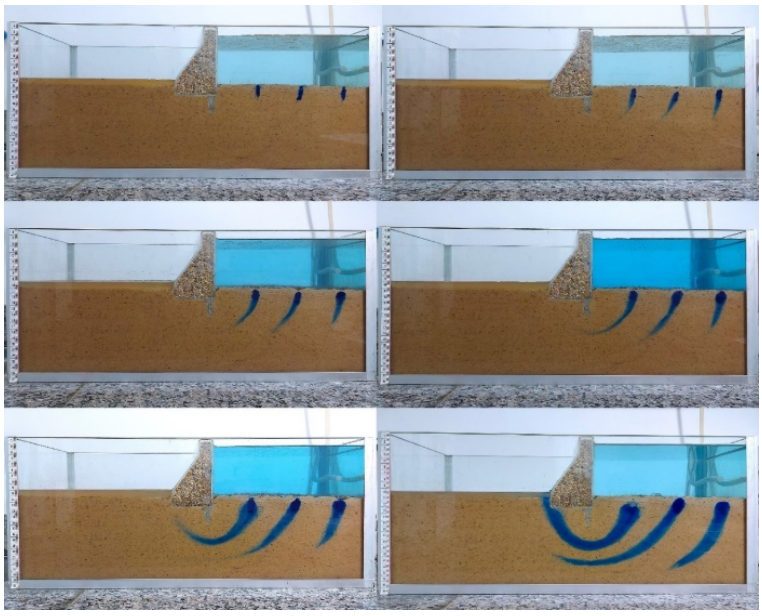


Figura 5. Evolução das linhas de fluxo no compósito solo-fibra.

No resultado do SEEP/W (Figura 6), as setas de velocidade indicam o sentido do escoamento e destacam as regiões de maior intensidade de percolação, enquanto as linhas de fluxo e equipotenciais permitem visualizar a distribuição do gradiente hidráulico no maciço. A etapa numérica no SEEP/W reproduziu um padrão de fluxo regular, característico de meios homogêneos com condutividade aproximadamente isotrópica: as linhas de

fluxo e as equipotenciais apresentaram distribuição uniforme, sem concentrações abruptas ou desvios que sugerissem canalização preferencial.

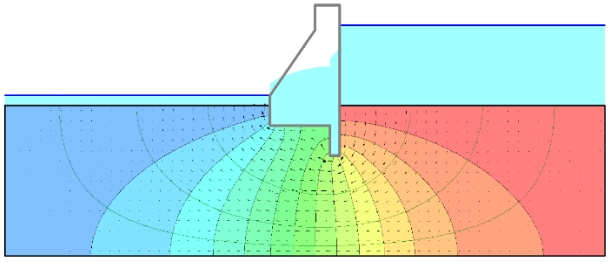


Figura 6. Simulação das linhas de fluxo no solo puro.

De forma qualitativa, o traçado do corante no modelo físico mostrou trajetórias compatíveis com essa configuração global do fluxo, especialmente quanto ao desenvolvimento de caminhos suaves e contínuos, sem evidência de canalização localizada; diferenças pontuais na extensão/definição das curvas observadas em laboratório são atribuídas ao tempo de avanço do traçador e às limitações de visualização do ensaio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o efeito da incorporação de 1% de fibras de açaí no comportamento hidráulico de uma areia lavada, combinando ensaios de permeabilidade, modelo físico com visualização de linhas de fluxo por traçador e modelagem numérica no SEEP/W. Os resultados de laboratório indicaram que a adição de fibras promoveu apenas um incremento numérico discreto na condutividade hidráulica, mantendo-se a mesma ordem de grandeza do solo de referência. Assim, para a dosagem, geometria das fibras e condição de moldagem adotadas, a presença do reforço não se refletiu em uma alteração marcante do parâmetro global de percolação.

A visualização das trajetórias no modelo físico evidenciou um padrão de escoamento contínuo e bem definido, sem indícios de canalização localizada associada à presença das fibras. Em paralelo, a simulação no SEEP/W para o solo puro reproduziu um campo de percolação regular, com linhas de fluxo e equipotenciais distribuídas de forma uniforme. A comparação qualitativa entre a configuração prevista numericamente e as trajetórias observadas com traçador mostrou compatibilidade quanto ao comportamento global do fluxo, sendo as diferenças pontuais atribuídas principalmente ao tempo de avanço do corante e às limitações inerentes ao método de visualização.

De forma aplicada, os resultados sugerem que o reforço com fibras de açaí, nas condições investigadas, pode ser empregado sem induzir mudanças relevantes no padrão de percolação do meio arenoso, aspecto desejável em situações nas quais a previsibilidade hidráulica é requisito de segurança. Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros investiguem outros teores, comprimentos e procedimentos de mistura, bem como condições hidráulicas mais severas e simulações também para o compósito, a fim de delimitar com maior robustez os intervalos em que o reforço pode (ou não) alterar a resposta hidráulica.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília pelo apoio à pesquisa, ao Instituto Federal de Rondônia pelo apoio contínuo à capacitação docente e aos laboratórios Geofluxo e New Geotechnical Materials, da Universidade de Brasília, pelos suporte e recursos necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 48 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2020). NBR 16840. *Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2020). NBR 16843. *Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2021). NBR 14545. *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável*. Rio de Janeiro.

Carvalho, L. M. C. D., Monteiro, F. F., & Casagrande, M. D. T. (2023) Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand. *Soils and Rocks*, 46, e2023002822.

Castro, C. L. de. (2020) *Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 121 p.

Curcio, D. S. (2008) *Comportamento Hidromecânico de Compósito Solo-fibra*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 129 p.

Faustino, O. W. C; & Ferreira, S. R. de M. (2024) Comportamento hidromecânico e processo de formação de fissuras em solo expansivo reforçado com fibras de coco verde. *Revista de Geociências do Nordeste*, 10(2), 348–362.

Gomes, N. C. (2018) *Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras PET para Aplicação em Barreiras de Contenção de Resíduos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Enhenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 60 p.

Leão, M. F. (2018) *Fundamentos da mecânica dos solos: Origem e propriedades dos solos*, Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 216 p.

Massad, F. (2003) *Obras de terra, curso básico de geotecnia*, 2nd ed., São Paulo: Oficina de textos, 216 p.

Moreira, G. R., Cavalcante, A. L. B., & Costa, K. R. C. B. (2022) Estudos laboratoriais para a análise do fenômeno de erosão interna. *Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia*, Brasília.

Oliveira, T. C. F., Dezen, B. G. S., Dahmer R. R., Antonio, I. O.; & Bizarreta-Ortega J. C. Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra. (2018) In: *Anais eletrônicos do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Salvador, v. III.

Pinto, C.S. (2011) Curso básico de mecânica dos solos, 3nd ed., Oficina de Textos, São Paulo.

Silva, A. B., Gonzaga, L. B. T., Cavalcante, A. L. B., & Casagrande, M. D. T. (2024) Ecoengenharia em geotecnia: utilização de fibras de açaí da Amazônia (euterpe oleracea) no melhoramento de solos arenosos. In: *Anais eletrônicos do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú.

Silveira, M. V., Ferreira, J. W. S., & Casagrande, M. D. T. (2022) Effect of Surface Treatment on Natural Aging and Mechanical Behavior of Sisal Fiber–Reinforced Sand Composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34 (6).

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/110

NDVI e EUPS Aplicados ao Mapeamento da Suscetibilidade à Erosão em Pirapora e Buritizeiro (MG)

Marcus Vinícius Ramos de Souza
Discente em Engenharia Civil , IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcusramosdesouza@gmail.com

Breno Alcântara Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, breno.silva@ifnmg.edu.br

Áureo da Silva Santos
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, aureo.santos@ifnmg.edu.br

Marcos Alves da Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcos.silva@ifnmg.edu.br

RESUMO: As atividades humanas intensificam e condicionam os processos erosivos, tornando essenciais ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG) para identificar áreas suscetíveis e apoiar o planejamento ambiental. Este estudo teve como objetivo mapear a vulnerabilidade à erosão hídrica nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, no norte de Minas Gerais, utilizando a combinação de sensoriamento remoto, geoprocessamento e a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Para estimar os fatores da EUPS, foram empregados dados de precipitação, informações sobre o solo, modelo digital de elevação e imagens orbitais do Landsat 9. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi especialmente utilizado para determinar o fator de cobertura e manejo do solo. A álgebra de mapas em SIG permitiu a representação espacial da perda potencial de solo e a categorização das áreas de acordo com classes de suscetibilidade à erosão. Os resultados indicaram predominância de áreas com baixa a moderada suscetibilidade, enquanto as classes alta e muito alta concentraram-se em setores com maiores declividades e menor cobertura vegetal.

PALAVRAS-CHAVE: EUPS, NDVI, Erosão, Suscetibilidade, Pirapora, Buritizeiro

ABSTRACT: Human activities intensify and condition erosion processes, making remote sensing tools and geographic information systems (GIS) essential for identifying susceptible areas and supporting environmental planning. This study aimed to map vulnerability to water erosion in the municipalities of Pirapora and Buritizeiro, in northern Minas Gerais, using a combination of remote sensing, geoprocessing, and the Universal Soil Loss Equation (USLE). To estimate the USLS factors, precipitation data, soil information, digital elevation model, and Landsat 9 orbital images were used. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was specifically used to determine the soil cover and management factor. GIS map algebra allowed for the spatial representation of potential soil loss and the categorization of areas according to erosion susceptibility classes. The results indicated a predominance of areas with low to moderate susceptibility, while the high and very high classes were concentrated in sectors with steeper slopes and less vegetation cover.

KEYWORDS: USLE, NDVI, Erosion, Susceptibility, Pirapora, Buritizeiro

1 INTRODUÇÃO

As mudanças impostas ao meio físico pelas atividades humanas têm alterado de forma significativa o equilíbrio dos sistemas naturais, refletindo-se, entre outros aspectos, no comportamento dos processos erosivos. Ainda que a erosão faça parte da dinâmica natural da paisagem, sua intensidade e distribuição

espacial passam a ser fortemente condicionadas pelo uso e ocupação do solo. Diante da complexidade inerente à análise desse fenômeno em grandes extensões territoriais, ferramentas baseadas em modelagem espacial, sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG) assumem papel central na avaliação e compreensão da perda de solo em escala regional (Costa, Filho, Risso, 2007; Silva, Santos, Montenegro, 2012).

A avaliação dos processos erosivos em bacias hidrográficas é essencial para a identificação de áreas com maior suscetibilidade à erosão hídrica, subsidiando o planejamento territorial e a gestão ambiental. No Brasil, esse tipo de análise converge com instrumentos de ordenamento do uso do solo, como o Zoneamento Ecológico-Econômico. Além disso, a intensificação da erosão do solo gera impactos econômicos e ambientais, ao aumentar custos produtivos e estimular a expansão agrícola, reforçando a necessidade de práticas conservacionistas que mantenham as perdas de solo em níveis compatíveis com sua capacidade de regeneração (Matos, 2015; Back, 2023).

A elaboração de mapas de risco de erosão baseia-se, de modo geral, na integração de abordagens quantitativas e qualitativas em ambiente SIG, sendo a primeira fundamentada na Universal Soil Loss Equation, USLE, (Equação Universal de Perda de Solo, EUPS) e a segunda estruturada a partir de matrizes de decisão, que permitem hierarquizar áreas mais suscetíveis e subsidiar o planejamento do uso da terra. A EUPS estima a perda média anual de solo por erosão hídrica a partir da interação de fatores ambientais e antrópicos, em que o fator R representa a erosividade das chuvas, o fator K a erodibilidade do solo, os fatores L e S as características do relevo associadas ao comprimento de rampa e à declividade, o fator C a cobertura e o manejo do solo, e o fator P as práticas conservacionistas adotadas. A análise integrada desses fatores possibilita a avaliação espacial do risco de erosão e a identificação de áreas prioritárias para ações de conservação do solo (Pires et al., 2023; Mata et al., 2007; Oliveira et al., 2010).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices espectrais mais consolidados e amplamente utilizados em estudos ambientais, devido à sua simplicidade de cálculo e à ampla disponibilidade das bandas do vermelho e do infravermelho próximo nos sensores orbitais. Na modelagem da erosão hídrica, o NDVI tem sido empregado para a estimativa do fator C da EUPS, por refletir a densidade da cobertura vegetal, assumindo valores próximos a +1 em áreas densamente vegetadas e valores menores em superfícies expostas. Nesse contexto, metodologias baseadas no reescalonamento do NDVI têm sido propostas para obter um fator C ajustado, no qual maiores níveis de cobertura vegetal resultam em valores reduzidos de C, indicando maior proteção do solo, o que tem motivado esforços contínuos de calibração desse fator a partir de índices de vegetação (Giovos et al., 2021; Durigon et al., 2014; Félix, 2023).

Este trabalho teve como objetivo elaborar mapas de suscetibilidade à erosão hídrica nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, no estado de Minas Gerais, por meio de NDVI com parâmetros físicos do relevo e do solo, bem como com os componentes da EUPS. Os fatores R, K, P e LS foram empregados como variáveis auxiliares para a caracterização da suscetibilidade natural à erosão, enquanto o NDVI foi utilizado como base para a estimativa espacial do fator C, visando subsidiar o planejamento do uso da terra e a definição de áreas prioritárias para a adoção de práticas de manejo e conservação do solo voltadas à mitigação dos processos erosivos.

.

2 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritivo-analítica, fundamentada no uso de SIG e sensoriamento remoto, com aplicação da EUPS para estimar a suscetibilidade à erosão.

2.1 Caracterização dos Municípios

A área analisada abrange os municípios de Pirapora e Buritizeiro, situados no Norte do estado de Minas Gerais, ao longo das margens do rio São Francisco. Simultaneamente, esses municípios possuem uma área territorial de 7.767 km² e uma população de 79.516 habitantes, conforme o último censo demográfico, resultando em uma densidade média de 10,24 hab/km². Ambos constituem um aglomerado urbano contíguo, com expressiva importância regional no contexto estadual. A Figura 1 apresenta a localização geográfica dos municípios abordados.

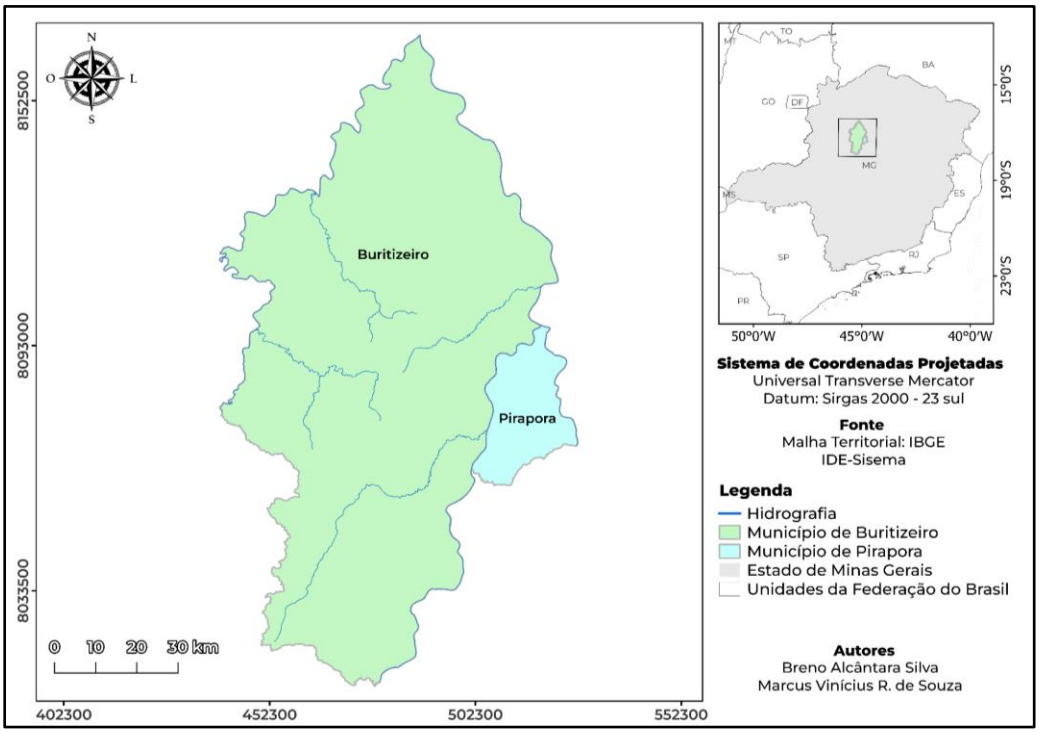


Figura 1. Localização dos municípios abordados no norte de Minas Gerais
Fonte: Autores, 2026

2.2 Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

A EUPS é um modelo empírico utilizado para estimar a perda média anual de solo por erosão hídrica, a partir da integração dos fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas. A utilização em um ambiente de SIG possibilita a espacialização da propensão à erosão, tornando-se uma ferramenta objetiva para análises ambientais e suporte ao planejamento territorial. A EUPS é representada por $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, na qual cada fator expressa a contribuição de diferentes condicionantes da erosão hídrica.

2.2.1 Determinação do fator CP a partir da Análise do Índice de Vegetação (NDVI)

O NDVI é empregado por permitir a estimativa da densidade de biomassa vegetal e por reduzir interferências relacionadas à variação de iluminação, especialmente em áreas com relevo irregular. O NDVI foi calculado a partir de imagens dos sensores Landsat 9, obtidas na plataforma EarthExplorer, utilizando a formulação recomendada para esses sensores, conforme apresentado na Equação 1.

$$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4) \quad (1)$$

Os valores obtidos permitiram caracterizar a distribuição da cobertura vegetal e subsidiar a análise da suscetibilidade à erosão, uma vez que áreas mais vegetadas oferecem maior proteção ao solo. O NDVI foi utilizado na estimativa do fator (C) por meio de reescalonamento da cobertura vegetal, conforme metodologia proposta por Durigon et al. (2014), a partir da Equação 2.

$$Cr = (1 - NDVI) / 2 \quad (2)$$

Isso possibilitou a representação espacial do impacto do uso e da cobertura do solo. Levando em conta a falta de práticas de conservação na área de estudo, o fator (P) foi definido com um valor unitário 1,0.

2.2.2 Determinação do fator R (erosividade da chuva)

Segundo Nolêto (2005), a determinação do fator (R) para a microrregião de Sobral (CE) foi realizada a partir de uma relação empírica desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1980, *apud* Bertoni e Lombardi Neto, 1990), escolhida por demandar apenas dados de precipitação média mensal e anual, o que a torna adequada para áreas com restrição de informações pluviográficas. A partir dessa formulação, procedeu-se ao cálculo da erosividade das chuvas por meio da seguinte equação:

$$EI = \sum_{i=1}^{12} 67{,}355\,(P^2 mi/Pa)^{0,85} \quad (3)$$

em que (EI) é o índice mensal de erosão, (Pmi) indica a incidência mensal em milímetros e (Pa) corresponde à média anual em milímetros. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos.

Tabela 1. Média mensal do índice de erosividade

Estações	**Precipitação mês (mm)**												**EI**
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Cachoeira da Manteiga	192,8	122,4	118,5	48,4	13,8	3,8	2,2	4,0	16,4	76,4	161,0	221,5	6262,6
Guaicuí	202,1	118,0	118,4	35,5	13,8	5,4	6,3	3,1	18,9	93,0	157,2	206,5	6180,5
Pirapora Barreiro	222,0	128,5	118,0	52,1	13,5	4,9	8,7	5,2	23,1	116,4	217,3	237,6	7043,2
Pirapora	210,0	100,9	122,0	48,8	12,1	3,1	2,9	4,4	24,1	83,3	200,7	224,7	6625,8
Buritizeiro	215,6	121,3	157,1	52,3	11,3	0,9	0,1	6,4	12,3	83,4	219,8	258,1	7341,2

2.2.3 Determinação do fator K

O fator (K) expressa a suscetibilidade natural do solo à desagregação e ao transporte de partículas pela ação da chuva e do escoamento superficial, estando relacionado às propriedades físicas e químicas do solo. Os valores adotados para esse fator encontram-se na Tabela 2, com base em referências bibliográficas.

Tabela 2. Valores do fator de erodibilidade do solo (K)

Tipo de Solo	**K**
Cambissolo Háplico	0,06
Gleissolo	0,219
Latossolo Vermelho	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,02
Neossolo Flúvico	0,0366
Neossolo Litólico	0,0362
Neossolo Quartzarênico	0,487

Fonte: Adaptado de Oliveira et al., (2023) e Matos, (2015)

2.2.3 Determinação do fator LS

Segundo Oliveira et al. (2010), o fator (L) está associado ao efeito do comprimento da encosta sobre a intensidade dos processos erosivos, considerando a variação da perda de solo ao longo de diferentes extensões de rampa. Com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado no QGIS, esse fator foi estimado por meio da Equação 4, conforme a metodologia proposto por Desmet e Govers (1996),

$$\boldsymbol{L_{i,j} = [(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}]/[X_{i,j}{}^{m} \cdot D^{m+2}(22,13)^{m}]} \quad (4)$$

Para a determinação do expoente $\boldsymbol{m}$, foi adotada a formulação proposta por McCool et al. (1987, 1989), conforme descrito por Foster et al. (1977). O valor de $\boldsymbol{m}$, foi calculado em função do parâmetro β, conforme a Equação 5, a qual estabelece a relação entre esses coeficientes no contexto da modelagem dos processos erosivos.

$$m = \beta/(1+\beta) \quad (5)$$

O parâmetro β representa a relação entre os processos de erosão concentrada em sulcos e a erosão difusa ocorrente entre sulcos, sendo estimado com base na declividade do terreno, de acordo com a formulação apresentada por McCool et al. (1989). A Equação 6 apresenta a formulação.

$$\beta = (sen\theta/0{,}0896)/([3(sen\theta)^{0,8} + 0{,}56] \quad (6)$$

A declividade do terreno (S) foi determinada com base nos procedimentos metodológicos propostos por McCool et al. (1987), utilizando as Equações 7 e 8 apresentadas neste estudo.

$$S = 10{,}8\ sen\theta\ +\ 0{,}03\ (S < 9\%) \quad (7)$$
$$S = 16{,}8\ sen\theta\ -\ 0{,}50\ (S\ \geq\ 9\%) \quad (8)$$

2.3 Cálculo da perda média anual de solo por álgebra de mapas em ambiente SIG

Para estimar a perda média anual de solo (A), obtida pela integração dos fatores R, K, L, S, C e P da EUPS, foram elaborados mapas temáticos de cada fator em ambiente SIG. A álgebra de mapas, realizada por meio da Calculadora Raster do QGIS, possibilitou a integração espacial das variáveis e a geração do mapa final de erosão hídrica, permitindo a identificação das áreas mais suscetíveis nos municípios de Pirapora e Buritizeiro. A Figura 2 apresenta os fatores utilizados na álgebras de mapas.

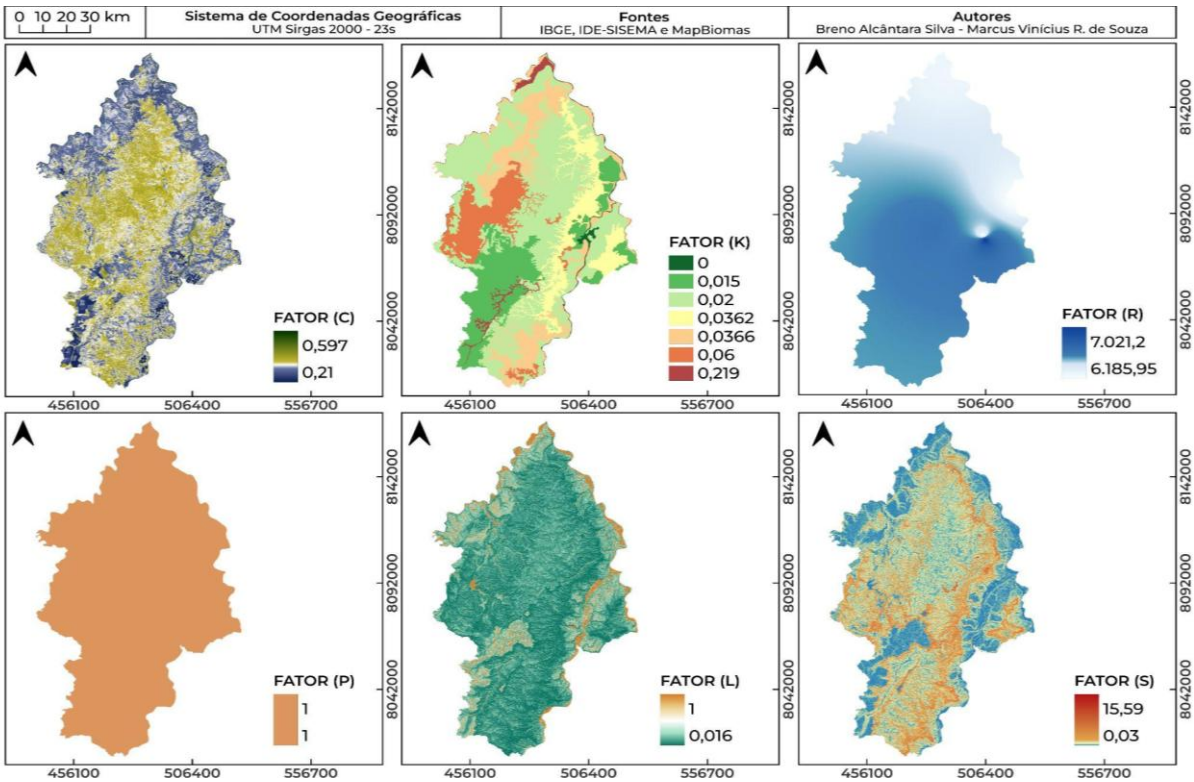


Figura 02. Mapas temáticos dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)
Fonte: Autores, 2026

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do mapa de perda de solo revela uma acentuada variabilidade espacial da suscetibilidade à erosão na área de estudo. Os tons de cinza escuro, predominantes em grande parte do território, indicam

nenhuma ou baixa perda de solo, associada, em geral, a áreas de relevo mais suave, maior estabilidade superficial e presença de cobertura vegetal mais eficiente ou menor concentração do escoamento superficial.

As classes intermediárias, representadas por tons de cinza claro e bege, indicam perda de solo moderada, distribuída de maneira relativamente difusa. Essas áreas ocorrem, em sua maioria, em zonas de transição topográfica, nas quais o aumento gradual da declividade e do comprimento da rampa passa a influenciar de forma mais significativa a dinâmica do escoamento superficial.

Por sua vez, as classes de alta e muito alta perda de solo, destacadas em tons de vermelho, apresentaram padrão espacial mais concentrado e, em muitos casos, linear, estando associadas a encostas com maiores declividades, maiores comprimentos de rampa e proximidade da rede de drenagem. Esses setores evidenciam o forte controle topográfico sobre a erosão hídrica, uma vez que a maior energia do escoamento superficial favorece a desagregação e o transporte de sedimentos.

A predominância dessas classes em áreas de maior altitude e relevo mais acidentado confirma o papel determinante da topografia na distribuição espacial da perda de solo. Em contraste, as áreas de menor altitude e relevo suavizado apresentam menores taxas de erosão, refletindo condições geomorfológicas mais estáveis. A Figura 3 expõe o mapa de perda de solo obtido através da EUPS, reclassificados de acordo com a recomendação da FAO (1967).

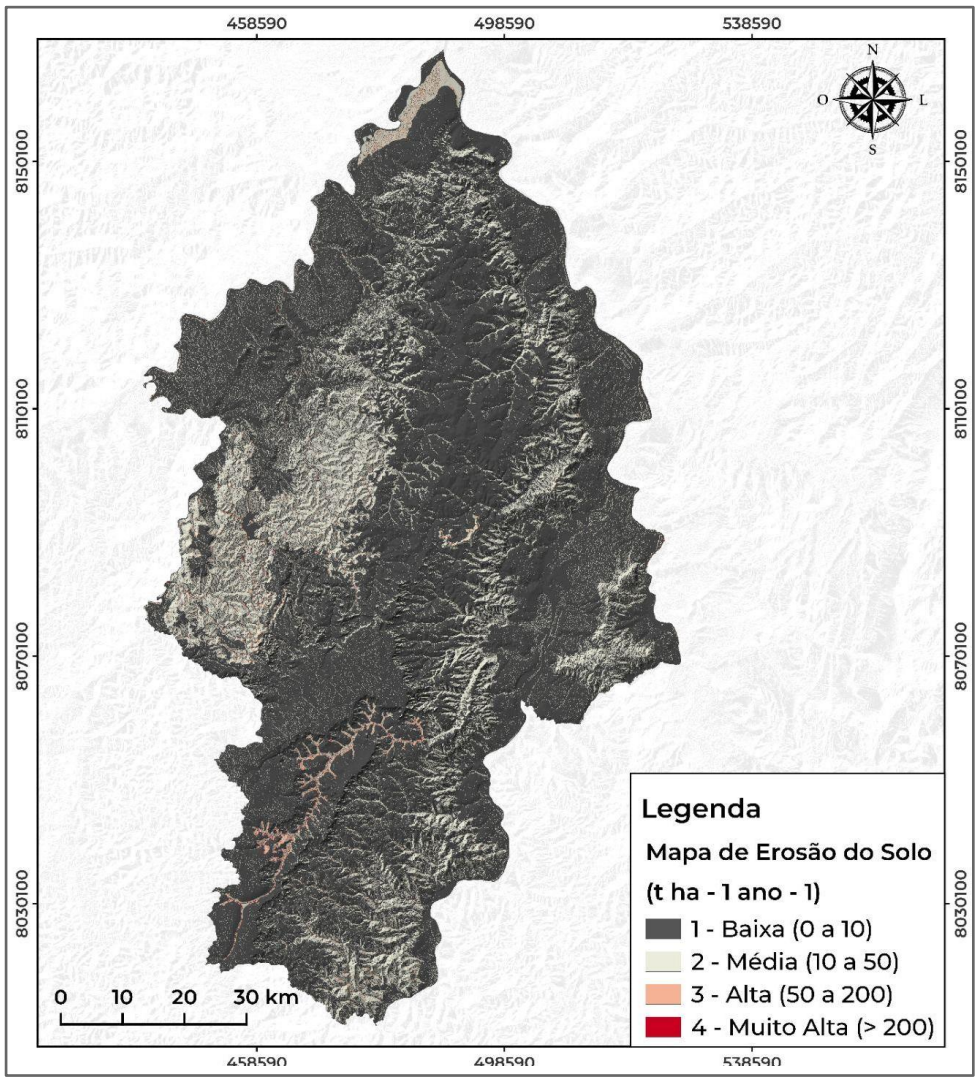


Figura 3. Mapa de Erosão do Solo
Fonte: Autores, 2026

A Tabela 3 apresenta os resultados detalhados do mapa, com os valores correspondentes às áreas em km² e os respectivos percentuais de ocupação.

Tabela 3. Resultados das análises do mapeamento de suscetibilidade a erosão

Suscetibilidade	Área (km²)	% da área
1 - Nenhuma ou ligeira	5824,039	75,28
2 - Moderada	1808,646	23,38
3 - Alta	97,623	1,26
4 - Muito Alta	6,417	0,08
Total	**7736,725**	**100%**

4 CONCLUSÃO

A classificação das terras segundo a suscetibilidade à erosão mostrou-se eficiente como instrumento de apoio ao planejamento ambiental. A integração de técnicas de geoprocessamento possibilitou a delimitação espacial das áreas mais vulneráveis nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, a partir da combinação de dados provenientes de múltiplas fontes. Os resultados obtidos por meio do NDVI indicaram setores com menor proteção vegetal, evidenciando a necessidade de análises complementares para orientar a adoção de medidas conservacionistas e o uso sustentável do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio e Desenvolvimento do Ensino Tecnológico (FADETEC) pelo financiamento da pesquisa e ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), campus Pirapora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACK, A. J. Estimativas de perdas de solo por erosão hídrica por meio da Equação Universal de Perdas de Solo. *Boletim Técnico*, *[S. l.]*, n. 210, 2023. Disponível em: https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/BT/article/view/1714. Acesso em: 02 jan. 2026.

COSTA, F. D. S., SOUZA FILHO, C. D., & RISSO, A. (2007). Análise temporal de NDVI e mapas potenciais naturais de erosão na região do Vale do Ribeira, São Paulo. *Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*, 3833-3839.

DA SILVA, R. M., SANTOS, C. A. S., MONTENEGRO, S. M. G. L. (2013). Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and remote sensing. *Revista Brasileira de Cartografia.* 65. 881-894.

DE OLIVEIRA, P. T. S., RODRIGUES, D. B. B., SOBRINHO, T. A., PANACHUKI, E. (2010). Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. *Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science: V*, *5*(2). doi:10.4136/ambi-agua.149 Disponível em: https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/1586. Acesso em: 20 de dez. de 2025.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 51, n. 5, p. 427–433, 1996.

DURIGON, V. L., CARVALHO, D. F., ANTUNES, M. A. H., OLIVEIRA, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 441–453. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. La erosión del suelo por el água. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. *Cuadernos de fomento agropecuário da Organizacion De Las Naciones Unidas*, Roma: FAO, n. 81, 207 p., 1967.

FELIX, F. C., (2023). *Estimativas indiretas do fator uso e manejo (C) da RUSLE em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, a partir de imagens obtidas por sensoriamento remoto orbital e proximal*. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/Filipe_Castro_Felix.pdf. Acesso em 19 de dez. de 2025.

GIOVOS, R., TASSOPOULOS, D., KALIVAS, D., LOUGKOS, N., & PRIOVOLOU, A. (2021). Índices de vegetação por sensoriamento remoto na viticultura: uma revisão crítica. *Agricultura* , *11* (5), 457. https://doi.org/10.3390/agriculture11050457.

MATA, C. L., CARVALHO JÚNIOR, O. A. de, DE CARVALHO, A. P. F., GOMES, R. A. T., MARTINS, É. de S., GUIMARÃES, R. F. Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (Mg) Por Meio da Equação Universal de Perda de Solos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, *[S. l.]*, v. 8, n. 2, 2007. DOI: 10.20502/rbg.v8i2.94. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/94. Acesso em: 29 jan. 2026.

MATOS, T. V. S., (2015). *Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)*. Universidade Federal de Minas Gerais. https://hdl.handle.net/1843/BUBD-A3FETB.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, p. 1387–1396, 1987.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 32, p. 1571–1576, 1989.

NOLÊTO, T. M. S. J. *Suscetibilidade geoambiental das terras secas da microrregião de Sobral – CE à desertificação*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – PRODEMA-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

OLIVEIRA, U. C., CIDRAL, W. E de S., SILVA, I. de S., EVANGELISTA, J. P., (2023). Distribuição espacial da perda de solo na bacia hidrográfica do Rio Itacolomi, Ceará, Brasil. *Ciência Geográfica - Bauru - XXVII - Vol. XXVII - (2)*. https://doi.org/10.57243/26755122.XXVII2035

PIRES, F. R.; DE SOUZA, C. M.; MOREAU, M. S.; NARDOTTO JUNIOR, A. O.; DA ROCHA JUNIOR, P. R.; NASCIMENTO, A. L. Determinação do risco de erosão do solo utilizando um sistema de informações geográficas. *Observatório De La Economía Latinoamericana*, *[S. l.]*, v. 21, n. 9, p. 12609–12626, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n9-114. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/1522. Acesso em: 29 jan. 2026.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/111

Potencial de uso do fruto da *Sapindus saponaria* como estabilizante natural para fins geotécnicos

Bruno Rocha Nunes
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, unbsb061@gmail.com

Jessé Corrêa Côrtes
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jessecortes19@gmail,com

Brenda Aparecida Ferreira De Aquino
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, brendaferreira.aquino@gmail.com

Mateus Teixeira Crippa
Doutorando em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mateus.crippa@aluno.unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

José Wilson Dos Santos Ferreira
Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

RESUMO: A busca por soluções ambientalmente sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o desenvolvimento de estabilizantes alternativos que conciliem desempenho técnico e menor impacto ambiental. Nesse contexto, este estudo investigou o potencial do fruto da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico em duas matrizes distintas: uma areia pura e um solo arenoso do Distrito Federal. Além dos ensaios de caracterização física, foram realizados ensaios de compactação, com teores de adição do fruto de 10, 15, 20 e 30% para a areia pura e 10% para o solo arenoso, ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e análises microestruturais por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados de compactação indicaram redução da densidade seca máxima com o aumento do teor de fruto, atribuída à sua baixa densidade, e comportamento distinto quanto à umidade ótima: aumento para a areia pura e redução para o solo arenoso, mesmo frente à elevada capacidade de absorção de água do fruto. Nos ensaios de RCS, verificou-se incremento de resistência para a areia, associado ao efeito de aglutinação promovido pelo estabilizante, enquanto para o solo arenoso, o qual já contém finos em sua matriz, não se observaram melhorias significativas, tendências essas que foram corroboradas pelas imagens de MEV. A variabilidade entre triplicatas aumentou com o teor de adição, refletindo a heterogeneidade do material natural. Os resultados demonstram o potencial técnico e ambiental do uso do fruto de *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável para aplicações geotécnicas e abrindo perspectivas para o aproveitamento de recursos naturais renováveis em substituição a estabilizantes convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilizante orgânico; *Sapindus saponária;* Resistência à compressão simples; Microscopia Eletrônica de Varredura.

ABSTRACT: The search for environmentally sustainable solutions in geotechnical engineering has driven the development of alternative stabilizers that combine technical performance with lower environmental impact. In this context, this study investigated the potential of the fruit of the plant *Sapindus saponaria* as an organic stabilizer in two distinct matrices: a clean sand and a sandy soil from the Federal District (Brazil). In addition to physical characterization tests, compaction tests were performed with fruit addition contents of 10, 15, 20, and 30% for the clean sand and 10% for the sandy soil, along with unconfined compressive strength (UCS)

tests and microstructural analyses using scanning electron microscopy (SEM). The compaction results indicated a reduction in maximum dry density with increasing fruit content, attributed to its low density, and distinct behavior regarding optimum moisture content: an increase for the clean sand and a reduction for the sandy soil, despite the fruit's high water absorption capacity. In the UCS tests, an increase in strength was observed for the sand, associated with the agglomeration effect promoted by the stabilizer, whereas for the sandy soil—which already contains fines in its matrix—no significant improvements were observed; these trends were corroborated by the SEM images. Variability among triplicates increased with the addition content, reflecting the heterogeneity of the natural material. The results demonstrate the technical and environmental potential of using *Sapindus saponaria* fruit as an organic stabilizer, reinforcing its feasibility as a sustainable alternative for geotechnical applications and opening perspectives for the use of renewable natural resources to replace conventional stabilizers.

KEYWORDS: Organic stabilizer; *Sapindus saponaria*; Unconfined compressive strength; Scanning Electron Microscopy.

1 INTRODUÇÃO

A expansão populacional e urbana tem provocado mudanças significativas no meio ambiente, incluindo a alteração da cobertura do solo, a emissão de poluentes atmosféricos e a crescente demanda por recursos naturais, energia e moradia (SANTOS; JÚNIOR, 2021). Dentro desse contexto, a construção civil assume papel central, uma vez que, além de atender às necessidades habitacionais e produtivas, figura como uma das atividades que mais exploram recursos naturais e que mais geram resíduos sólidos (SANTOS, 2017). Estima-se que, em cidades com mais de 500 mil habitantes, os resíduos provenientes desse setor possam corresponder a aproximadamente 50% do total de resíduos sólidos urbanos em massa, englobando materiais como concreto, argamassa, cerâmica, madeira, metais e plásticos (SANTOS; JÚNIOR, 2021).

A disposição inadequada desses resíduos e de outros contaminantes químicos resulta em impactos severos, como mortandade de espécies aquáticas, aumento de doenças de veiculação hídrica, depreciação de áreas urbanas e elevação dos custos para recuperação ambiental (BARSANO; BARBOSA; VIANA, 2014). Além disso, o próprio processo produtivo de insumos básicos da construção, como o cimento, envolve elevado consumo energético e emissões atmosféricas relevantes. A produção de clínquer requer temperaturas superiores a 1.200 ℃, liberando poluentes que incluem material particulado, óxidos de nitrogênio e enxofre, além de compostos orgânicos persistentes como dioxinas e furanos, considerados tóxicos e de difícil degradação (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009).

No campo da engenharia geotécnica, a estabilização de solos é uma prática essencial para aumentar resistência, reduzir compressibilidade e diminuir permeabilidade em obras como aterros, pavimentos, barragens e barreiras de contenção. Tradicionalmente, essa estabilização é alcançada por compactação ou pelo uso de aditivos como cal e cimento, que embora eficazes, implicam em custos ambientais elevados devido à extração intensiva de recursos e à emissão de gases de efeito estufa (SANTOS; JÚNIOR, 2021). Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis, capazes de aliar desempenho técnico ao menor impacto ambiental.

Nesse sentido, tem-se observado um crescente interesse na utilização de resíduos ou subprodutos de origem natural como aditivos estabilizantes. Entre as opções estudadas, destacam-se fibras vegetais como coco, bambu e sisal, que contribuem para a melhoria do comportamento mecânico do solo, embora apresentem limitações relacionadas à variabilidade de propriedades e à degradação ao longo do tempo. Mais recentemente, plantas contendo compostos bioativos têm sido investigadas em razão de sua capacidade de interagir quimicamente com as partículas do solo e de apresentar maior resistência à biodegradação, influenciando a coesão e a retenção de água.

Tradicionalmente utilizada como sabão natural, antifúngico e fitoterápico, a *Sapindus saponaria* surge como alternativa pouco explorada, sendo uma espécie abundante em diferentes regiões do Brasil e apresenta perfil fitoquímico singular (MURGU; RODRIGUES- FILHO, 2006). Estudos com o mesocarpo do fruto indicam a presença de diversas saponinas triterpênicas e oligoglicosídeos sesquiterpênicos, cujas concentrações alcançam, respectivamente, cerca de 110 mg g−1 (≈11% da amostra) e 540 mg g−1 (≈54%), valores obtidos a partir de extratos hidroalcoólicos (MeOH:H_2O, 3:2) submetidos a hidrólise alcalina

(MURGU; RODRIGUES-FILHO, 2006). Ressalta-se que tais proporções refletem a seletividade do solvente utilizado, isto é, enquanto a mistura hidroalcoólica favorece a extração de compostos de polaridade intermediária, um solvente aquoso tenderia a privilegiar oligoglicosídeos mais polares e a subestimar saponinas menos solúveis (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009).

Além disso, destaca-se que as saponinas presentes no fruto podem retardar processos de biodegradação devido à sua atividade antimicrobiana e tensoativa, o que contribui para maior estabilidade do material no tempo (GEORGE; PARIMELAZHAGAN; KUMAR, 2019). Paralelamente, a fração lipídica rica em glicerídeos tende a formar estruturas cristalinas rígidas durante a degradação, favorecendo a criação de uma matriz mais resistente (QI et al., 2021). Tais características reforçam a importância de compreender a interação entre a composição química do fruto e seu potencial papel como estabilizante de solo.

Assim, a investigação do uso de *Sapindus saponaria* triturada como aditivo em misturas de solo representa uma oportunidade de propor um estabilizante alternativo, sustentável e de base natural, unindo propriedades químicas intrínsecas a possíveis benefícios geotécnicos ainda pouco explorados na literatura.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de solos: areia fina comercializada em Brasília e solo arenoso da região do Distrito Federal. O estabilizante empregado foi o fruto de *Sapindus saponaria*, colhido antes do início do período chuvoso para minimizar seu teor de umidade. Após a coleta, a noz foi separada da semente e o fruto foi triturado. O produto resultante foi peneirado com malha de 2 mm, garantindo uniformidade do material incorporado aos solos.

2.2 Caracterização Física dos Solos

A caracterização física envolveu ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, com e sem uso de defloculante hexametafosfato de sódio, e determinação da massa específica dos grãos, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 17212 (2025) e NBR 7181 (2025).

A massa específica dos grãos foi determinada utilizando três picnômetros de 500 mL. Amostras de 60 g para o solo arenoso e areia foram imersas em água por 12 h e dispersas mecanicamente por 15 min. O material foi então transferido para os picnômetros, que foram aquecidos e submetidos a vácuo para remoção de ar dissolvido. Após 24 h em temperatura controlada, os picnômetros foram completados com água até a marca de calibração e pesados, permitindo o cálculo da massa específica dos grãos dos solos.

2.3 Ensaios de Compactação

Para a areia, foram avaliados os teores de 10%, 15%, 20% e 30% de adição da casca do fruto em relação à massa seca da areia, enquanto para o solo arenoso foi avaliado o solo puro e o teor de 10% de casca, selecionados com base em testes anteriores. Ressalta-se que, por se tratar de areia, não foi possível obter a curva de compactação para a situação pura, ao passo que no solo arenoso, por conter finos, a adição do fruto se deu em menor quantidade.

A compactação seguiu a norma ABNT NBR 7182 (2025), utilizando a energia normal de Proctor e cilindro padrão do ensaio. O material seco foi inicialmente misturado à casca e, em seguida, homogeneizado com água até atingir a umidade estimada. A compactação ocorreu em três camadas, aplicando-se 26 golpes por camada. Os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos foram aplicados para moldar os corpos de prova na etapa de investigação do comportamento mecânico.

2.4 Comportamento Mecânico

A resistência à compressão simples foi determinada em triplicata, conforme a ABNT NBR 12270. Os corpos de prova foram moldados em molde Mini-MCV, com diâmetro de 50,0 mm e altura de 100,0 mm, compactando-os em três camadas e deixados em cura ao ar por 14 dias. Adotou-se como controle de compactação um grau de compactação (GC) ≥ 90% e desvio de teor de umidade ótima de ±5%.

Durante a cura, os corpos de prova tiveram seu peso monitorado ao longo da secagem, sendo o ensaio de ruptura realizado apenas após a estabilização da massa, de modo a garantir um teor mínimo de umidade. Para acelerar o processo de secagem, os corpos de prova foram expostos a lâmpadas de infravermelho, condição em que a temperatura se manteve próxima de 40 ◦C e a umidade relativa do ar em torno de 30%.

2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microestrutura do solo e a distribuição do estabilizante foram investigadas por microscopia eletrônica de varredura. Fragmentos de amostras foram coletados com aproximadamente 1 cm³ de volume para avaliação microestrutural do solo por meio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo JEOL JCM-5000 Neoscope, no laboratório de microscopia da Universidade de Brasília (LabMicro-UnB), operado sob a tensão de aproximação de 10 kV, permitindo observar a interação entre partículas do solo e fibras do fruto de *Sapindus saponaria*.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaios de Caracterização

A caracterização dos materiais foi realizada a partir da massa específica dos grãos, análise granulométrica e, quando aplicável, determinação dos limites de consistência, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros granulométricos e de consistência dos solos estudados

Parâmetro	Areia	Solo Arenoso	
		Sem defl.	Com defl.
Massa específica dos grãos (g/cm3)	2,66	2,79	–
Fração areia (%)	83,79	58,14	50,02
Fração silte (%)	11,71	27,40	18,90
Fração argila (%)	3,50	14,46	31,08
LL (%)	–	34	–
LP (%)	–	21	–
IP (%)	–	13	–

A distribuição granulométrica da areia está representada na Figura 1, a partir da qual obteve-se os parâmetros d_{10} = 0,031, d_{30} = 0,072 e d_{60} = 0,169, bem como os coeficientes de uniformidade (C_u = 5,45) e de curvatura (C_c = 0,98). Os resultados indicam que o material possui granulometria mal graduada. Por se tratar de uma areia, não foram realizados os ensaios de limites de Atterberg, visto que o material não apresenta plasticidade.

Observa-se que, no caso do solo arenoso, a presença do defloculante promoveu a dispersão das partículas finas (silte e argila), resultando em maior porcentagem passante nas frações de diâmetro reduzido. Tal comportamento está associado à composição do solo arenoso, o qual apresenta 27,40% de silte e 14,46% de argila (Tabela 1). Na ausência do defloculante, ocorre a aglomeração das partículas finas por efeito das forças eletrostáticas e da presença de argilominerais, o que leva a uma curva granulométrica deslocada para maiores diâmetros aparentes. Com o uso do defloculante, essas partículas se dispersam adequadamente, evidenciando o real teor de finos do material.

Com base nos resultados de granulometria e nos limites de consistência, o solo arenoso foi classificado pelo sistema unificado de classificação dos solos (SUCS) como areia argilosa (SC). A Tabela 1 sintetiza os principais resultados obtidos para os dois materiais.

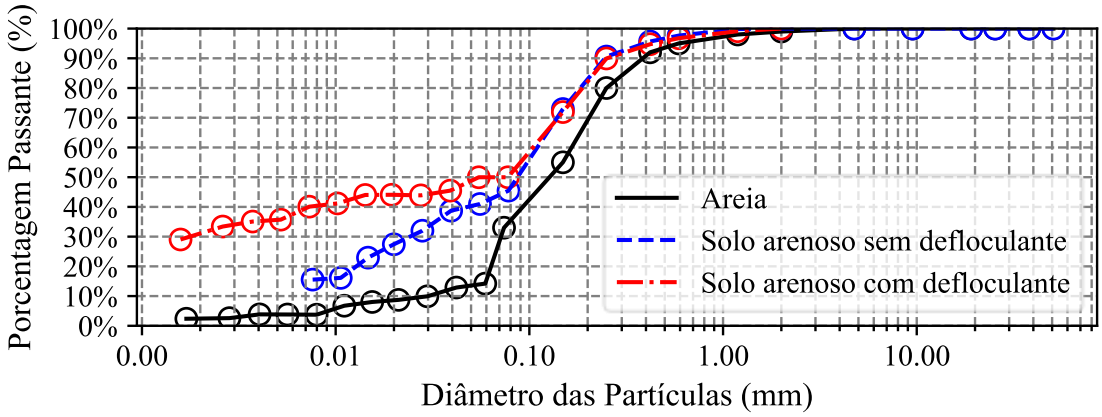


Figura 1. Distribuição granulometrica dos solos

3.2 Parâmetros de Compactação dos Compósitos

A partir das curvas de compactação para a areia e do solo arenoso estabilizados (Figura 2), observou-se que o aumento do teor de estabilizante resulta em deslocamento da umidade ótima para valores mais elevados e uma ligeira redução da massa específica seca máxima, evidenciando o efeito do material orgânico sobre o arranjo das partículas e densidade do compósito.

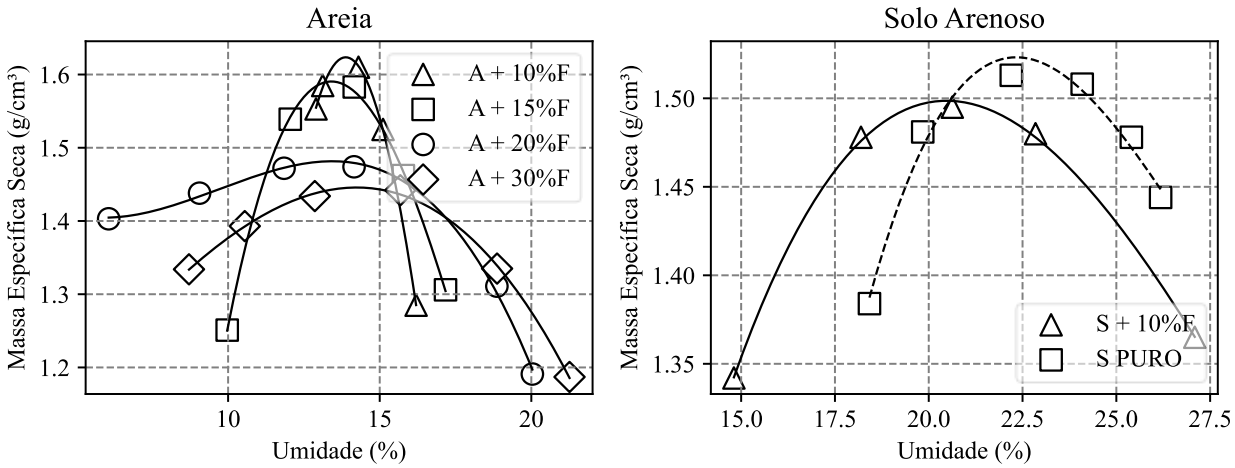


Figura 2. Curvas de compactação da areia e solo arenoso para diferentes teores de estabilizante

O aumento da umidade ótima no caso da areia está associado à maior quantidade de fruto presente, visto que, por se tratar de material natural, o fruto da planta *Sapindus saponaria* tende a absorver mais água para atingir o ponto de compactação ideal. Para o solo arenoso, observou-se que 10% produziu diminuição do teor de umidade ótima, possivelmente devido ao preenchimento de vazios pelo fruto. A diminuição da densidade seca máxima decorre da baixa densidade do material vegetal, que ocupa maior volume e reduz a densidade global da amostra.

A Tabela 2 resume os parâmetros de compactação obtidos para as condições investigadas. Observou-se que o solo com menor teor de estabilizante apresentou menor variação no ramo seco da curva, indicando que o aumento da concentração de fruto promoveu alterações mais significativas no comportamento de compactação, refletindo o efeito do material orgânico sobre a densidade e plasticidade do solo.

Tabela 2. Parâmetros de compactação

Condição	Umidade ótima W_{max} (%)	Massa específica seca ρ_d (g/cm^3)
Areia + 10%F	13,88	1,624
Areia + 15%F	13,41	1,591
Areia + 20%F	13,43	1,482
Areia + 30%F	14,24	1,446
Solo arenoso puro	22,33	1,523
Solo arenoso + 10%F	20,48	1,499

3.3 Comportamento Mecânico e Microestrutural

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) são apresentados nas Figura 3, obtidos a partir de corpos de prova curados por 14 dias e ensaiados em triplicata, com o objetivo de avaliar o efeito do teor de fruto na resistência mecânica dos compósitos. Por se tratar de um estabilizante de origem natural, observou-se que a variabilidade inerente ao material afetou o comportamento tensão-deformação, de modo que, para um mesmo teor de fruto, foi observado comportamento frágil e plástico com a deformação.

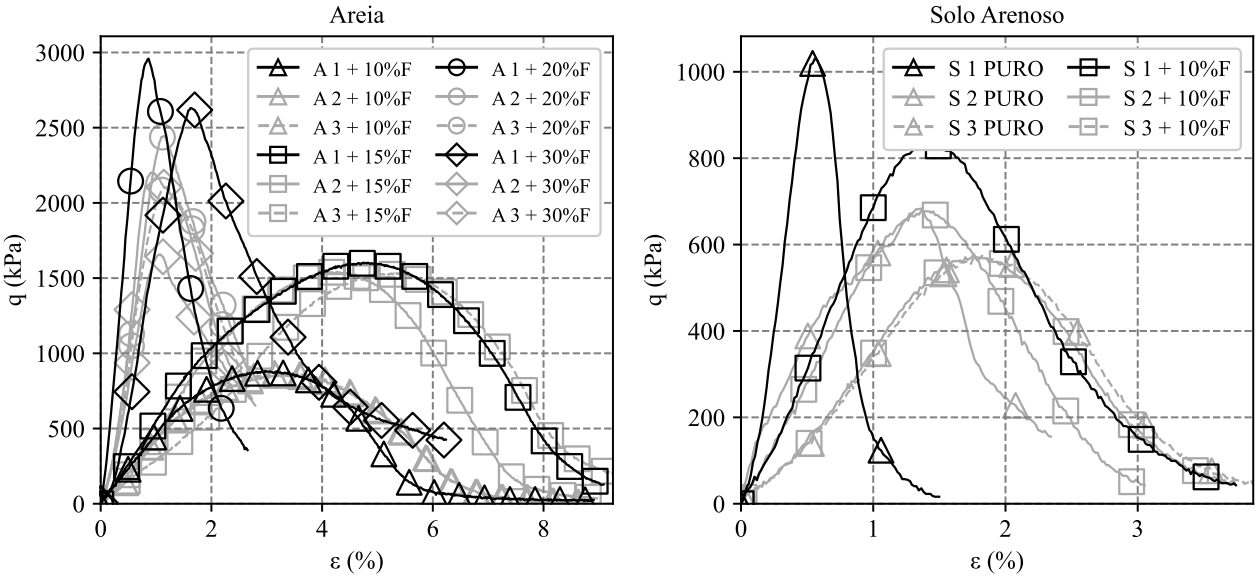


Figura 3. *Curvas tensão-deformação dos compósitos de areia e solo arenoso.*

Na Figura 4 são apresentados os valores médios de RCS obtidos, bem como a variabilidade apresentada entre as triplicatas. Pode-se notar que, quanto maior a quantidade de fruto adicionada, maior a variabilidade experimental. Para os compósitos de areia, o teor de 20% de adição de fruto resultou no maior valor médio de RCS. Em contraste, para o solo arenoso, observou-se menor variabilidade entre os ensaios, sem acréscimos significativos de resistência com a adição do estabilizante. Ressalta-se que, além da resistência à compressão simples avaliada neste estudo, a análise dos efeitos de durabilidade deve ser considerada em etapas futuras da pesquisa, especialmente tendo em vista aplicações voltadas ao controle de erosão.

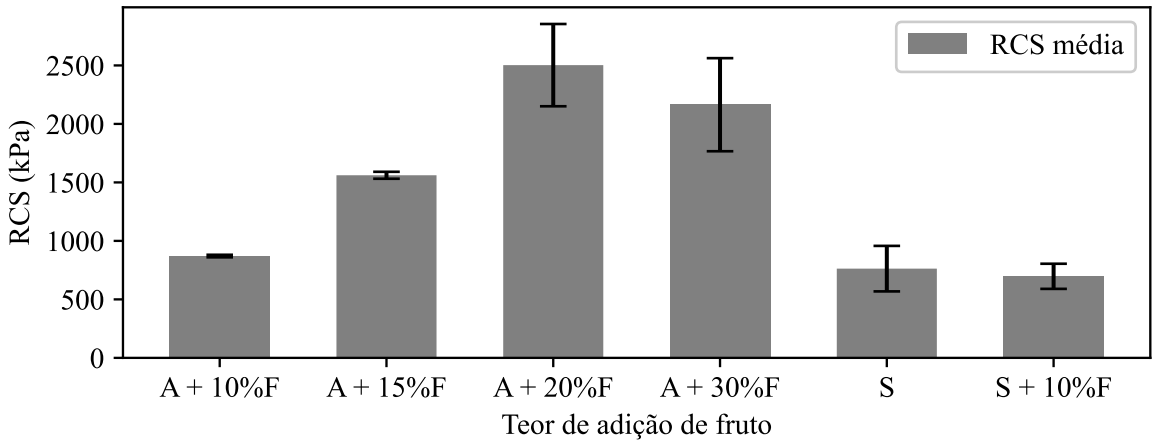
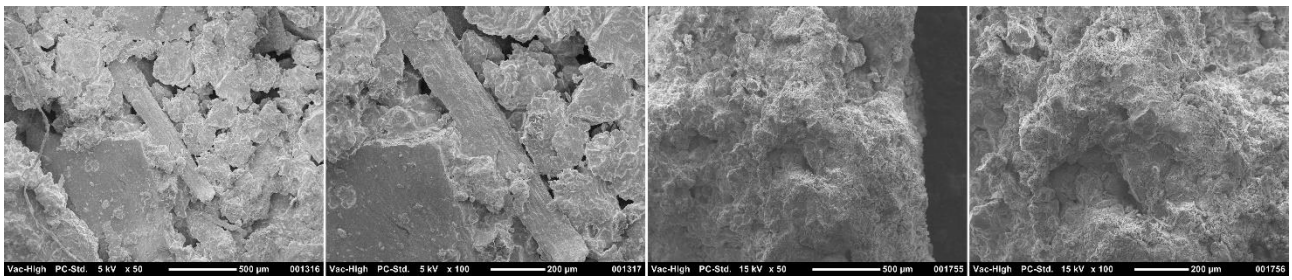


Figura 4. Valores médios de resistência à compressão e dispersão entre as triplicatas para todos os compósitos avaliados.

A análise da dispersão entre as triplicatas confirma a variabilidade inerente ao material, sendo essencial considerar a média e o desvio padrão para interpretação confiável dos resultados. As imagens de MEV das matrizes estabilizadas com o fruto de *Sapindus saponaria* são apresentadas na Figura 5. Por meio das imagens é possível observar a presença e interação do estabilizante nas matrizes. Percebe-se que na areia, devido a falta de argilomierais, distingue-se o fruto de maneira evidente, além da presença de vazios na matriz (Fig. 5a e 5b), ao passo que no solo arenoso (Fig. 5c e 5d), por conter fração de silte e argila, a matriz encontra-se mais agregada, entretanto, como observado nos resultados de comportamento mecânico, isso não se traduz em maior RCS.



(a) (b) (c) (d)

Figura 5. MEV das matrizes estabilizadas com fruto de Sapindus saponaria em diferentes ampliações: (a) Areia -50x, (b) Areia - 100x, (c) Solo arenoso - 50x, (d) Solo arenoso - 100x

4 CONCLUSÕES

A caracterização física e mecânica dos materiais investigados evidenciou diferenças marcantes entre a areia e o solo arenoso, relacionadas principalmente à composição granulométrica e ao comportamento frente ao uso do estabilizante natural proveniente do fruto de *Sapindus saponaria*. A areia apresentou granulometria mal graduada e ausência de plasticidade, enquanto o solo arenoso revelou frações significativas de silte e argila, refletidas em valores de limites de consistência e na necessidade de defloculante para adequada dispersão das partículas finas.

Os ensaios de compactação mostraram que a adição do estabilizante promoveu aumento da umidade ótima e redução da massa específica seca máxima, efeito associado tanto à capacidade de absorção de água do fruto quanto à sua baixa densidade. Esse comportamento se manifestou de forma distinta entre a areia e o solo arenoso, sendo que, no último, a presença de 10% de fruto indicou redução no teor de umidade ótima devido ao preenchimento de vazios.

No que se refere ao desempenho mecânico, os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) indicaram grande variabilidade nos resultados, característica inerente ao uso de estabilizantes naturais. Ainda

assim, verificou-se que para a areia, a adição de 20% de fruto resultou nos maiores valores médios de RCS, enquanto no solo arenoso não foram observados acréscimos significativos de resistência. As análises microestruturais confirmaram a interação do estabilizante com a matriz granular, destacando-se que no solo arenoso o arranjo mais agregado não resultou em ganhos de resistência.

De forma geral, os resultados apontam para o potencial do fruto de *Sapindus saponaria* como estabilizante alternativo em compósitos solo-estabilizante, sobretudo em solos não coesivos, embora sua aplicação demande atenção à variabilidade do material e ao efeito sobre as condições de compactação. Estudos complementares, investigando a durabilidade dos compósitos, diferentes tempos de cura e combinações com outros agentes estabilizantes, são recomendados para ampliar a compreensão do comportamento mecânico e aplicabilidade dos compósitos desenvolvidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF), pela bolsa de iniciação científica, auxílio financeiro e apoio à pesquisa no âmbito do Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04. Além disso, os autores agradecem o Laboratório de Micropaleontologia do Instituto de Geologia (IG) da Universidade de Brasília (UnB) pela realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 17212. *Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 127701. *Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solos coesivos*. Rio de Janeiro.

Barsano, P. R.; Barbosa, R. P.; Viana, V. J. (2014). *Poluição Ambiental e Saúde Pública*. São Paulo: Érica, 2014. E-book. ISBN 9788536521695. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521695/>.

George, B. P.; Parimelazhagan, T.; Kumar, R. (2019). *Antimicrobial and anti-biofilm activities of triterpenoid saponins*. Journal of Applied Microbiology, v. 127, n. 1, p. 118–129.

Milanez, B.; Fernandes, L. d. O.; Porto, M. F. d. S. (2009). *A coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente*. Ciência & Saúde Coletiva, v. 14, n. 6, p. 2143–2152.

Murgu, M.; Rodrigues-Filho, E. (2006). *Dereplication of glycosides from Sapindus saponaria using liquid chromatographymass spectrometry*. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 17, n. 7, p. 1281–1290, 2006.

QI, X. et al. (2021). *Structural features and crystallization properties of glycerides in natural plant extracts*. Food Chemistry, v. 345, p. 128816.

Santos, A. S. P.; Júnior, A. A. O. (2021). *Engenharia e Meio Ambiente: Aspectos Conceituais e Práticos*. Rio de Janeiro: LTC. E-book. ISBN 9788521637523. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637523/>.

SANTOS, M. A. (2017). *Poluição do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: LTC. E-book. ISBN 9788521634140. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/ 9788521634140/>.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/112

Reaproveitamento de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro em Argamassas: Uma Solução Ecoeficiente para a Gestão de Resíduos

Mateus Vieira Marinho
Engenheiro Civil, Sonda Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, mateusvmarinho@hotmail.com

Marcus Vinicius Teixeira Barbosa
Engenheiro Civil, G5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marcusbba5@gmail.com

Thais Fernanda Vasconcelos Moreira
Engenheira Civil, Sonda Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, vasconcelosm.thais@hotmail.com

Douglas Lins Fernandes Filho
Engenheiro Civil Geotécnico, Coordenador de Laboratório, Sonda Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, linsdouglas@outlook.com

RESUMO: A mineração é uma das atividades econômicas mais relevantes no Brasil, porém está associada à geração de grandes volumes de rejeitos. Os recentes desastres envolvendo barragens ressaltaram a necessidade de soluções técnicas para reduzir passivos ambientais, em consonância com a Resolução ANM nº 95/2022, que estabelece prazos e medidas regulatórias para a descaracterização dessas estruturas. Nesse contexto, o reaproveitamento de rejeitos na construção civil surge como estratégia alinhada aos princípios da geotecnia ambiental e da economia circular. Este estudo avalia o potencial de utilização de rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) como material alternativo em argamassas, investigando seus efeitos no desempenho mecânico e suas implicações para a gestão sustentável. Foram analisadas argamassas com substituições graduais de 5%, 10%, 15% e 20% de RBMF em relação à massa total do agregado miúdo (areia natural), com avaliação da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados indicam que teores moderados de incorporação de RBMF melhoram o desempenho mecânico das argamassas, com destaque para substituições entre 10% e 15%, evidenciando a viabilidade técnica do material. Sob a perspectiva ambiental, o reaproveitamento pode contribuir para reduzir a demanda por agregados naturais e mitigar passivos associados à disposição de rejeitos.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de barragem de minério de ferro, argamassas, desempenho mecânico, geotecnia ambiental, economia circular.

ABSTRACT: Mining is one of the most relevant economic activities in Brazil; however, it is associated with the generation of large volumes of tailings. Recent dam-related disasters have highlighted the need for technical solutions to reduce environmental liabilities, in accordance with ANM Resolution No. 95/2022, which establishes deadlines and regulatory measures for the decharacterization of these structures. In this context, the reuse of tailings in construction emerges as a strategy aligned with the principles of environmental geotechnics and the circular economy. This study evaluates the potential use of iron ore tailings (IOT) as an alternative material in mortars, investigating its effects on mechanical performance and its implications for sustainable management. Mortars with gradual replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% of IOT relative to the total mass of fine aggregate (natural sand) were analyzed, with compressive strength evaluated at 7, 14, and 28 days. The results indicate that moderate incorporation levels of IOT improve the mechanical performance of mortars, with emphasis on replacement levels between 10% and 15%, demonstrating the technical feasibility of the material. From an environmental perspective, reuse can contribute to reducing the demand for natural aggregates and mitigating liabilities associated with tailings disposal.

KEYWORDS: Iron ore tailings, mortars, mechanical performance, environmental geotechnics, circular economy.

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora desempenha papel fundamental no desenvolvimento econômico do Brasil, que se destaca entre os principais produtores e exportadores mundiais de minério de ferro. No ano de 2024, a produção nacional atingiu aproximadamente 447 milhões de toneladas, correspondendo a 18% da produção mundial e representando um aumento de 2,4% em relação ao ano anterior (ANM, 2025). Apesar de sua relevância econômica, o beneficiamento do minério de ferro está associado à geração de grandes volumes de rejeitos, cuja disposição ocorre predominantemente em barragens, estruturas que demandam monitoramento contínuo e apresentam riscos ambientais e sociais significativos (Ramos et al., 2024).

Nos últimos anos, os rompimentos de barragens de rejeitos ocorridos em Mariana (MG), em 2015, e Brumadinho (MG), em 2019, intensificaram o debate técnico e científico sobre a necessidade de aprimorar as práticas de gestão desses resíduos e reduzir a dependência de estruturas de armazenamento convencionais (Santamarina et al., 2019). Esses eventos evidenciaram os riscos associados às barragens de rejeitos e impulsionaram mudanças regulatórias e tecnológicas na indústria da mineração. Em resposta, a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução nº 95/2022, consolidou o marco regulatório para a segurança de barragens de mineração no Brasil, estabelecendo prazos para a descaracterização total dessas estruturas (ANM, 2022).

Nesse contexto, a geotecnia ambiental vem se consolidando ao propor soluções capazes de integrar desempenho técnico, segurança e sustentabilidade na gestão de resíduos da mineração. Entre as principais alternativas, destaca-se o reaproveitamento de rejeitos em materiais de construção, estratégia que pode contribuir simultaneamente para a redução de passivos ambientais e para o uso mais eficiente de recursos naturais (Qi e Fourie, 2019; Chao et al., 2024). Pesquisas recentes têm investigado o potencial de utilização de rejeitos como substitutos de agregados naturais em compósitos cimentícios, indicando que sua incorporação pode aprimorar a distribuição granulométrica e o desempenho mecânico, desde que adotadas proporções adequadas de substituição (Amjad et al., 2025; Fajardo et al., 2025; Lara et al., 2025).

Os resultados experimentais utilizados neste estudo foram previamente apresentados na pesquisa conduzida por Santos et al. (2025). No presente trabalho, esses resultados são reinterpretados sob a perspectiva da geotecnia ambiental e da gestão sustentável de resíduos da mineração. Nessa nova abordagem, o reaproveitamento de rejeitos está alinhado com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2026), evidenciando a contribuição desta pesquisa para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na construção civil e na gestão de resíduos da mineração.

2 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo investigar o uso do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF), proveniente do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana (MG), como material alternativo na produção de argamassas, com base na análise de seu desempenho mecânico. A proposta busca reduzir a extração de recursos naturais e oferecer uma solução ecoeficiente para a gestão de rejeitos.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos Materiais

Este trabalho apresenta uma reinterpretação dos resultados experimentais obtidos por Santos et al. (2025), sob uma nova abordagem, com foco na geotecnia ambiental e na sustentabilidade. Os materiais utilizados na formulação das argamassas foram rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF), areia lavada de rio e cimento Portland CP II E 32, fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de São João del-Rei.

Para a caracterização do RBMF, foram realizados ensaios de umidade higroscópica de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2024), massa específica dos sólidos conforme a NBR 17212 (ABNT, 2025a) e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2025d). Também foram

determinados os limites de liquidez e de plasticidade, conforme as NBR 6459 (ABNT, 2025b) e NBR 7180 (ABNT, 2025c), com o objetivo de avaliar o comportamento do rejeito quanto à consistência e plasticidade.

A areia natural, por sua vez, foi caracterizada quanto à granulometria por meio da NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021) e teor de umidade superficial conforme a NBR 9775 (ABNT, 2011). Essas normas especificam os métodos de ensaio para agregados miúdos destinados à produção de argamassas de cimento Portland.

3.2 Composição das Argamassas

As argamassas foram produzidas com base em uma amostra de referência normativa composta por uma parte de cimento (624 g) e três partes de areia (1872 g), em massa, mantendo-se constante a relação água/cimento, conforme estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2025e). A Tabela 1 apresenta o quantitativo de materiais necessário para a moldagem de até seis corpos de prova.

Tabela 1. Quantitativo de materiais proposto pela NBR 7215 (ABNT, 2025e).

Material	Massa (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

A amostra normativa é composta por 1872 g de areia, distribuídos em quatro frações granulométricas: grossa, média grossa, média fina e fina. Nesta pesquisa, o RBMF foi incorporado como fração adicional do agregado miúdo, promovendo a substituição parcial e proporcional em todas as frações de areia.

Foram desenvolvidas formulações com teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% de RBMF em relação à massa total do agregado miúdo. A relação água/cimento foi mantida constante em todas as amostras, permitindo avaliar especificamente a influência da incorporação do rejeito no desempenho das argamassas. A Tabela 2 apresenta em detalhes as formulações adotadas.

Tabela 2. Formulações desenvolvidas por traço (medidas em g)

Traços	Cimento	Água	Areia grossa	Areia média grossa	Areia média fina	Areia fina	RBMF	% RBMF sob Σ agregados
REF	624	300	468	468	468	468	0	0%
R5	624	300	444,6	444,6	444,6	444,6	93,6	5%
R10	624	300	421,2	421,2	421,2	421,2	187,2	10%
R15	624	300	397,8	397,8	397,8	397,8	280,8	15%
R20	624	300	374,4	374,4	374,4	374,4	374,4	20%

3.3 Ensaio de Resistência à Compressão

As amostras foram confeccionadas em corpos de prova cilíndricos (50x100 mm), seguindo as orientações da NBR 7215 (ABNT, 2025e). Para cada formulação, foram produzidos 18 corpos de prova, sendo seis por idade de ruptura. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura em meio úmido até as idades de ruptura. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 14 e 28 dias, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico das argamassas com diferentes teores de RBMF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades Físicas dos Materiais

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados no RBMF e na areia natural.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de caracterização do RBMF e da areia natural.

Ensaio	RBMF	Areia natural
Massa específica dos sólidos	3,241 g/cm³	2,575 g/cm³
Umidade higroscópica	0,88 %	0,13 %
Limite de liquidez	28,7 %	NL
Limite de plasticidade	17,9 %	NP
Índice de plasticidade	10,8 %	NP

Nota-se que o RBMF possui massa específica superior à da areia natural. Esse comportamento é consistente com as observações de Fontes et al. (2016), que atribuem a maior densidade do rejeito à sua elevada concentração de ferro. Além de aumentar a densidade aparente, a incorporação do RBMF pode reduzir os níveis de ar presente na mistura, aumentar a demanda de água e contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito.

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da areia natural, do RBMF e da amostra R20 (composta por 80% de areia e 20% de RBMF).

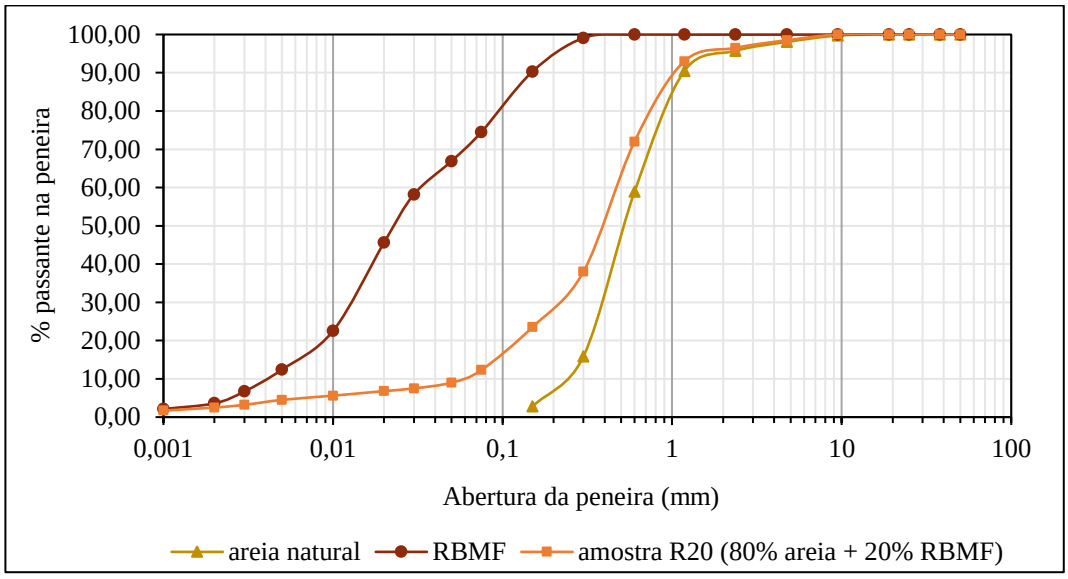


Figura 1. Curvas granulométricas da areia natural, do RBMF e da amostra R20.

A análise granulométrica evidencia diferenças significativas entre a areia natural e o RBMF, permitindo avaliar a distribuição das partículas ao longo de toda a faixa granulométrica e os efeitos da incorporação do rejeito. Para fins comparativos, foi analisada a amostra R20 (80% areia + 20% RBMF), considerada a condição mais representativa por apresentar o maior teor de substituição.

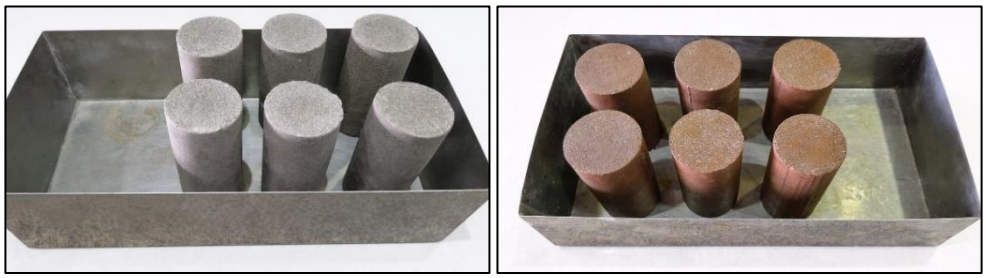
A areia natural apresenta predominância nas frações média fina e média grossa, com ausência de material passante na peneira #200, sendo classificada como uniforme (curva C). O RBMF, por sua vez, apresenta elevada fração fina, com cerca de 75% de material passante na #200, caracterizando material de granulometria contínua (curva A) (Wang et al., 2022; Caputo, 2015).

A amostra R20 apresenta um comportamento intermediário entre os materiais de origem e distribuição granulométrica contínua, com aumento do teor de finos e melhor graduação. Os coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc) corroboram essas observações. A areia natural apresentou Cu = 2,67 e Cc = 1,10, caracterizando material uniforme. O RBMF apresentou Cu = 8,21 e Cc = 1,24, indicando ampla distribuição de partículas. A amostra R20 apresentou Cu = 8,58 e Cc = 1,66, evidenciando melhor graduação, com distribuição contínua ao longo da faixa granulométrica.

Essa melhoria granulométrica tende a favorecer o empacotamento das partículas, com redução de vazios pelo efeito filler, contribuindo para o aumento da compacidade e da resistência mecânica (Chang e Chao, 2024; El-Husseiny, 2019).

4.2 Potencial de Aplicação

A incorporação de RBMF na formulação das argamassas conferiu uma coloração avermelhada nos corpos de prova, sendo mais pronunciada nas amostras com maiores teores de substituição, em função da composição química do material. O rejeito proveniente da Barragem do Fundão é predominantemente constituído por óxidos de ferro, responsáveis pela pigmentação característica (Coura, 2018). A Figura 2 compara o aspecto visual entre a amostra de referência e a amostra R20.



(a) (b)

Figura 2. Aspecto visual: (a) amostra de referência; (b) amostra R20.

Essa coloração natural amplia o potencial de aplicação das argamassas em diferentes soluções construtivas, como revestimentos, pavimentações e elementos paisagísticos, dispensando o uso de pigmentos artificiais. Estudos recentes revelam que materiais cimentícios com incorporação de rejeitos ricos em óxidos de ferro podem atuar simultaneamente como material estrutural e elemento estético (Lara et al., 2025).

Sob a perspectiva da geotecnia ambiental, a produção de argamassas pigmentadas por rejeito representa uma solução alinhada ao desenvolvimento de infraestruturas mais sustentáveis e resilientes, além de promover o avanço da economia circular no setor mineral.

4.3 Desempenho Mecânico

A Figura 3 apresenta os resultados de resistência à compressão nas três idades de ruptura.

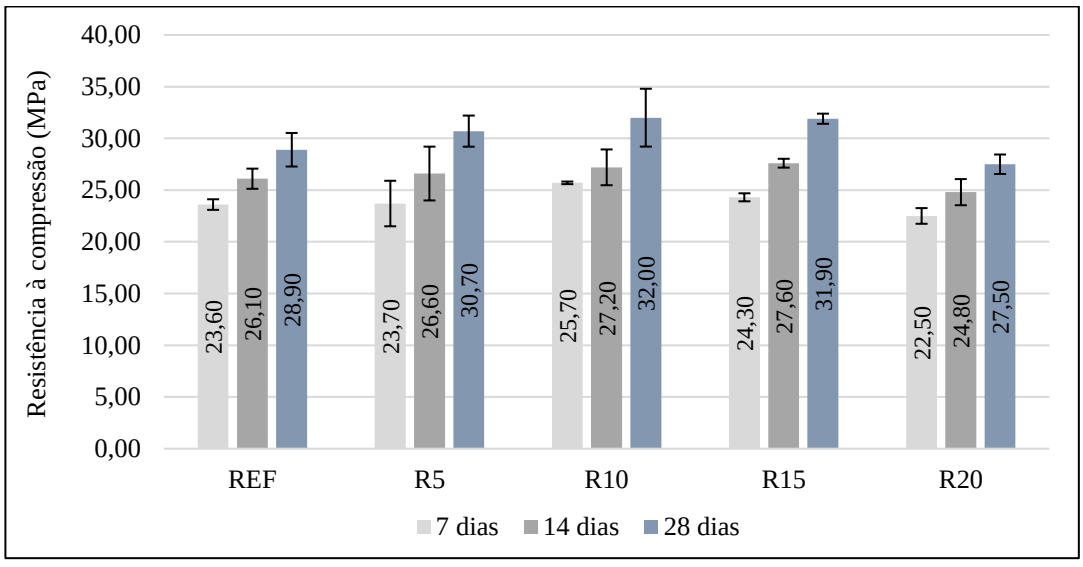


Figura 3. Resistência à compressão das amostras.

A Tabela 4 resume os valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios, bem como o ganho de resistência ao longo das idades analisadas.

Tabela 4. Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Amostra	Resistência média à compressão (MPa)			Ganho de resistência mecânica (%)		
	7 dias	14 dias	28 dias	7 - 14	14 - 28	7 - 28
REF	23,6	26,1	28,9	10,59	10,73	22,46
R5	23,7	26,6	30,7	12,24	15,41	29,54
R10	25,7	27,2	32,0	5,84	17,65	24,51
R15	24,3	27,6	31,9	13,58	15,58	31,28
R20	22,5	24,8	27,5	10,22	10,89	22,22

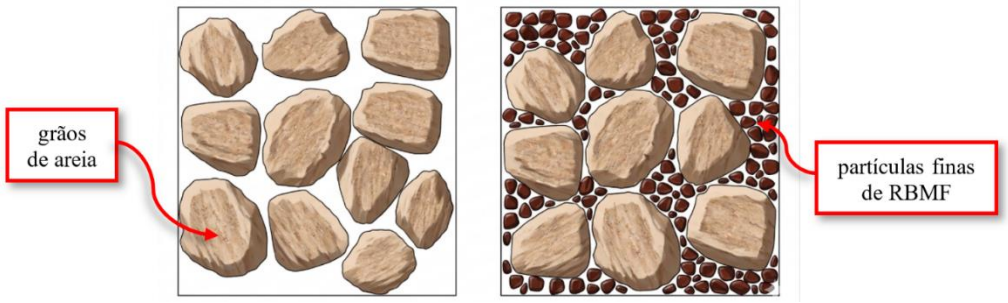
Os resultados indicam que a incorporação de RBMF influenciou diretamente o desempenho mecânico das argamassas, com variações em função do teor de substituição. De modo geral, as amostras com menores teores (R5, R10 e R15) apresentaram desempenho semelhante ou superior à amostra de referência, especialmente nas idades mais avançadas.

Aos 7 dias, os valores de resistência variaram entre 22,5 MPa (R20) e 25,7 MPa (R10), com destaque para a amostra R10, que obteve o maior valor entre as amostras. Observa-se uma tendência de crescimento da resistência para todas as amostras aos 14 dias. Nessa idade, as amostras com RBMF mantêm desempenho equivalente ou superior à referência, demonstrando comportamento consistente ao longo do processo de cura.

Ao final do período de cura (28 dias), as amostras R10 e R15 alcançaram os maiores valores de resistência, de 32,0 MPa e 31,9 MPa, respectivamente, superando a amostra de referência. Por outro lado, a amostra R20 apresentou redução na resistência (27,5 MPa), indicando que teores elevados de substituição podem comprometer o desempenho mecânico.

Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito de preenchimento (filler) promovido pelas partículas finas do RBMF, que contribuem para a melhoria do empacotamento granular e redução dos vazios na matriz cimentícia. Como consequência, há aumento da compacidade e da resistência mecânica, conforme relatado por Amjad et al. (2025).

A Figura 4 ilustra esse efeito, no qual é possível observar que a incorporação de partículas finas do RBMF promove o preenchimento dos vazios entre os grãos maiores da areia natural, resultando em uma estrutura mais densa.



(a) (b)

Figura 4. Representação do efeito filler: (a) estrutura com partículas grossas e presença de vazios; (b) preenchimento dos vazios por partículas finas.

O ganho de resistência ao longo do tempo foi progressivo em todas as amostras, com destaque para a R15, que registrou o maior ganho acumulado entre 7 e 28 dias (31,28%). Essa amostra apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e reaproveitamento de resíduo, evidenciando seu potencial ambiental.

5 CONCLUSÃO

Este estudo investigou o uso do RBMF proveniente do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana (MG), como material alternativo na produção de argamassas de cimento Portland. Os resultados demonstram a viabilidade técnica do RBMF como substituto parcial da areia, especialmente em teores moderados de incorporação. As amostras com substituições entre 5% e 15% obtiveram desempenho mecânico superior à amostra de referência, evidenciando o potencial do material em aplicações construtivas.

A amostra R15, em particular, destacou-se por apresentar o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e reaproveitamento de resíduo, configurando-se como a condição mais eficiente entre as amostras analisadas.

Sob a perspectiva da geotecnia ambiental, os resultados indicam que o reaproveitamento de RBMF em argamassas representa uma alternativa ambientalmente promissora, contribuindo para a redução da demanda por agregados naturais e para a mitigação de passivos associados à disposição de rejeitos.

Além de avaliar o potencial técnico do RBMF como insumo para a construção civil, o estudo reforça a importância da reutilização sustentável de resíduos de mineração, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e às práticas ESG (Environmental, Social and Governance), ao promover o avanço da economia circular no setor mineral.

A realização de ensaios de lixiviação não foi contemplada neste estudo, uma vez que o foco esteve direcionado à avaliação do desempenho mecânico das argamassas. No entanto, a composição química do RBMF, predominantemente constituída por óxidos de ferro e sílica, indica baixa solubilidade e reduzido potencial de mobilização de contaminantes. Além disso, a incorporação do rejeito em matriz cimentícia promove o encapsulamento das partículas finas, reduzindo a exposição ao meio e, consequentemente, a possibilidade de lixiviação de eventuais constituintes. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de ensaios de solubilização, a fim de ampliar a confiabilidade de aplicação do RBMF em larga escala.

AGRADECIMENTOS

Expressamos nossa gratidão, primeiramente, a Deus, pela força, sabedoria e perseverança ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos à equipe técnica do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de São João del-Rei por fornecer os subsídios e materiais necessários para a elaboração deste trabalho. Estendemos nossos agradecimentos à Sonda Engenharia Geotécnica pelo apoio prestado na revisão técnica dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Mineração (ANM). (2022). *Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022*. Disponível em:<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf/view>. Acesso em: 09 de jan. de 2026.

Agência Nacional de Mineração (ANM). (2025). *Sumário Mineral 2025: Ano-Base 2024.* Superintendência de Regulação Econômica e Governança Regulatória. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral>. Acesso em: 09 de jan. de 2026.

Amjad, H.; Abd-Elaal, E. S.; Ma, X.; Benn, T.; & Fisher, M. (2025). A critical review of iron ore tailings as cement and aggregate substitutes for robust infrastructure: Mechanical, durability, eco-economic, and social impacts. *Journal of Cleaner Production*, 492, 144853. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144853

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2011). NBR 9775: *Agregado miúdo - Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2021). NBR 16916: *Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2022). NBR 17054: *Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2024). NBR 6457: *Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.* Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025a). NBR 17212: *Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm.* Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025b). NBR 6459: *Solo - Determinação do limite de liquidez.* Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025c). NBR 7180: *Solo - Determinação do limite de plasticidade.* Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025d). NBR 7181: *Solo - Análise granulométrica.* Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2025e). NBR 7215: *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, RJ.

Caputo, H. P.; & Caputo, A. N. (2015). *Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos* (7ª ed.). Rio de Janeiro: LTC, 2015.

Chang, C. S.; & Chao, J. (2024). A review of particle packing models and their applications to characterize properties of sand-silt mixtures. *Geotechnics*, 4, 1124–1139. https://doi.org/10.3390/geotechnics4040057

Chao, X.; Han, C.; Shao, C.; Wang, C.; Wen, P.; & Wang, C. (2024). Recent advances in properties and application progress of cement-based materials with iron tailing. *Sustainability*, 16, 10631. https://doi.org/10.3390/su162310631

Coura, I. R. (2018). *Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química, Departamento de Química, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2365408&key=f48e35d9cd70051c8176201bc7248747>. Acesso em: 05 de jan. de 2026.

El-Husseiny, A. (2019). Improved packing model for functionally graded sand-fines mixtures - Incorporation of fines cohesive packing behavior. *Applied Sciences*, 10, 562. http://dx.doi.org/10.3390/app10020562

Fajardo, A. A.; Souza, S. R.; Prado, D. F. do; Macedo, J. G. de; Lanna, V. F.; Aguilar, M. T. P.; Garcia, D. C. S.; Barbosa, M. T. G.; Almeida, F. do C. R.; & Santos, W. J. dos. (2025). Evaluation of high-strength cementitious composite with iron ore tailing and gneiss waste as mineral admixture. *Ambiente Construído*, v. 25, e145457, ISSN 1678-8621. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100915

Fontes, W. C.; Mendes, J. C.; Silva, S. N.; & Peixoto, R. A. F. (2016). Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. *Construction and Building Materials*, 112, 988-995. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027

Lara, L. F. S.; Resende, L.; & Bezerra, A. C. S. (2025). Inovação sustentável: Rejeito de minério de ferro para produção de mobiliário urbano. In *IX Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção - ENARC*, Belo Horizonte. v. 9, p. 1-7. https://doi.org/10.46421/enarc.v9i1.7396

Organização das Nações Unidas (ONU). (2026). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 09 de jan. de 2026.

Qi, C.; & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025

Ramos, L. T. S.; Azevedo, R. C.; Bezerra, A. C. S.; Amaral, L. M.; & Oliveira, R. D. (2024). Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector. *Cleaner Waste Systems*, 7, 100137. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100137

Santamarina, J. C.; Torres-Cruz, L. A.; & Bachus, R. C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364, 526-528. https://doi.org/10.1126/science.aax1927

Santos, A. R.; Marinho, M. V.; Marques, V. R.; Mattos, E. L. S.; & Faria, A. C. (2025). Argamassas de cimento portland utilizando rejeito de barragem de minério de ferro como substituto parcial das frações de areia. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 19, p. 1-17, e011969. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-077

Wang, Y.; He, Y.; Zhan, J.; & Li, Z. (2022). Identification of soil particle size distribution in different sedimentary environments at river basin scale by fractal dimension. *Scientific Reports*, 12, 10960. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15141-6

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/113

Reaproveitamento do Resíduo da Lapidação do Granilite na Produção de Tijolos Ecológicos de Solo-Cimento

Arnon Berg Michel de Lima
Mestrando, UFAL, Delmiro Gouveia, Brasil, arnon.lima@campusdosertao.ufal.br

Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos Teixeira
Doutorando, UFV, Viçosa, Brasil, francisco.teixeira@proinfra.ufal.br

Alexandre Nascimento de Lima
Professor, UFAL, Delmiro Gouveia, Brasil, alexandre.lima@ctec.ufal.br

Eduardo Lima de Miranda
Mestrando, UFAL, Delmiro Gouveia, Brasil, eduardo.miranda@campusdosertao.ufal.br

José Tassis Feitosa Santos
Mestrando, UFAL, Delmiro Gouveia, Brasil, jose.feitosa@ctec.ufal.br

RESUMO: A construção civil é uma das principais geradoras de resíduos sólidos no Brasil, sendo o descarte inadequado de seus subprodutos um desafio ambiental crescente. Entre esses resíduos, destaca-se o proveniente da lapidação de pisos graniliticos (RLG), um pó fino e inerte. Este estudo avaliou a viabilidade técnica da incorporação do RLG na produção de tijolos ecológicos de solo-cimento como alternativa sustentável. Foram moldados quatro traços, com proporção solo:cimento de 9:1 e teores de RLG de 0%, 5%, 10% e 15%, em massa relativa ao cimento. As amostras foram curadas por sete dias e submetidas a ensaios de compressão simples, absorção de água, índice de vazios e análise dimensional, conforme normas da ABNT. O RLG atuou como material de preenchimento, promovendo redução do índice de vazios (31,32% a 30,89%) e da absorção de água (18,50% a 18,28%), dentro do limite de 20% da NBR 8491. Observou-se queda progressiva na resistência à compressão (1,56 MPa a 1,31 MPa), abaixo do mínimo exigido para uso estrutural. Conclui-se que o uso de até 10% de RLG é tecnicamente viável para aplicações não estruturais, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos finos e para a sustentabilidade na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolo Ecológico, Resíduo da Construção civil, Geotecnia Ambiental, Sustentabilidade, Solo-Cimento.

ABSTRACT: The construction industry is one of the main generators of solid waste in Brazil, and the improper disposal of its by-products poses an increasing environmental challenge. Among these wastes, granilite polishing waste (RLG), a fine and inert powder, stands out. This study evaluated the technical feasibility of incorporating RLG into the production of soil-cement eco-bricks as a sustainable alternative. Four mixtures were prepared with a fixed soil-to-cement ratio of 9:1 and RLG contents of 0%, 5%, 10%, and 15% by cement mass. Samples were cured for seven days and subjected to unconfined compressive strength, water absorption, void ratio, and dimensional analysis, following ABNT standards. RLG acted as a filler, promoting a reduction in void ratio (from 31.32% to 30.89%) and water absorption (from 18.50% to 18.28%), both within the 20% limit set by NBR 8491. However, a progressive decrease in compressive strength was observed (from 1.56 MPa to 1.31 MPa), below the minimum required for structural use. It is concluded that incorporating up to 10% RLG is technically feasible for non-structural applications, contributing to the reuse of fine waste and promoting sustainability in the construction sector.

KEYWORDS: Eco Brick, Construction Waste, Environmental Geotechnics, Sustainability, Soil-Cement.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais impactantes ambientalmente, devido ao elevado consumo de recursos naturais e à geração significativa de resíduos. A produção de cimento responde por cerca de 8% das emissões globais de CO_2, em decorrência do processo de calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis (Hossain *et al.*, 2021). Além disso, o resíduo da construção e demolição (RCD) tem aumentado exponencialmente, agravando problemas como saturação de aterros, contaminação de solo e desperdício de recursos minerais (Rosa, Silva e Lafayette, 2023; Mello *et al.,* 2024).

No contexto brasileiro, estima-se que os RCDs representam mais da metade dos resíduos sólidos urbanos, sendo provenientes principalmente de obras residenciais, reformas e ampliações (Almeida *et al.*, 2025; Muniz e Oliveira, 2022). Nesse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de alternativas sustentáveis, que promovam a valorização de resíduos e a redução do uso de recursos não renováveis.

Entre os resíduos pouco estudados está o resíduo da lapidação do granilite (RLG), um pó fino gerado durante o polimento de pisos granilíticos, cuja composição mineral é semelhante à de resíduos de rochas ornamentais, como mármore e granito (Rosa, Silva e Lafayette, 2023; Silva e Nienov, 2022). Estudos apontam que materiais desse tipo, quando incorporados a matrizes cimentícias, podem atuar como filler mineral ou material pozolânico secundário, promovendo maior compacidade, menor absorção de água e, em alguns casos, aumento de resistência mecânica (Silva e Nienov, 2022; Yin *et al.*, 2025).

Paralelamente, os tijolos ecológicos de solo-cimento surgem como uma tecnologia viável e ambientalmente responsável, pois dispensam o processo de queima típico dos tijolos cerâmicos, reduzindo significativamente o consumo energético e as emissões de gases poluentes (Sousa e Tavares, 2023; Wang e Abuel-Naga, 2025). Além disso, esses tijolos permitem o uso de solos locais e a incorporação de resíduos, o que os torna uma alternativa atrativa para habitações de interesse social e construções de baixo impacto (Metzker *et al.*, 2022).

Pesquisas anteriores demonstraram que a substituição parcial de agregados ou do próprio cimento por resíduos finos pode resultar em tijolos com resistência à compressão superior a 2,0 MPa e absorção de água inferior a 20%, atendendo aos requisitos das normas brasileiras NBR 8491 (ABNT, 2012), NBR 8492 (ABNT, 2013) e NBR 10833 (ABNT, 2012). Contudo, o desempenho depende fortemente da dosagem, granulometria e reatividade do resíduo incorporado (Aguiar *et al.*, 2024; Muniz e Oliveira, 2022).

Neste contexto, o presente trabalho investiga a viabilidade técnica da utilização do RLG como aditivo mineral em tijolos ecológicos de solo-cimento. Foram analisadas diferentes proporções do resíduo, com avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos moldados, em conformidade com normas técnicas da ABNT. A proposta se alinha aos princípios da economia circular, promovendo a valorização de resíduos sólidos e contribuindo para a sustentabilidade na construção civil brasileira.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

Neste estudo, foram empregados três materiais principais para a produção dos tijolos ecológicos:

- Solo: proveniente de jazida no município de Água Branca-AL (Figura 1), classificado como areno-argiloso. Após a coleta, o solo foi seco ao ar livre, destorroado e peneirado em malha de 4,75 mm.



Figura 1. Local da coleta do solo, Autores 2026.

- Cimento Portland: do tipo CP II-F-32, conforme especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018), adquirido em estabelecimento comercial da região (Figura 2).



Figura 2. Cimento utilizado, Autores 2026.

- RLG: coletado em obra urbana, com aspecto de pó seco e coloração clara (Figura 3). Apresentou massa específica de 2,46 g/cm³ e índice de finura de 1,6%, características que o qualificam como um resíduo fino inerte, com potencial para atuar como material de enchimento (filler) em composições cimentícias.

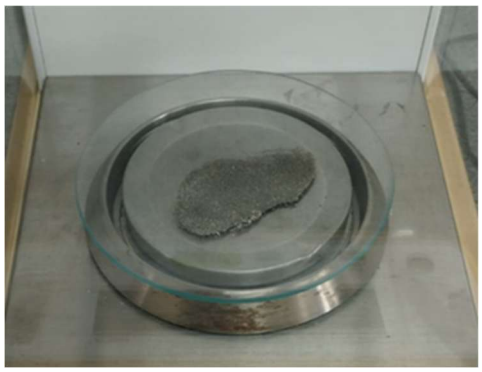


Figura 3. RLG utilizado, Autores 2026.

2.2 Traço e Misturas

Foram elaborados quatro traços com proporções fixas de solo:cimento de 9:1, variando o teor de RLG em relação à massa do cimento: 0% (controle), 5%, 10% e 15%.

A água foi adicionada até obtenção da umidade ótima para prensagem, conforme o método empírico do "teste da bolinha". A homogeneização foi realizada manualmente, garantindo distribuição uniforme dos materiais.

2.3 Moldagem e Cura

Os tijolos foram moldados em prensa manual, com dimensões padrões de 240 mm (comprimento) × 120 mm (largura) × 70 mm (altura), conforme NBR 10833 (ABNT, 2012). A cura foi realizada por aspersão de água duas vezes ao dia durante sete dias, em ambiente coberto e ventilado.

2.4 Ensaios Realizados

Os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios:

- Análise dimensional: conforme NBR 8491 (ABNT, 2012);

- Absorção de água: conforme NBR 9778 (ABNT, 2005);
- Índice de vazios: calculado a partir da massa seca, volume aparente e massa específica, NBR 9778 (ABNT, 2005);
- Resistência à compressão simples: conforme NBR 8492 (ABNT, 2012).

Os ensaios foram realizados nos laboratórios do Campus do Sertão e no Laboratório de Engenharia de Materiais (LEMA) do Centro de Tecnologia (CTEC) no Campus AC Simões, ambos da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tijolos ecológicos produzidos com diferentes teores de RLG (0%, 5%, 10% e 15%) foram avaliados quanto às propriedades físicas e mecânicas. Os parâmetros analisados incluíram: dimensões, absorção de água, índice de vazios e resistência à compressão simples, conforme as normas da ABNT.

3.1 Análise Dimensional

Todos os traços atenderam aos requisitos dimensionais estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), apresentando variações inferiores a ±1 mm nas dimensões de comprimento, largura e altura. A presença do RLG não comprometeu a estabilidade geométrica dos tijolos, indicando compatibilidade dimensional entre os diferentes teores de resíduo e o processo de moldagem.

A Figura 4 apresenta o processo de verificação dimensional dos tijolos, evidenciando a uniformidade obtida nos corpos de prova. Esses resultados demonstram a viabilidade técnica do uso do RLG sem prejuízo à padronização dos elementos, fator essencial para a intercambialidade e o empilhamento adequado em obra.



Figura 4. Análise dimensional dos tijolos ecológicos, Autores 2026.

3.2 Absorção de Água

A absorção de água apresentou leve declínio com o aumento do teor de RLG, variando de 18,50% a 18,28% (Tabela 1). Mesmo com a incorporação do resíduo, todos os traços mantiveram-se abaixo do limite de 20% estabelecido pela NBR 8491 (ABNT, 2012), evidenciando que o RLG não comprometeu o desempenho físico dos tijolos.

Tabela 1. Absorção de água com diferentes teores de RLG, Autores 2026.

Teor de RLG	Absorção média (%)
0%	18,50
5%	18,41
10%	18,32
15%	18,28

Esse comportamento é atribuído ao efeito de empacotamento das partículas finas do RLG, que reduzem a porosidade do sistema. Aguiar *et al.* (2024) relataram tendência semelhante ao utilizar resíduos cerâmicos

em solo-cimento. Yin *et al.* (2025) também destacam que a granulometria fina de materiais inertes favorece a redução da permeabilidade e da absorção de água em matrizes cimentícias.

3.3 Índice de Vazios

O índice de vazios seguiu comportamento similar à absorção, com redução gradual conforme o teor de RLG aumentava, variando de 31,32% a 30,89% (Tabela 2).

Tabela 2. Índice de vazios dos tijolos, Autores 2026.

Teor de RLG	Índice de vazios (%)
0%	31,32
5%	31,15
10%	30,94
15%	30,89

Esse resultado reforça o papel do RLG como material de preenchimento (filler), conforme discutido por Silva e Nienov (2022), Rosa, Silva e Lafayette (2023), indicando melhor empacotamento das partículas e redução do volume de vazios.

3.4 Resistência à Compressão Simples

Os valores de resistência à compressão apresentaram redução progressiva com o aumento do teor de RLG, indo de 1,56 MPa a 1,31 MPa, conforme apresentado na Tabela 3. Nenhum dos traços avaliados atingiu o valor mínimo exigido para uso estrutural (≥ 2,0 MPa), conforme critérios da NBR 8491 (ABNT, 2012). A Figura 5 ilustra o desempenho mecânico de um dos corpos de prova testados.

Tabela 3. Resistência à compressão simples, Autores 2026.

Teor de RLG	Resistência média (MPa)
0%	1,56
5%	1,42
10%	1,35
15%	1,31

Apesar disso, os traços com até 10% de RLG mantiveram resistências superiores a 1,30 MPa, o que pode ser aceitável para aplicações não estruturais, como alvenarias de vedação. Comportamento semelhante foi observado por Metzker *et al.* (2022) e Muniz e Oliveira (2022), que destacam o potencial de resíduos inertes em sistemas de solo-cimento com função de fechamento.

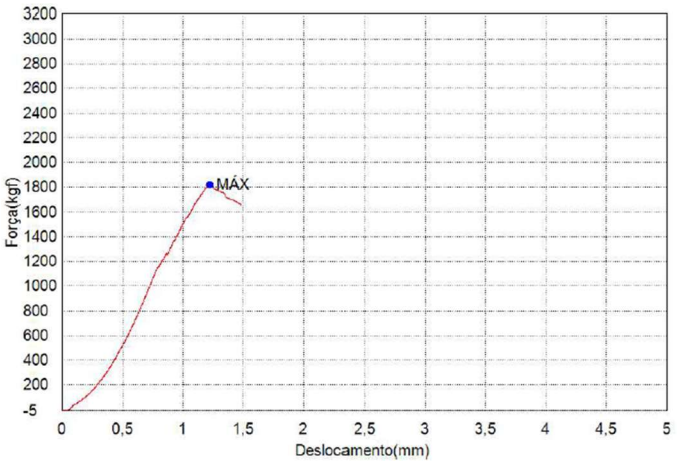


Figura 5. Resistência à compressão simples do tijolo, Autores 2026.

Quintana *et al.* (2024) também relataram perdas mecânicas em teores superiores a 10% de substituição com resíduos minerais. Rosa, Silva e Lafayette (2023) obtiveram melhores desempenhos ao utilizar resíduos de mármore e granito, porém com tempo de cura de 28 dias, o que ressalta a influência do período de hidratação no desenvolvimento da resistência. No presente estudo, o tempo de cura de 7 dias pode ter limitado esse ganho, aspecto a ser aprofundado em futuras investigações.

3.5 Análise Técnica Integrada

A incorporação do RLG promoveu reduções discretas na absorção de água e no índice de vazios dos tijolos. A absorção variou de 18,50% para 18,28%, enquanto o índice de vazios reduziu de 31,32% para 30,89%, correspondendo a variações inferiores a 2%. Esses resultados indicam que o resíduo exerceu efeito de preenchimento (filler), contribuindo para um melhor empacotamento das partículas. Entretanto, do ponto de vista tecnológico, tais reduções podem ser consideradas pouco expressivas, uma vez que não resultaram em alterações significativas no desempenho físico do material.

Apesar disso, os resultados confirmam o potencial do RLG como material de preenchimento em matrizes de solo-cimento, comportamento semelhante ao observado por Silva e Nienov (2022) e Rosa, Silva e Lafayette (2023), que também verificaram redução da porosidade e melhoria da compacidade em sistemas contendo resíduos minerais finos. A literatura aponta ainda que a utilização de materiais pozolânicos ou estabilizantes pode potencializar esses efeitos e contribuir para o desenvolvimento da resistência mecânica (Yin et al., 2025).

O teor de cimento adotado (10%) encontra-se dentro da faixa recomendada para tijolos ecológicos de solo-cimento (Leonel *et al.*, 2017; Sousa e Tavares, 2023). Estudos demonstram que ajustes na relação cimento/resíduo, bem como a utilização de aditivos reativos, podem melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos blocos (Metzker *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2025).

Embora o RLG apresente granulometria fina e comportamento semelhante ao relatado para resíduos minerais ricos em sílica na literatura, não foram observados indícios de contribuição pozolânica significativa nas condições estudadas. Dessa forma, seu principal mecanismo de atuação está associado ao preenchimento dos vazios da matriz, diferentemente de materiais como sílica ativa ou cinza volante, que podem participar das reações de hidratação e contribuir para o ganho de resistência (Yin *et al*., 2025).

Em contrapartida, a resistência à compressão apresentou redução de aproximadamente 16% entre o traço de referência e o traço contendo 15% de RLG. Resultado semelhante foi relatado por Quintana *et al.* (2024), que observaram perdas mecânicas associadas ao aumento do teor de resíduos minerais em composições de solo-cimento. Assim, os ganhos físicos observados não foram suficientes para compensar a redução do desempenho mecânico.

Dessa forma, a incorporação de até 10% de RLG demonstra viabilidade técnica para aplicações não estruturais, especialmente em elementos de vedação e construções de baixo impacto. Essa viabilidade está associada principalmente aos benefícios ambientais proporcionados pelo reaproveitamento de um resíduo de difícil destinação, contribuindo para a redução do descarte inadequado, para a economia circular e para a sustentabilidade da construção civil, conforme discutido por Almeida *et al.* (2025); Morselli, Quadro e Andreazza (2025) e Wang e Abuel-Naga (2025).

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a influência da adição do resíduo da lapidação do granilite (RLG) em tijolos ecológicos de solo-cimento, considerando propriedades físicas e mecânicas.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- A incorporação do RLG promoveu reduções discretas na absorção de água (≈1,2%) e no índice de vazios (≈1,4%), indicando efeito de preenchimento das partículas finas, porém sem alterações substanciais no comportamento físico dos tijolos.
- Todos os traços atenderam ao limite normativo de absorção de água (< 20%), mesmo com 15% de RLG;
- A resistência à compressão foi inversamente proporcional ao teor de RLG, com valores entre 1,56 MPa (0%) e 1,31 MPa (15%), inferiores ao mínimo exigido para fins estruturais (2,0 MPa);

- Embora os resultados mecânicos não tenham atendido aos critérios normativos estabelecidos para tijolos de solo-cimento, a incorporação de até 10% de RLG promoveu redução de aproximadamente 13% na resistência à compressão em relação ao traço de referência, sem alterações significativas nos parâmetros físicos avaliados. Dessa forma, os resultados indicam potencial de aplicação do resíduo em sistemas não estruturais, desde que estudos complementares sejam realizados para otimização da dosagem e aumento da resistência mecânica;
- O uso do RLG representa uma alternativa ambientalmente vantajosa, promovendo a valorização de resíduos finos da construção civil e o alinhamento com os princípios da economia circular e da sustentabilidade.

Os resultados obtidos devem ser analisados considerando algumas limitações experimentais. O período de cura adotado foi de apenas sete dias, inferior aos 28 dias normalmente utilizados para avaliação definitiva de materiais cimentícios. Além disso, não foram realizados ensaios estatísticos inferenciais para verificar a significância das diferenças observadas entre os traços. Dessa forma, recomenda-se cautela na extrapolação dos resultados e a realização de estudos complementares envolvendo maiores tempos de cura, maior número de amostras e análises estatísticas robustas.

Por fim, recomendamos como temas para trabalhos futuros:

- Avaliação da durabilidade dos tijolos sob ciclos de molhagem/secagem;
- Investigar tempos de cura superiores (28 dias);
- Testar combinações do RLG com aditivos pozolânicos ou estabilizantes químicos;
- Análise de viabilidade econômica e ambiental por meio de Análise de Ciclo de Vida (ACV);
- Estudos em escala piloto para produção em maior volume.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Engenharia de Materiais (LEMA/CTEC/UFAL) pela parceria na realização dos ensaios de compressão e aos laboratórios do Campus do Sertão da UFAL pela infraestrutura para caracterização dos materiais e preparação das amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Amanda de Oliveira; CERQUEIRA, Niander Aguiar; ALEXANDRE, Jonas; ALMEIDA, Mayara Silva de (2024). Inovação sustentável na construção: tijolos de solo-cimento melhorados com resíduo cerâmico reciclado. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 13, p. 1-24. https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-344

ALMEIDA, Mayara Silva de; CERQUEIRA, Niander Aguiar; MELO, João Pedro de Oliveira; BARRETO, Marcelo Neves; SOUZA, Victor Barbosa de; MADALENA, Jonathan de Andrade Paula (2025). Solo-cimento como alternativa sustentável: o papel da UENF na inovação e redução de impactos ambientais na construção civil. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 22, n. 7, p. 1-23. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n7-307

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 8491: *Tijolo de solo-cimento — Requisitos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 8492: *Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 10833: *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 16697: *Cimento Portland — Requisitos*. Rio de Janeiro.

HOSSAIN, Md. Uzzal; XUAN, Dongxing; NG, S. Thomas; AMOR, Bem (2021). Designing sustainable partition wall blocks using secondary materials: A life cycle assessment approach. *Journal of Building Engineering*, v. 43. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103035

LEONEL, R. F.; FOLGUERAS, M. V.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; PRIM, S. R.; PRATES, G. A.; CARASCHI, J. C. Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. *Cerâmica*, v. 63, n. 367, p. 329–335. https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672131

MELLO, Giane Alves; FERRARINI, Suzana Frighetto; CAETANO, Marcelo Oliveira; PACHECO, Fernanda (2024). Matrizes cimentícias com o uso de resíduos de construção e demolição para redução do impacto ambiental de blocos de pavimentação. *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes*, v. 12, n. 37, p. 143–161. https://doi.org/10.17271/23178604123720245240

METZKER, Stefânia Lima Oliveira; SABINO, Ticyane Pereira Freire; MENDES, Juliana Farinassi; RIBEIRO, André Geraldo Cornélio; MENDES, Rafael Farinassi (2022). Soil-cement bricks development using polymeric waste. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 21034-21048. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16769-z

MORSELLI, Luiza Beatriz Gamboa Araújo; QUADRO, Maurízio Silveira; ANDREAZZA, Robson (2025). Sustainable stabilized compressed earth blocks from construction and demolition waste. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 30, e20240112. https://doi.org/10.1590/S1413-415220240112

MUNIZ, Eduardo Ramos; OLIVEIRA, Lorena Alves de (2022). Propriedades mecânicas de tijolos ecológicos formulados com resíduos de construção civil. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 8, p. 60016–60030. https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-333

QUINTANA, Luíse Lence; FLORES, Wladimir Hernández; SILVA, Sabrina Neves da; GALIO, Alexandre Ferreira (2024). Aproveitamentos de resíduos da construção civil na produção de tijolos solo-cimento. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 9, p. 1–28. https://doi.org/10.55905/oelv22n9-042

ROSA, Joedy Mayara de Souza Santa; SILVA, Rayane Gabriella Pereira da; LAFAYETTE, Kalinny Patricia Vaz (2023). Sustainable Alternative for the Production of Soil Cement Bricks. *Journal of Management and Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 45–58. https://doi.org/10.5539/jms.v13n1p45

SILVA, Eliziane da; NIENOV, Fabiano Alexandre (2022). Estudo de solo-cimento com a incorporação de resíduo proveniente do beneficiamento secundário de rochas ornamentais. *Conhecimento em Construção*, v. 9, p. 135–158. https://doi.org/10.18593/cc.v9.30068

SOUSA, Luís Ribeiro de; TAVARES, Felipe Fernando da Costa (2023). Tijolo de solo-cimento com resíduos sólidos: Uma oportunidade para construção de casas populares em Macapá, AP. *Cerâmica Industrial*, v. 28, n. 1, e022801. https://doi.org/10.4322/cerind.2022.011

WANG, Yuxin (Justin); ABUEL-NAGA, Hossam (2025). Unfired bricks from wastes: A review of stabiliser technologies, performance metrics, and circular economy pathways. *Buildings*, v. 15, p. 1861. https://doi.org/10.3390/buildings15111861

YIN, Xiaosan; RAHMAN, Md Mashiur; SUN, Yuzhou; ZHAO, Yi; WANG, Jian (2025). Sustainable soil–cement composites with rice husk ash and silica fume: A review of performance and environmental benefits. *Materials*, v. 18, 2880. https://doi.org/10.3390/ma18122880

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/114

Reflexões sobre a interpretação de registros de monitoramento de movimentações em aterros sanitários e sua aplicação como indicador de estabilidade estrutural

Gustavo Ferreira Simões
UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, gustavo@desa.ufmg.br

Cícero Antônio Antunes Catapreta
SLU-PBH, Belo Horizonte, MG, Brasil, catapret@slu.pbh.br

Caio César de Sousa Mello
UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, caiocsmello@gmail.com

RESUMO: O monitoramento de movimentações em aterros sanitários fornece informações essenciais para a gestão dessas estruturas. Além da complexidade do comportamento dos RSU, a operação de aterros geralmente ocorre sob restrições orçamentárias para instrumentação, exigindo análise criteriosa sobre a eficiência e a precisão das tecnologias de levantamento utilizadas. Apesar dos avanços nas técnicas de sensoriamento remoto, métodos de aquisição de dados pontuais ainda são amplamente empregados. Entretanto, problemas operacionais simples são frequentemente observados, comprometendo a correta interpretação dos registros. O trabalho propõe reflexões sobre alguns aspectos importantes da análise dessas movimentações. Considerando o caráter vetorial dos deslocamentos, questiona-se o significado de determinar separadamente magnitudes e velocidades de movimentos verticais e horizontais. Também se discute a possibilidade de estabelecer faixas de velocidade que indiquem níveis de segurança tanto durante a operação quanto no longo prazo, bem como formas de incorporar o caráter vetorial dos movimentos em um indicador de estabilidade. Com base em dados reais de monitoramento de diferentes aterros sanitários brasileiros, o estudo discute essas questões em nível operacional. Além disso, são apresentadas alternativas metodológicas para auxiliar e complementar a interpretação dos registros, bem como recomendações voltadas à melhoria da qualidade dos dados, visando à avaliação contínua da estabilidade estrutural dos aterros.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários, monitoramento geotécnico, recalques, estabilidade de taludes

ABSTRACT: The monitoring of settlements in landfills is essential for the decision-making process involved in the management of these structures. In addition to the complexity of MSW behavior, landfill operations are often subject to budgetary constraints for instrumentation, requiring careful analysis of the efficiency and accuracy of the surveying technologies used. Despite the advancements in remote sensing techniques, point data acquisition methods remain widely employed. However, simple operational problems are often observed, which can compromise the correct interpretation of records. The paper discusses important aspects of these movements' analysis. Given the vector nature of the displacements, the validity of determining the magnitudes and rates of vertical and horizontal movements separately is questioned. The potential for establishing velocity ranges that indicate safety levels during operation and over time is also discussed, as well as methods for incorporating the vector nature of movements into a stability indicator. The study utilizes empirical monitoring data from several Brazilian landfills to discuss these issues at the operational level. Furthermore, it outlines methodological alternatives to assist and complement the interpretation of records, as well as recommendations aimed at improving data quality, with a view to the continuous assessment of the structural stability of landfills.

KEYWORDS: Landfills, geotechnical monitoring, settlements, slope stability

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento geotécnico de aterros sanitários é uma atividade de alta complexidade devido à natureza do material constituinte do maciço. Composto majoritariamente por resíduos sólidos urbanos (RSU) de caráter biodegradável, essas estruturas apresentam recalques com ordens de grandeza superiores às de obras geotécnicas convencionais, decorrentes de processos mecânicos e degradação biológica.

O monitoramento de movimentações em aterros sanitários fornece importantes informações que auxiliam a tomada de decisão de operadores e gestores, incluindo aspectos relacionados à vida útil, à manutenção de sistemas de drenagem superficial e camada de cobertura final, ao planejamento do uso pós-fechamento e, principalmente, à segurança estrutural. Paralelamente à complexidade técnica, a gestão de aterros sanitários é condicionada por orçamentos restritos para instrumentação, o que exige uma análise criteriosa sobre a eficiência e a precisão das tecnologias de levantamento adotadas.

É notável a evolução das tecnologias de sensoriamento remoto, como a aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), o radar fixo (InSAR) e o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que trabalham com o conceito de nuvens de pontos e modelos digitais de elevação (MDE).

No entanto, a utilização dos métodos de aquisição de dados pontuais, com utilização de instrumentos de precisão convencionais, como estações totais, ainda pode ser considerada a principal técnica utilizada nos aterros sanitários brasileiros. Embora a precisão desses instrumentos seja adequada, muitas vezes problemas simples, como o mal posicionamento dos bastões e do prisma receptor, ainda são observados no momento da coleta da informação em campo, causando variações erráticas no padrão das movimentações. Há ainda situações onde a ausência de padronização e registro do sistema de referência cartográfico (SRC) e referência posicional (*datum*) ocasiona incompatibilidade na análise entre levantamentos topográficos históricos. Tais intercorrências acabam dificultando, ou mesmo impedindo, uma interpretação adequada dos dados.

Nesse contexto, o trabalho objetiva destacar alguns aspectos para reflexão, relacionados à interpretação das informações obtidas, tais como: existe um padrão de movimentação esperado? Considerando a característica vetorial dos movimentos, qual é o significado de determinar magnitudes e velocidades de movimentos verticais e horizontais de forma dissociada? Considerando o complexo comportamento dos RSU, principalmente sua perda de massa com tempo, é possível estabelecer faixas de velocidades que definam níveis de segurança durante a operação e na situação de longo prazo, após o encerramento? Quais seriam estas faixas de velocidade para cada fase da vida de um aterro sanitário? É possível estabelecer uma forma de incorporar o caráter vetorial dos movimentos em um indicador de estabilidade?

A partir de dados reais de monitoramento de movimentações em diferentes aterros sanitários brasileiros e tendo como foco a utilização dos registros como instrumento de auxílio na contínua avaliação da estabilidade estrutural dessas estruturas, essas questões são discutidas no nível operacional, apresentando alternativas de metodologias para auxílio e complementação na interpretação dos registros históricos de monitoramento, bem como recomendações para a melhoria da qualidade dos registros.

2 MONITORAMENTO DE MOVIMENTAÇÕES

O monitoramento de movimentações em aterros sanitários é uma parte integrante do monitoramento geotécnico de tais estruturas e, em conjunto com o monitoramento de poro-pressões internas de líquidos e gases, tem como objetivos fornecer elementos para a contínua avaliação da estabilidade estrutural, além de possibilitar a avaliação da integridade de elementos de projetos, tais como sistemas de drenagem superficial e camadas de cobertura final.

Historicamente, a literatura técnica prioriza predominantemente avaliações baseadas em recalques verticais, importantes para a calibração de modelos e contínua atualização da vida útil dos aterros sanitários (eg. Giorgini *et al*., 2021; Klink *et al*., 2021). A avaliação das movimentações horizontais (eg. Cepolina *et al*., 2004; Simões *et al*., 2007; Rocha *et al*., 2016; van Elk *et al*., 2018; Bezerra *et al*., 2024), embora menos explorada nas publicações científicas, possui o potencial de, em conjunto com os recalques verticais, possibilitar uma real interpretação dos deslocamentos, que, por serem grandezas vetoriais, não devem ser analisadas de forma dissociada.

A definição de níveis de segurança em empreendimentos geotécnicos, como as instalações de disposição de rejeitos de mineração, é reportada na literatura e em regulamentações (ANM, 2025). No contexto desse tipo de estrutura e também em barragens de terra, onde, em condições normais de estabilidade, os deslocamentos horizontais esperados são diminutos, a utilização de registros do monitoramento de movimentações tem o grande potencial de, a partir da avaliação das magnitudes de forma vetorial e, principalmente, das velocidades observadas, permitir a avaliação do nível de segurança das obras.

No caso dos aterros sanitários, a dinâmica de deformações ganha um maior grau de complexidade, dada a natureza heterogênea dos materiais, somada à biodegradabilidade dos RSU, cuja velocidade de degradação é extremamente variável com o tempo. Esse conjunto de fatores é responsável por movimentos verticais e horizontais naturais de intensidades e velocidades variáveis com o tempo, dificultando o estabelecimento de níveis de segurança que caracterizem situações de instabilidade, principalmente quando consideradas as componentes verticais e horizontais de forma isolada.

Em aterros sanitários de grande porte, com taludes de grande extensão em relação à sua altura (condição de deformação plana), o movimento esperado em uma condição de instabilidade deve ser perpendicular ao talude, conforme a situação hipotética indicada na Figura 1. Nessa situação, o caráter vetorial do movimento pode ser analisado em duas dimensões, materializando o vetor resultante do deslocamento. A posição do vetor resultante, quando situada abaixo da superfície original do talude, indica redução do volume do aterro, processo natural associado ao comportamento geomecânico e à degradabilidade intrínseca do RSU, e sugere uma situação de estabilidade. A análise dissociada das parcelas horizontal e vertical dos deslocamentos não possibilitaria tal constatação.

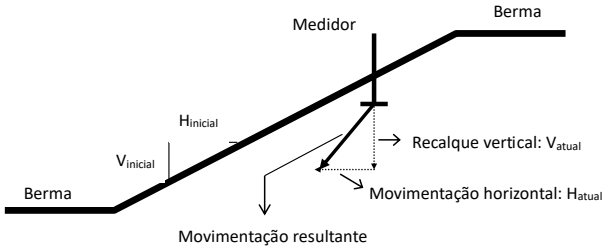


Figura 1. Esquema de movimentação em perfil

3 TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO

3.1 Métodos de Aquisição de Dados Pontuais: Estação Total e GNSS

Os métodos tradicionais de monitoramento baseiam-se na coleta de dados pontuais, onde a análise da estabilidade do maciço depende da interpretação conjunta de uma rede de marcos superficiais. A Estação Total permanece como a ferramenta mais difundida devido à sua capacidade de alcançar precisão milimétrica, importante para a detecção e monitoramento de deslocamentos. Contudo, a eficácia do método é sensível a fontes de erro operacional. O posicionamento do bastão e o nivelamento do prisma pelo operador podem introduzir variações espúrias, resultando em um comportamento "ziguezagueante" nas séries temporais de coordenadas absolutas. Tais flutuações, muitas vezes, não representam movimentos reais do maciço, mas sim ruídos instrumentais e de manuseio. Para mitigar essas inconsistências, é recomendada a fixação de prismas de rosca ou o uso de bipés, reduzindo a excentricidade e o erro de verticalidade.

No que tange ao uso de sistemas globais de navegação por satélite, o emprego de GNSS de precisão via métodos RTK (Real Time Kinematic), embora ofereça agilidade operacional, apresenta limitações críticas quanto à escala de monitoramento de recalques (Siebert e Teizer, 2014). A acurácia típica desses sistemas situa-se na casa centimétrica, o que se mostra insuficiente para o acompanhamento rigoroso de medidores de recalque, onde variações milimétricas são determinantes. Assim, tanto a Estação Total quanto o GNSS geram amostragens discretas que, embora precisas em sua natureza pontual, exigem uma densidade amostral elevada e uma interpretação sistêmica para validar as condições globais de segurança do aterro.

3.2 Tecnologias de Nuvem de Pontos e Malhas Posicionais: VANT, LiDAR e Radar

Em contraste com os métodos pontuais, as tecnologias de sensoriamento remoto, como a aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), o LiDAR (Light Detection and Ranging) e o radar fixo (InSAR), trabalham com o conceito de nuvens de pontos e modelos digitais de elevação (MDE). Estas técnicas representam o maciço como uma superfície contínua, permitindo uma análise holística da morfologia do aterro e de seus deslocamentos relativos.

A aerofotogrametria destaca-se pela rapidez e pela qualidade da geoinformação gerada a custos competitivos. Entretanto, sua precisão é dependente da distribuição de pontos de controle em campo (GCPs). Como a acurácia final tende a ser centimétrica, a técnica é ideal para o cálculo de volumes e verificação de taludes, mas perde capacidade de refinamento quando comparada à leitura direta em medidores de recalque (Mello *et al*. 2022). Já o LiDAR, como sensor ativo, oferece uma densidade de pontos superior e maior precisão na representação do terreno, sendo eficaz para monitorar o deslocamento relativo de grandes massas de forma sequencial, embora possua um custo de mobilização mais elevado (Nex e Remondino, 2014).

O radar fixo terrestre representa o estado da arte no monitoramento de alta frequência, utilizando a interferometria para medir mudanças na fase das ondas eletromagnéticas com precisão submilimétrica. Esta técnica provê um mapeamento contínuo da deformação de toda a face visível do aterro (Crosetto, *et al*. 2016).

4 EXEMPLOS

São apresentados e discutidos a seguir alguns exemplos de registros de movimentações observados em aterros sanitários brasileiros. Em todos os exemplos os registros foram obtidos utilizando estações totais, por diferentes equipes de topografia. Como forma de destacar aspectos importantes da análise, foi utilizada a hipótese de existência de uma direção característica de um eventual movimento indicador de instabilidade, correspondente à direção normal à face do talude, sendo considerado o azimute desta direção como referência. São apresentados gráficos de evolução dos recalques verticais, variação da posição em planta em relação às coordenadas Norte e Leste, variação dos azimutes dos deslocamentos horizontais instantâneos (com indicação de uma faixa de ±20° em torno do azimute esperado do movimento indicativo de uma potencial situação de instabilidade) e, em alguns casos, a posição do vetor de deslocamento resultante em perfil. Com exceção dos exemplos do aterro sanitário experimental (4.1) e aterro encerrado (4.2), destaca-se que o tempo indicado não se refere à idade dos resíduos e sim ao recorte utilizado na análise. Nas figuras da posição do vetor de deslocamento resultante em perfil, é indicada em azul uma inclinação de referência (1V:2H), usualmente utilizada em projetos. Nas figuras da variação da posição em planta é indicada a direção do eventual movimento esperado em uma situação de instabilidade, considerando a geometria do aterro.

4.1 Medidor Instalado em um Aterro Experimental (Série Temporal Extensa)

A Figura 2 apresenta a evolução das deformações verticais ao longo dos primeiros 4.000 dias (cerca de 11 anos) de um medidor instalado em um aterro sanitário experimental e corresponde à idade dos RSU. Observa-se um comportamento típico, resultado dos processos mecânicos e biológicos de degradação dos resíduos. A curva demonstra uma velocidade de recalque mais acentuada nos períodos iniciais, evoluindo para uma tendência de estabilização em estágios avançados, o que valida a qualidade do monitoramento quanto à componente vertical.

Entretanto, a Figura 3, referente a todo o período, revela uma dispersão errática das coordenadas horizontais (Norte e Leste). Dado que a geometria do aterro experimental induz a uma condição de deformação unidimensional (1D), a expectativa teórica seria de deslocamentos horizontais nulos ou desprezíveis. O registro gráfico apresenta um padrão ziguezagueante de natureza não-geotécnica, conforme detalhado no recorte da Figura 4. Este fenômeno é um problema de medição típico de levantamentos convencionais com estação total, onde a excentricidade no posicionamento do prisma e a falta de verticalidade do bastão geram variações nas coordenadas. Além disso, as mudanças bruscas de "nuvens" de pontos observadas na Figura 3 sugerem variações instrumentais ou de *datum*, possivelmente associadas à alternância das equipes de campo e à falta de padronização nos procedimentos de compatibilização de bancos de dados ao longo das décadas de monitoramento.

A Figura 5, que apresenta a distribuição do azimute dos deslocamentos horizontais e as velocidades horizontais instantâneas, corrobora a tese de predominância de erros operacionais sobre movimentos reais do maciço. Em uma situação de instabilidade ou deslocamento real, os vetores de velocidade apresentariam uma direção preferencial definida (azimute preferencial), concentrando-se em um quadrante específico voltado para a face livre do talude, em aterros onde a condição bidimensional ocorre. Contudo, observa-se uma distribuição homogênea dos vetores, com as velocidades instantâneas (na ordem de 0,2 a 1,0 cm/dia) apontando para todas as direções de forma aleatória. Essa ausência de tendência direcional confirma que os deslocamentos registrados são espúrios, resultantes da imprecisão milimétrica de cada leitura pontual. Portanto, a análise integrada demonstra que, embora o medidor registre movimentações horizontais, estas não traduzem a cinemática do aterro, mas sim a incerteza intrínseca do método de levantamento quando não submetido a um rigoroso protocolo de posicionamento e estabilização do prisma.

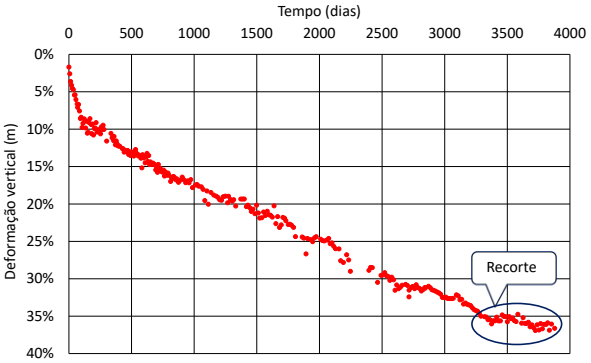


Figura 2. Evolução das deformações verticais

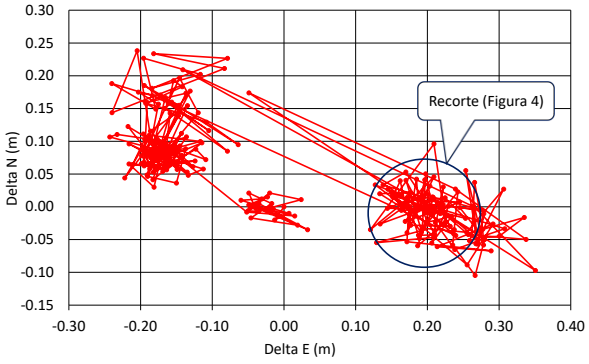


Figura 3. Variação da posição em planta do medidor

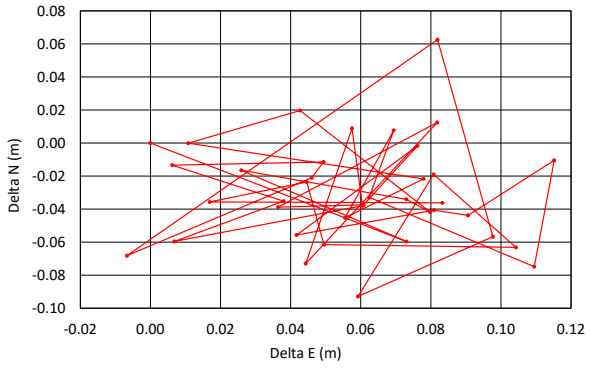


Figura 4. Recorte da posição em planta do medidor

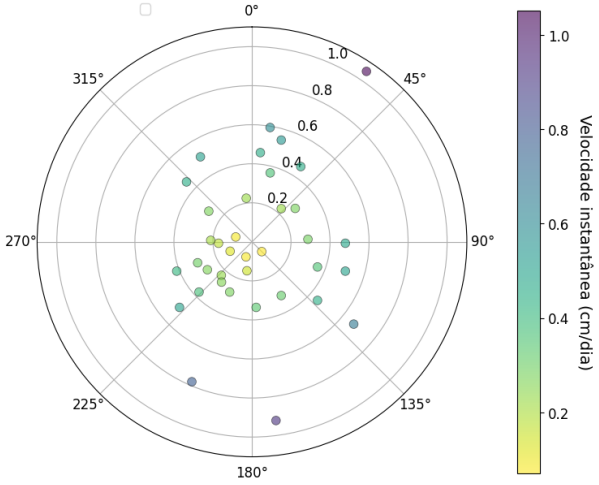


Figura 5. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

4.2 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Extensa)

Diferente do exemplo anterior de comportamento 1D, este caso apresenta um medidor submetido a movimentações mais complexas e direcionadas. A extensão da série histórica, que corresponde aos 4 primeiros anos do monitoramento de uma camada de resíduos de 2 anos de idade, é relevante para amenizar a variabilidade de curto prazo e evidenciar a cinemática real do maciço. Conforme observado na Figura 6, o recalque vertical apresenta uma curva de estabilização clássica, atingindo patamares próximos a 3,5 metros, no período. No plano horizontal (Figura 7), a trajetória do medidor revela uma direção preferencial nítida (sentido Noroeste), com um deslocamento acumulado superior a 3,0 metros.

A magnitude e a persistência deste movimento ao longo de quatro anos confirmam o vetor resultante apontando consistentemente para o azimute de 300°, que coincide com a perpendicular à face livre do talude. Apesar da clareza da tendência global, a análise detalhada da trajetória e das velocidades instantâneas revela a

presença de ruído operacional remanescente. Na Figura 7, nota-se que a linha de movimentação não é perfeitamente retilínea, apresentando pequenos desvios laterais ao longo do eixo principal. A Figura 8 demonstra que, embora grande parte das velocidades instantâneas se concentre na faixa de 300°±20° (destacada em verde), há um número significativo de registros apontando para direções divergentes, incluindo quadrantes opostos ao movimento real. A Figura 9 apresenta o vetor resultante das movimentações em perfil, sem a exclusão de nenhum registro, indicando que, no ponto considerado, a movimentação não sugere problemas de instabilidade, pois o vetor resultante tem inclinação superior à original do talude (1V:2H). No entanto, ressalta-se que, com a inclusão de todos os registros, inclusive movimentos horizontais em outras direções que não a esperada, essa avaliação deve ser vista criteriosamente.

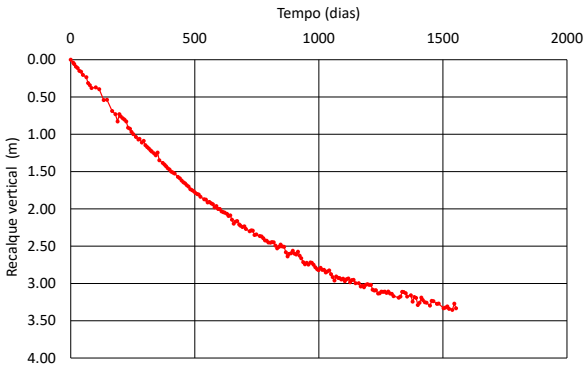


Figura 6. Evolução dos recalques verticais

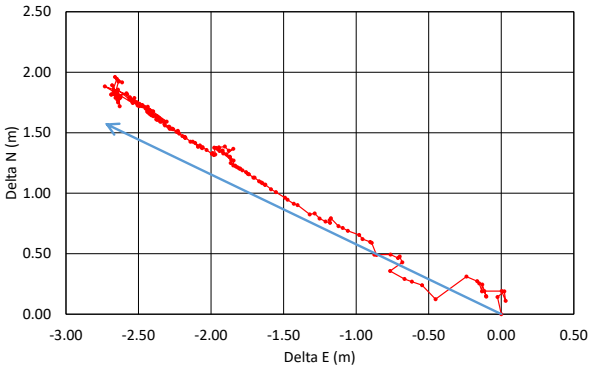


Figura 7. Variação da posição em planta do medidor

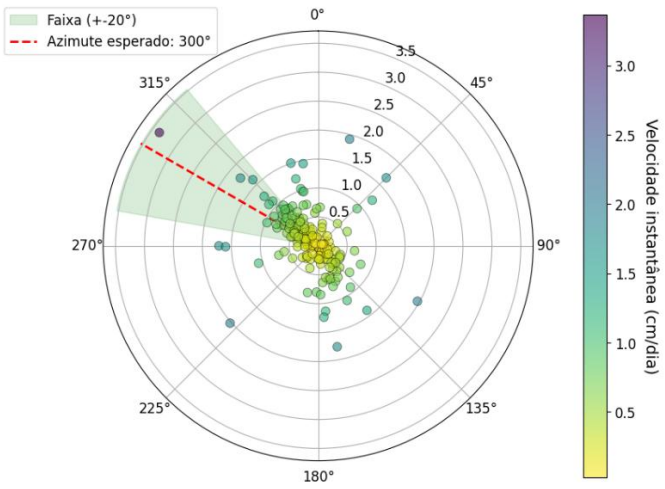


Figura 8. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

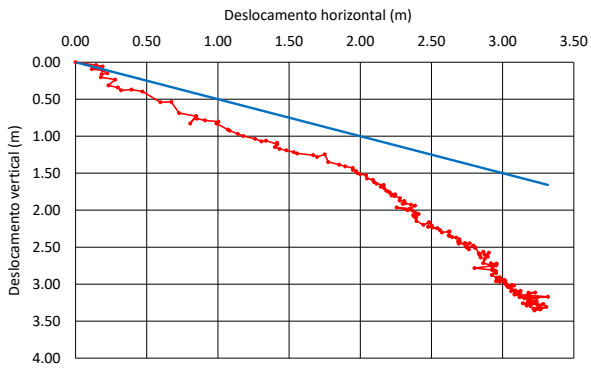


Figura 9. Vetor em perfil

4.3 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Curta)

Diferente do caso anterior, onde a escala plurianual suavizava visualmente as oscilações, a série de um ano (Figuras 10 e 11) destaca como os erros sistemáticos de posicionamento podem influenciar na visualização da tendência real de movimentação do maciço.

Na Figura 10, observa-se um recalque acumulado de aproximadamente 0,60 m em um ano. Embora a tendência descendente seja clara e coerente com comportamento esperado dos resíduos, a curva apresenta degraus e pequenas elevações pontuais. Em um processo real, não era de se esperar que o material recuperasse altura, portanto, essas oscilações positivas são evidências diretas de erros de nivelamento da estação ou variações de visada que afetam a precisão milimétrica da leitura. A Figura 11 apresenta a trajetória horizontal do medidor. Embora exista um vetor preferencial direcionado para Nordeste (azimute aproximado de 40°), a linha de deslocamento é marcada por um padrão acentuadamente ziguezagueante. Este comportamento é o

reflexo direto das dificuldades operacionais citadas anteriormente, como a excentricidade do prisma, onde cada ponto que se desvia bruscamente da linha azul (tendência esperada) representa uma leitura onde possivelmente o bastão não estava perfeitamente centrado ou verticalizado. E também ao tamanho da série histórica, pois em uma série de 10 anos (exemplo 4.2), esse "ziguezague" parece um detalhe, mas em uma série de 1 ano, ele representa parcela notável da amplitude do movimento registrado, o que pode levar a interpretações errôneas sobre a velocidade instantânea do deslocamento.

O gráfico polar de velocidades instantâneas (Figura 12) revela um comportamento aleatório. O azimute esperado para o movimento do talude é de 40° (faixa verde). Contudo, nota-se uma elevada dispersão de pontos fora desta zona, com velocidades de até 1,0 cm/dia apontando para direções opostas ao movimento esperado. Este espalhamento dos vetores de velocidade instantânea confirma que a componente de erro topográfico é de mesma ordem de grandeza que o movimento real do aterro nesta escala de tempo. O movimento real existe (tendência para 40°), mas ele está atenuado em um ruído de medição decorrente do manuseio do equipamento em campo. A Figura 13 apresenta o vetor resultante das movimentações em perfil, sem a exclusão de nenhum registro, sugerindo que no ponto considerado, mesmo com todos os eventuais erros de posicionamento, a identificação de uma direção que não indica problemas de instabilidade, pois tem inclinação superior à original do talude (1V:2H). No entanto, ressalta-se que, com a inclusão de todos os registros, inclusive movimentos horizontais em outras direções que não a esperada, essa avaliação deve ser vista criteriosamente.

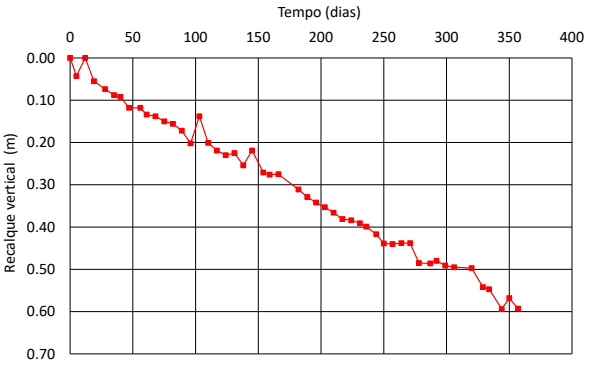


Figura 10. Evolução dos recalques verticais

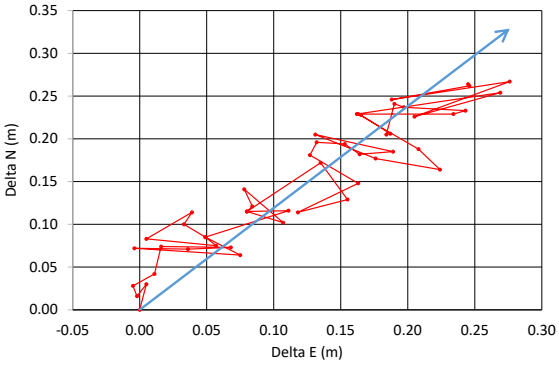


Figura 11. Variação da posição em planta do medidor

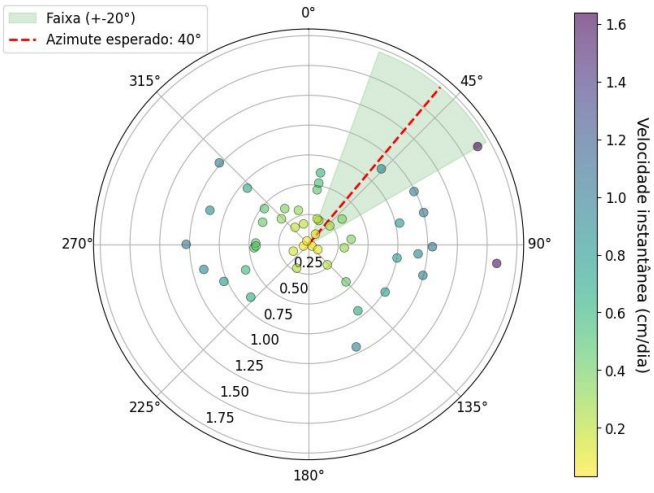


Figura 12. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

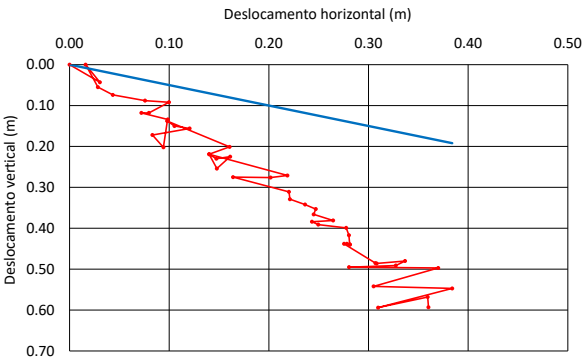


Figura 13. Vetor em perfil

4.4 Medidor Instalado em Área Encerrada de Aterro de Grande Porte (Série Temporal Curta)

Neste exemplo é apresentado um recorte de 2,5 anos dos registros de movimentações de um medidor localizado em área cuja disposição de resíduos, com duração de 2 anos, foi encerrada há aproximadamente 21 anos. Na

Figura 14 observa-se um recalque acumulado de aproximadamente 0,16 m no período, indicando uma estabilização das movimentações, esperada em função da idade dos resíduos. No entanto, são também observados degraus e pequenas elevações pontuais, da mesma forma que na Figura 10. A Figura 15 apresenta a variação da posição em planta, onde, em função das magnitudes observadas (±2,0 cm), fica nítido o padrão ziguezagueante, sugerindo novamente as mesmas falhas de posicionamento dos dispositivos de medição. A Figura 16 confirma isso, pois embora possam ser observados alguns pontos dentro da faixa esperada das movimentações e respectivas velocidades instantâneas de deslocamento (azimute 300°±20), existe uma dispersão significativa, o que torna a interpretação do vetor de deslocamentos (Figura 17) sem significado, sugerindo simplesmente que o ponto considerado só apresenta recalques verticais.

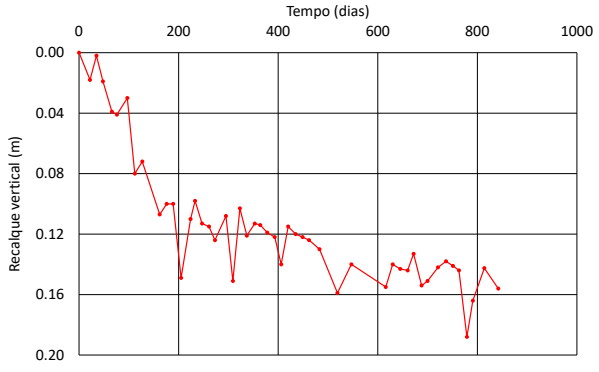


Figura 14. Evolução dos recalques verticais

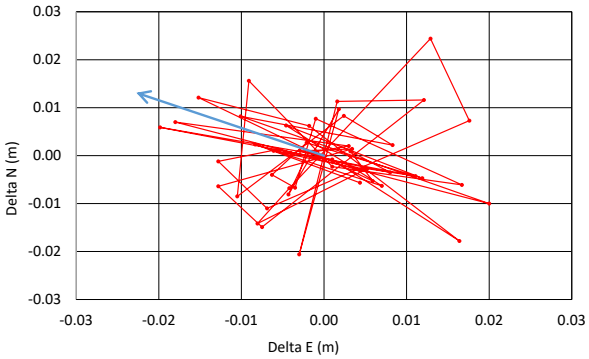


Figura 15. Variação da posição em planta do medidor

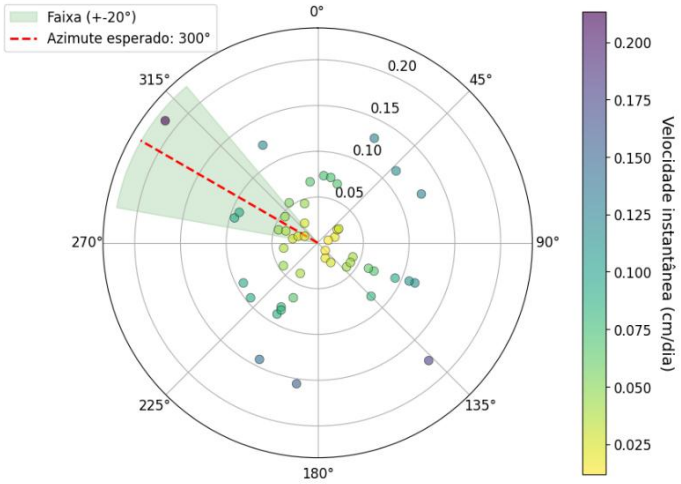


Figura 16. Variação do azimute dos deslocamentos e velocidades horizontais

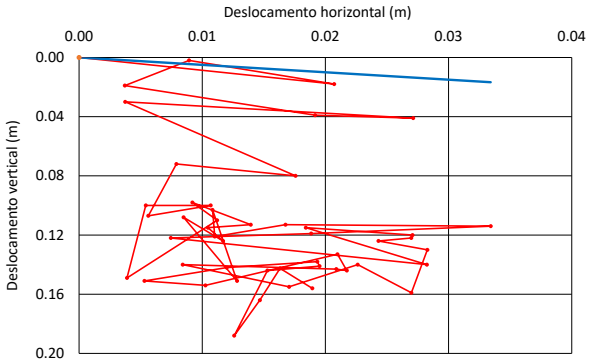


Figura 17. Vetor em perfil

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas medições pontuais, que representam o método de mais fácil acesso para a realidade operacional dos aterros, a alta frequência de leitura – diária ou semanal – é uma vantagem estratégica. No entanto, essa facilidade de acesso deve ser acompanhada por um rigor técnico estrito. Sem o uso de dispositivos de auxílio, como bipés ou prismas de rosca fixos, a variação no posicionamento do bastão e o erro de nivelamento da bolha pelo operador introduzem excentricidades milimétricas. Esses erros se traduzem em um comportamento ziguezagueante nas séries temporais, onde o deslocamento absoluto registrado oscila em torno de um ponto central, criando uma falsa percepção de movimento horizontal do maciço que, na realidade, é apenas uma falha de repetibilidade na centragem do prisma.

Em contrapartida, a aplicação de modelos baseados em nuvens de pontos e Modelos Digitais de Elevação (MDEs) oferece uma perspectiva complementar de maior escala temporal. Devido à logística e ao custo de processamento, tais levantamentos são aplicados em intervalos mensais, trimestrais ou anuais,

permitindo a comparação subsequente da morfologia do aterro. Enquanto os métodos pontuais monitoram o comportamento discreto dos marcos com alta frequência, os MDEs permitem enxergar o deslocamento do maciço como um todo, identificando deformações globais, abaulamentos e variações de crista que as medições isoladas poderiam omitir.

Portanto, a análise de deslocamentos horizontais deve ser integrada: as medições pontuais fornecem o dado imediato e frequente, desde que o operador possua o entendimento técnico dos possíveis erros de campo e utilize acessórios que garantam a verticalidade. Já o monitoramento por malha posicional (fotogrametria, LiDAR ou radar) valida essas informações em uma análise de massa, garantindo que o engenheiro geotécnico diferencie com segurança um ruído de medição de um movimento real de massa.

Ressalta-se também que a identificação das direções dos movimentos horizontais, em relação ao azimute do movimento esperado em uma situação de instabilidade, pode contribuir para a correta interpretação dos registros, permitindo a avaliação de velocidades representativas. A questão da definição de faixas de velocidade que caracterizem níveis de segurança também deve considerar as diferentes fases de um aterro sanitário, o que, dada a complexidade do comportamento geomecânico e biológico dos RSU, ainda precisa ser melhor entendida e investigada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Mineração (ANM) (2025). *Resolução ANM nº 220*, de 16 de outubro de 2025. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. Brasília.

Bezerra, D.E.; Bahia, V.E.A.G.; Bezerra, A.L.R.; Araujo Neto, C.L.; Monteiro, V.E.D.; Melo, M.C. (2024). Monitoring Horizontal Displacements in Landfills Using Instrumentation and Geostatistics. *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, v. 17, p. 330-340, 2024.

Cepollina, M.; Kaimoto, L.S.A.; Motidome, M.J.; Leite, E.F. (2004). Monitoramento em Aterros Sanitários durante a Operação: Desempenho Mecânico e Ambiental. In: Sem. Res. Sólid. São Paulo. *Anais*... ABGE.

Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas-González, M.; Devanthéry, N.; Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, [s. l.], v. 115, p. 78-89.

Giorgini, M.G.; Catapreta, C.A.A.; Simões, G.F. (2021). Modelagem de recalques de longo prazo de um aterro sanitário experimental - Análise crítica de três modelos empíricos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 14, p. 107-121.

Klink, A.F.C. van Elk, A.G.H.P., Silva, J.C. (2021) Aplicação de Modelos Matemáticos para Previsão de Recalques do Aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 37103.

Mello, C.C.S., Salim, D.H.C., Simões, G.F. (2022). UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements. *Waste Management*. 137, 253–263.

Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Appl. Geomat*. 6 (1), 1–15.

Rocha, A.A.A.; Abreu, A.E.S.; Oliveira, F.J.P.; Kamijji, T.S.M.M. (2016). Níveis de Alerta para Monitoramento de Aterros Sanitários Encerrados. In: 18 COBRAMSEG, Belo Horizonte. *Anais*... ABMS.

Siebert, S., Teizer, J. (2014). Mobile 3d mapping for surveying earthwork using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Autom. Constr*. 41, 1–14.

Simões, G.F.; Catapreta, C.A.A.; Martins, H.L. (2007). Monitoramento de Deslocamentos Superficiais como Ferramenta de Auxílio à Avaliação da Estabilidade de Aterros Sanitários - Estudo de Caso Para o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG. In: 6 REGEO, Recife. *Anais*... ABMS.

van Elk, A.G.H.P.; Azevedo, G.S.S.; Corrêa, L.R.; Ritter E. (2018). Análise dos Deslocamentos Verticais e Horizontais do Vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ. In: 19 COBRAMSEG, Salvador. *Anais*...ABMS.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/115

Resistência ao Cisalhamento Direto de Solo Reforçado com Fibra PRFV: Análise e Efeito de Escala

Laís de Castro Nascimento
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, lais_castro003@hotmail.com

Marianna Dias Presoti Vicentini
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, mariannadias21@gmail.com

Bianca da Silva Andrade
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, bianca.andradedm@gmail.com

Júlia Righi de Almeida
Professora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

Cátia de Paula Martins
Professora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

RESUMO: A técnica de melhoramento das propriedades mecânicas do solo com a adição de resíduos fibrosos surge como uma proposta para mitigar os impactos ambientais causados por sua disposição inadequada e para promover o reforço do solo. Esta pesquisa busca analisar a influência da mistura solo-fibra e o efeito de escala na resistência ao cisalhamento de um solo residual argiloso em mistura com Polímero Reforçado de Fibra de Vidro (PRFV). A partir da compactação do solo com teor de 0,5% de fibra PRFV, na Energia Proctor Normal, a amostra de solo-fibra foi moldada utilizando o molde retangular, com dimensões de 10 cm x 10 cm, e realizado o ensaio de cisalhamento direto conduzidos sob quatro diferentes níveis de tensão normal (25, 50, 100 e 200 kPa). Os resultados obtidos mostram que há redução dos parâmetros de resistência da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV comparados com aqueles obtidos para o solo puro, isso pode ser atribuído à influência do comprimento, do teor e da distribuição das fibras. Além disso, houve efeito de escala em relação às dimensões dos corpos de prova desta pesquisa comparados ao de Silva (2024) o qual utilizou molde circular com 6 cm de diâmetro. O ensaio de cisalhamento direto apresenta limitações devido seu plano de ruptura pré-definido, o que pode influenciar o comportamento das fibras. Por fim, destaca a necessidade da continuidade deste estudo para analisar o comportamento da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV por meio de ensaios de resistência a compressão simples e triaxial.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra PRFV, Resistência ao Cisalhamento, Solo Residual Argiloso, Efeito de Escala.

ABSTRACT: The technique of improving soil mechanical properties with the addition of fibrous residues emerges as a proposal to mitigate the environmental impacts caused by their inadequate disposal and to promote soil reinforcement. This research seeks to analyze the influence of the soil-fiber mixture and the scale effect on the shear strength of a residual clayey soil mixed with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Starting from the compaction of the soil with a 0.5% GFRP fiber content, at the Standard Proctor Energy, the soil-fiber sample was molded using a rectangular mold with dimensions of 10 cm x 10 cm, and the direct shear test was conducted under four different levels of normal stress (25, 50, 100 and 200 kPa). The results obtained show that the reduction in the strength parameters of the soil-fiber mixture with 0.5% GFRP compared to those obtained for the pure soil can be attributed to the influence of the length, content and distribution of the fibers. Furthermore, there was a scale effect in relation to the dimensions of the specimens in this research compared to that of Silva (2024), which used a circular mold with a diameter of 6 cm. The direct shear test has limitations due to its predefined rupture plane, which can influence the behavior of the fibers. Finally, it highlights the need for the continuation of this study to analyze the behavior of the soil-fiber mixture with 0.5% FRP through simple compression and triaxial strength tests.

KEYWORDS: FRP fiber, Shear strength, Residual clay soil, Scale effect.

1 INTRODUÇÃO

O solo é fundamental para o suporte e estabilidades das obras de Engenharia Civil, porém por ser um material natural e heterogêneo pode não apresentar propriedades adequadas para atender determinada aplicação em campo.

Diante desta problemática, os estudos de técnicas para o melhoramento das propriedades do solo tornam-se relevantes, sendo uma das alternativas a adição de fibras ao solo para atuarem como reforço. De acordo com Trindade et al. (2004), a adição de fibras promove a melhoria da resistência à tração, contribuindo para o ganho das propriedades mecânicas do solo, apontando então a aplicação esta técnica como uma alternativa promissora em obras de Engenharia Civil. Segundo Rocha (2019), as fibras ao serem inseridas ao solo contribuem para a resistência ao cisalhamento, formando pontes de transferências que absorvem as solicitações, favorecendo a maior redistribuição das fissuras e aumentando a ductilidade do material.

Com isso, o reforço de solo com adição de resíduos fibrosos tem sido avaliado por diversos estudos (Casagrande, 2005;Feuerharmel, 2000; Lucarelli 2018; Gantus-Oliveira, 2023; Rocha, 2019; Teodoro,1999) que demonstram a alteração da resistência do material. Merville (2024) observou em sua pesquisa que o comportamento solo-fibra depende de diversos fatores como solo, tipo de fibra, comprimento e teor de fibras, sendo então necessário realizar estudos para verificar o comportamento solo-fibra frente à resistência e as possíveis aplicações em campo. Além disso, o uso de resíduos como reforço de solo, apresenta–se como uma alternativa sustentável, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado e acúmulo de resíduos (Borssato,2025; Lucarelli, 2018; Silva,2023).

De acordo com Consoli et al. (2005), os parâmetros de resistência podem diferir para corpos de prova moldados com diferentes dimensões, atribuindo o efeito de escala, o que se torna ainda mais relevante em solos reforçados com fibras uma vez que o comportamento mecânico depende da distribuição e interação solo-fibra. Feuerharmel (2000) e Teodoro (1999) defendem a hipótese de que corpos de prova com menores dimensões tendem a ser menos representativos da mistura e possuir menor número de fibras interceptando o plano de ruptura, o que pode limitar a mobilização do mecanismo de reforço, resultar em maior variabilidade e levar à subestimação da resistência. Por outro lado, Casagrande (2005) e Consoli et al. (2005), apontam que a moldagem de corpos de prova com maiores dimensões favorece a melhor distribuição das fibras, aumentando a probabilidade da mobilização de esforços de tração, levando a resultados mais representativos do comportamento da mistura. Assim, pode-se inferir que o tamanho do corpo de prova não é apenas um detalhe, mas uma variável do estudo experimental.

Neste contexto, o aproveitamento de resíduos fibrosos do tipo Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) surge como uma proposta sustentável ao ser utilizado como reforço de solo. Sendo assim, o presente artigo objetiva analisar os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto para a mistura solo-fibra com teor de 0,5% de fibra PRFV, utilizando molde retangular com dimensões 10 x 10 cm, e avaliar o efeito de escala ao compará-los à pesquisa de Silva (2024), que fez uso do molde circular com 6 cm de diâmetro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado na cidade de Juiz de Fora - MG, em um talude próximo à Pró-Reitoria de Infraestrutura da Universidade Federal de Juiz de Fora (PROINFRA – UFJF).

De acordo com os ensaios de caracterização realizados por Barletta (2021), o solo apresenta a seguinte composição granulométrica: 57,1% de fração argila, 33,6% de areia (sendo 15,6% de areia fina, 13,9% média e 4,1% grossa), 8,4% de silte e 0,9% de pedregulho. E, ainda, obteve para o solo o Limite de Plasticidade (LP) de 29%, o Limite de Liquidez (LL) de 52% e a massa específica dos grãos igual a 2,81 g/cm³. Já o ensaio de compactação na Energia Normal apontou os valores de massa específica seca máxima de 1,54 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 26,8%.

No que se refere à resistência ao cisalhamento do solo, Abrantes (2022, *apud* Silva, 2024) obteve ângulo

de atrito (φ) de 35,2° e intercepto coesivo (c') igual a 17,9 kPa. A Figura 1 mostra as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e a envoltória de resistência.

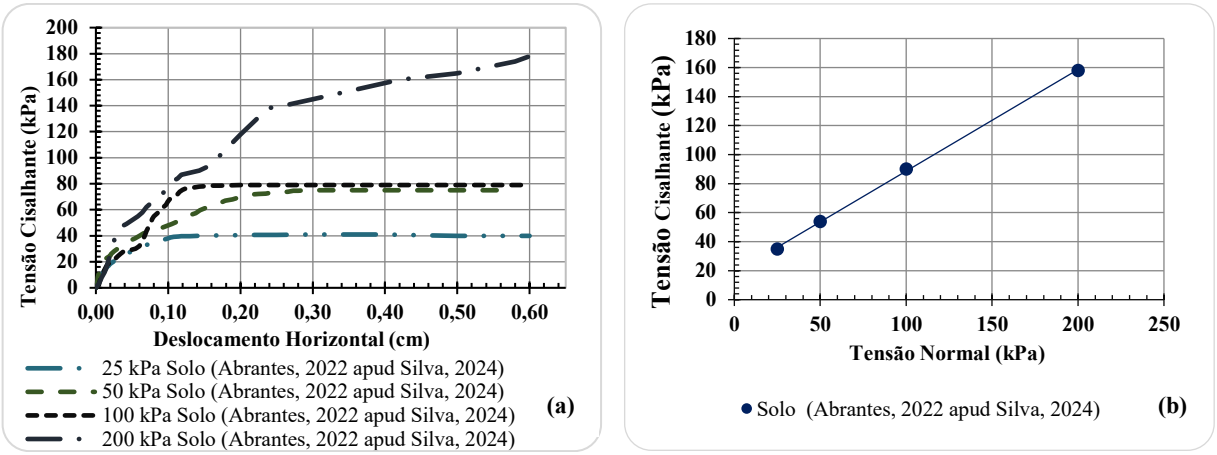


Figura 1 – Resistência ao cisalhamento do solo :(a) Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; e (b) Envoltória de Resistência (Fonte: Adaptado de Abrantes (2022) *apud* Silva (2024))

2.1.2 Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro

O resíduo utilizado é o Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), proveniente da produção de caixas d'água, disponibilizado pela empresa Fribrasil, localizada em Lavras-MG. O material apresenta-se em formato de filamentos, com comprimento predominante de 17 mm, largura inferior a 1 mm, agrupados de forma aleatória (Figura 2a)

2.1.2 Mistura Solo-Fibra

O teor de fibra utilizado neste estudo foi de 0,5% de fibra PRFV a em relação à massa total seca da mistura. Para a compactação dos corpos de prova da mistura solo-fibra PRFV, adotou-se os parâmetros de compactação desta mistura à Energia Normal obtidos por Silva (2024) em sua pesquisa, sendo a umidade ótima igual a 25,18% e a massa específica aparente seca máxima de 1,564 g/cm³.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação da Fibra

As fibras PRFV foram separadas manualmente (Figuras 2a e 2b) e, em seguida, foi verificado o comprimento predominante igual a 17 mm. Com base nesta observação, foi definido o uso da fibra com o referido comprimento para preparo da mistura.

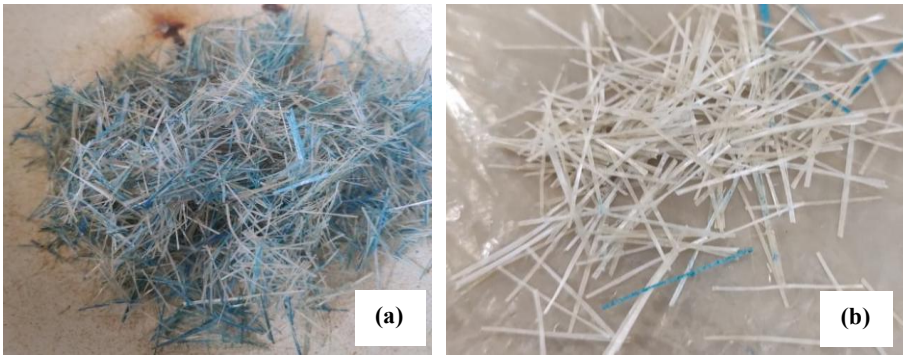


Figura 2. Resíduo PRFV: (a) Fibra PRFV agrupada de forma aleatória; e(b) Fibra PRFV separada manualmente (Fonte: Autor, 2026)

2.2.2 Preparação da Amostra de Solo

Primeiramente, a amostra de solo foi coletada e disposta em bandejas para secagem ao ar. Após atingir a umidade higroscópica, o solo foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2024), com vistas à realização do ensaio de compactação. A mistura solo-fibra PRFV foi homogeneizada para o teor de umidade ótimo de 25,18%, valor obtido por Silva (2024). A compactação dos corpos de prova para ensaios posteriores seguiu o procedimento da norma NBR 7182 (ABNT,2025), na Energia Normal e utilizando cilindro grande com dimensões de 15,22 cm de diâmetro e 17,37 cm de altura.

2.2.4 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto

Os corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto foram moldados com uso do molde retangular, dimensões de 10 x 10 cm, a partir da mistura solo-fibra compactada na umidade ótima de 25,18%, no cilindro grande e na Energia Normal.

Na sequência, realizou–se o ensaio de resistência ao cisalhamento direto de acordo com as especificações da norma ASTM D3080 (ASTM, 2023). Foram ensaiados quatro corpos de provas, submetidos às tensões normais iguais a 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, estabelecidas para a pesquisa exploratória, e a velocidade de cisalhamento de 0,1 mm/s, assim como aplicados no estudo de Silva (2024). Após o ensaio, foram coletados os dados de deslocamento horizontal e tensões cisalhantes, a fim de obter a envoltória de resistência e os parâmetros de resistência da mistura solo-fibra PRFV para o teor em estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto da Mistura Solo-Fibra PRFV

Na Figura 3 é possível observar o comportamento dos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto para a mistura solo-fibra com teor de 0,5% de PRFV. As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Figura 3a) não apresentam um pico de resistência bem definido, como aquele observado para o solo (Figura 1a). Notam-se um pico de resistência inicial entre 0,04 e 0,09 cm de deslocamento horizontal logo após um decréscimo seguido por aumento da resistência junto ao deslocamento, até atingido o valor de 0,6 cm adotado como critério de parada do ensaio. Este comportamento parece corroborar com os estudos realizados por Feuerharmel (2000), o qual observou que o comportamento da mistura solo-fibra apresenta uma fase inicial comandada pela matriz de solo; fase intermediária em que atuam solo e fibras em conjunto e a fase final em que a mobilização da resistência ocorre apenas pelas fibras. No caso, entende-se que o 1º pico (Figura 3a) corresponderia à resistência mobilizada pela matriz do solo e o 2º pico (Figura 3a, por volta de 0,58 cm) equivaleria à mobilização do conjunto solo-fibra PRFV. Já na Figura 3b, em função do comportamento das curvas experimentais, há indicativo de ter ocorrido compressão dos corpos de prova ao longo da etapa de cisalhamento.

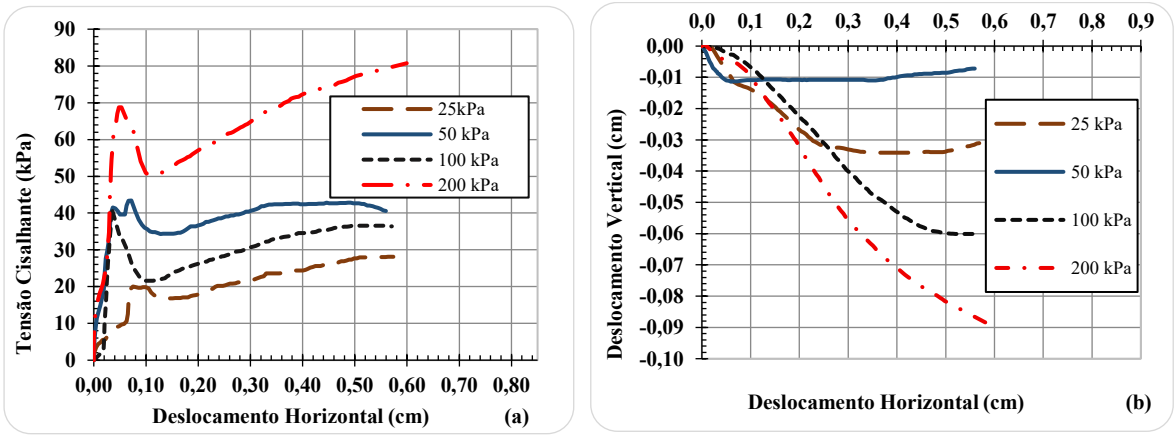


Figura 3 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto: (a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; e (b) Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (Fonte: Autor, 2026)

A Figura 4 mostra as envoltórias de resistência do solo (Abrantes, 2022 apud Silva, 2024) e da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV correspondente à fase considerada como mobilização conjunta (2º pico). É notável que as curvas apresentam comportamentos distintos no que confere à inclinação, o que reflete na resistência dos materiais. Os parâmetros de resistência extraídos das envoltórias encontram-se na Tabela 1.

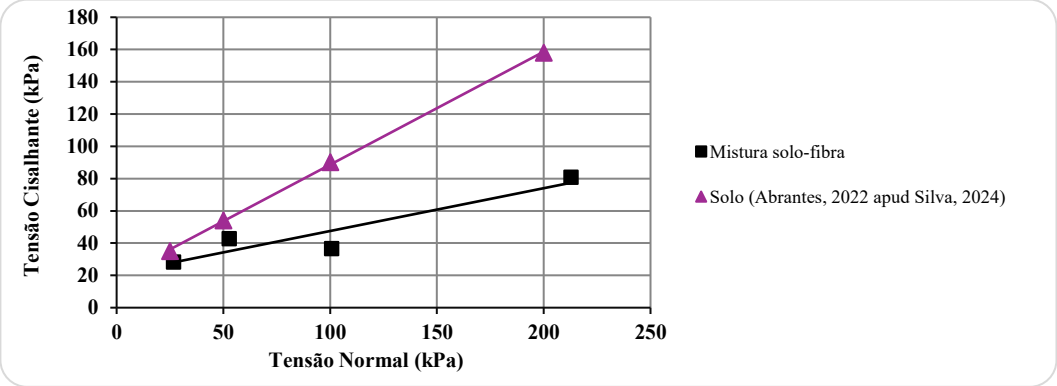


Figura 4 - Envoltórias de Resistência
(Fonte: Autor, 2026)

Tabela 1. Parâmetros de resistência (φ, c') do solo e da mistura solo-fibra PRFV

Material	φ (°)	c' (kPa)
Mistura Solo-Fibra com 0,5% de PRFV	14,8	21
Solo (ABRANTES, 2022 apud Silva, 2024)	35,2	17,9

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que houve a redução do ângulo de atrito (14,8º) e um sutil aumento da "coesão" (21 kPa) em relação ao solo puro (35,2 º e 17,9 kPa). Os resultados obtidos mostram que não houve aumento da resistência ao cisalhamento do solo, estando então em desacordo com o observado por Rocha (2019). No entanto, Merville (2024) destaca que o comportamento solo-fibra depende de diversos fatores e, caso não estejam em conformidade, a fibra pode não contribuir para melhorar as propriedades do solo. E, ainda, Teodoro (1999) e Casagrande (2005), afirmam que a melhoria da resistência do solo não depende apenas da adição de fibra, mas também de condições específicas da interação solo-fibra.

Adicionalmente, a pesquisa de Gantus-Oliveira (2023) aponta que a variação dos parâmetros de resistência pode estar relacionada com a distribuição aleatória das fibras no plano de ruptura, levando o alinhamento das fibras a coincidir com o plano. Para o autor, esta condição contribuiria para o deslizamento do solo em vez de possibilitar que resista ao cisalhamento.

Por outro lado, a redução da resistência da mistura solo–fibra PRFV pode estar associada às características físicas da própria fibra. Como exemplo, tem-se o comprimento igual a 1,7 cm da fibra PRFV utilizada nesta pesquisa, podendo este ser inferior ao comprimento crítico necessário para mobilização de tensões de tração e ancoragem na matriz do solo (Feuerharmel, 2000; Teodoro,1999; Casagrande, 2005; Consoli et al, 2005). Nessas condições, as fibras tendem a atuar como inclusões inertes, sem contribuir efetivamente para o reforço (Feuerharmel, 2000). Além disso, a baixa aderência na interface solo–fibra devido à superfícies lisas ou pouca rugosas, possibilita o deslizamento relativo e dificulta a transferência de tensões (Lucarelli, 2018; Costa et al, 2021).

Ademais, a presença de fibras pode provocar alterações na estrutura do solo compactado, dificultando o rearranjo das partículas e aumentando o índice de vazios, o que resulta em menor massa específica seca e redução da resistência ao cisalhamento (Rocha, 2019; Consoli et al, 2005). Segundo Teodoro (1999), em solos argilosos esse efeito pode ser ainda mais significativo, pois a resistência depende fortemente da coesão e da integridade estrutural da matriz, podendo a inclusão de fibras comprometer essas ligações. Além disso, o próprio ensaio de cisalhamento direto apresenta limitações por ter plano de ruptura previamente definido, o que pode restringir a mobilização das fibras, sobretudo quando orientadas desfavoravelmente.

Por fim, o combinado dos fatores destacados pode limitar o desenvolvimento do mecanismo de reforço pela adição de fibras e reduzir resistência ao cisalhamento da mistura (Merville, 2024; Consoli et al, 2005), sendo essa uma possível justificativa para a redução dos parâmetros de resistência da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV desta pesquisa.

3.2 Efeito de Escala

A Figura 5 apresenta as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal obtidas nesta pesquisa, com uso do molde com maiores dimensões (quadrado, 10 cm x 10 cm) e as curvas obtidas por Silva (2024) com uso do menor molde (circular, 6 cm de diâmetro), cujos corpos de prova moldados estiveram submetidos às tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa.

É perceptível que há comportamentos distintos entre as curvas da Figura 5. Para a faixa de deslocamento horizontal entre 0,04 mm e 0,10 mm, observa-se que as curvas da presente pesquisa apresentaram pico de resistência inicial (no item 3.1 foi discutido que esse pico representa a fase de mobilização da matriz do solo) enquanto as curvas de Silva (2024) mostraram um patamar inicial. De acordo com Casagrande (2005) e Consoli et al. (2005), o comportamento relatado indica que com o uso do molde maior, possivelmente há mais fibras interceptando o plano de ruptura e algumas podem ter sido mobilizadas logo no início do ensaio, aparecendo o pico inicial. Porém, Feuerharmel (2000) e Teodoro (1999) destacam que ao utilizar um molde menor espera-se por menos fibras cruzando o plano, não havendo mobilização suficiente, configurando a presença de um patamar na curva ao invés de um pico bem definido. Por fim, deduz-se que em escala menor o comportamento se apresenta de forma dúctil, sem ruptura inicial do solo, ao passo que em escala maior o comportamento se mostra frágil, com mobilização posterior do mecanismo de reforço fibroso.

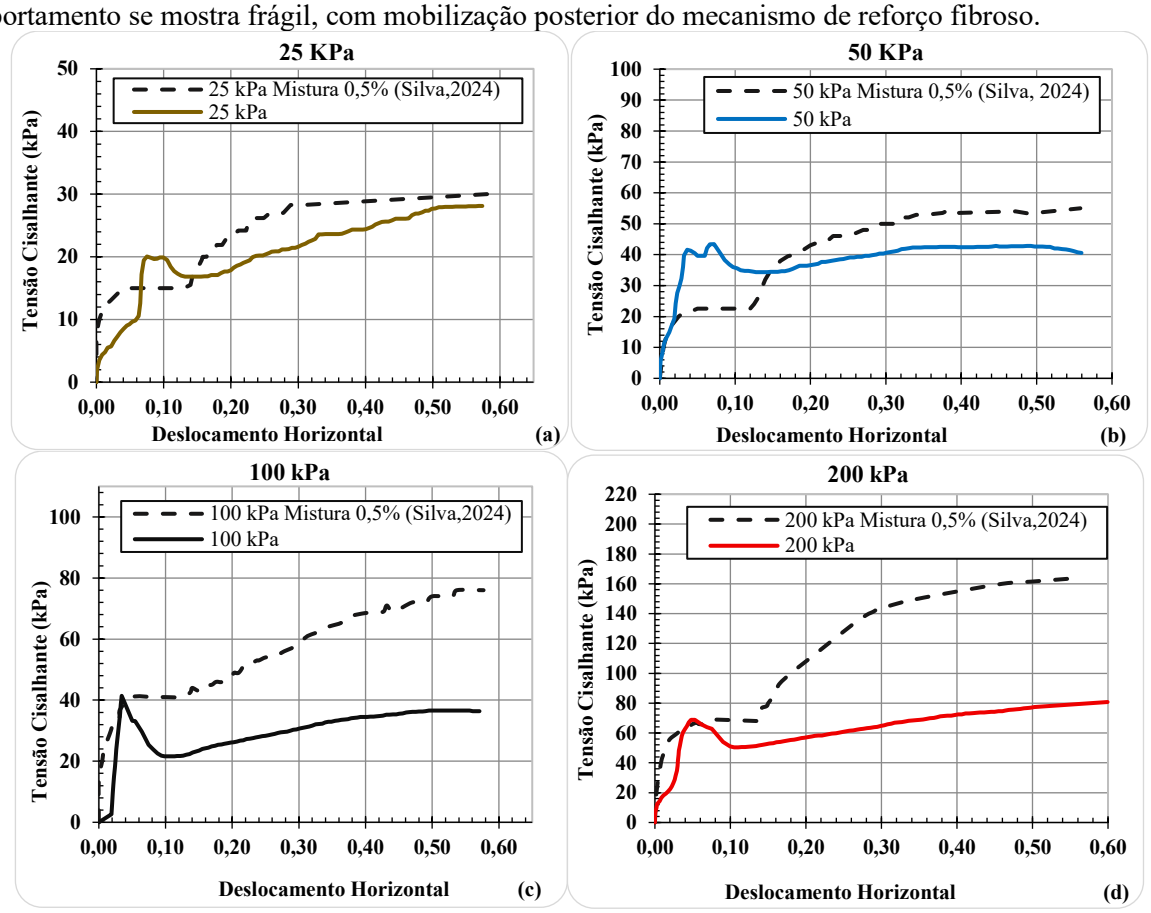


Figura 5 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV, para as seguintes faixas de tensão normal: (a) 25 kPa; (b) 50 kPa (c) 100 kPa (b) 200 kPa (Fonte: Autor, 2026)

A Figura 6 mostra as envoltórias de resistência desta pesquisa e aquela obtida por Silva (2024) e a Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada uma das envoltórias. Observa-se que há comportamentos distintos quanto à inclinação entre as envoltórias da Figura 6, indicando a possível influência do efeito de escala nos resultados dos ensaios. Na Tabela 2 nota-se que, com uso do molde maior houve aumento da coesão (21 kPa) e redução do ângulo de atrito (14,8º) quando comparados aos resultados da pesquisa de Silva (2024) que fez uso de molde menor (coesão, 9,6 kPa; ângulo de atrito, 33,6º).

Presume-se que a mobilização do reforço do solo argiloso com fibra PRFV, ainda que não tenha ocorrido de forma substancial, possa ter contribuído para o aumento da coesão da mistura solo-fibra ao ser utilizado o molde maior, pois como apontado por Rocha (2019) haveria maior área para a formação de pontes de transferências de solicitações.

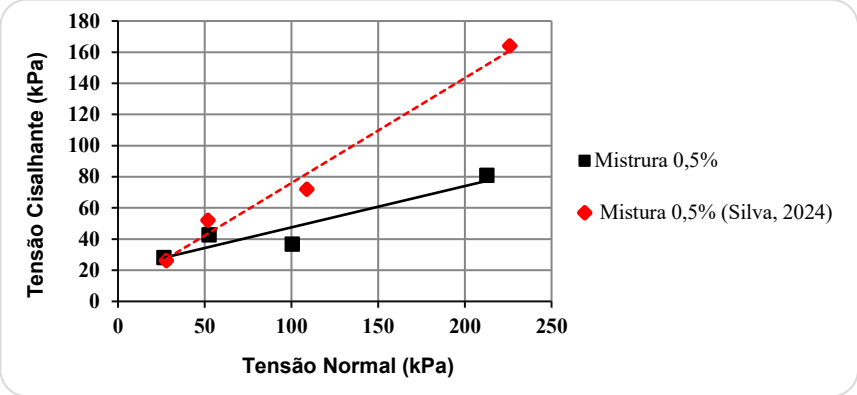


Figura 6 - Envoltórias de resistência para mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV (Fonte: Autor, 2026).

Tabela 2. Parâmetros de resistência para a mistura solo-fibra com o,5% de PRFV

Ruptura	φ (°)	c' (kPa)
Mistura 0,5%	14,8	21
Mistura 0,5% (Silva, 2024)	33,6	9,6

Por fim, a variação dos parâmetros de resistência obtidos entre corpos de prova com diferentes dimensões pode estar relacionada ao efeito de escala, especialmente em solos argilosos reforçados com fibras, cujo comportamento mecânico depende da distribuição e interação do teor analisado (Lucarelli 2018; Gantus-Oliveira, 2023).

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que ocorreu a redução dos parâmetros de resistência da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV comparado àqueles obtidos para o solo, demonstrando que a adição da fibra PRFV, na proporção e comprimento adotados, não contribuiu para o mecanismo de reforço do solo.

Além disso, aponta-se que houve efeito de escala em relação às dimensões de moldagem dos corpos de prova desta pesquisa comparados àqueles de Silva (2024), o que pode ter influenciado nos parâmetros de resistência da mistura solo-fibra com 0,5% de fibra de PRFV, levando à obtenção de valores distintos. Considera-se, também, que a baixa aderência na interface solo-fibra pode dificultar a redistribuição de tensões, o que pode ser outro fator para não se obter os resultados esperados. Destaca-se ainda que a limitação do ensaio de cisalhamento direto, especialmente por apresentar plano de ruptura pré-definido, pode ter contribuído para minimizar os efeitos da fibra como mecanismo de reforço do solo.

Finalmente, almeja-se a continuidade desta pesquisa a fim de investigar o comportamento da mistura solo-fibra com 0,5% de PRFV por meio de ensaios de resistência a compressão simples e triaxial.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo apoio institucional à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2024). NBR 6457.Solo- *Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2025). NBR 7182.Solo- *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

ASTM International (200). ASTM D 3080: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.

Barletta, V. F. (2021) *Estudos Mecânicos de Misturas Solo-Composto para Fins Geotécnicos*. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 113p.

Borsatto, M. B. (2025) *Comportamento da resistência de solos lateríticos com inclusão de tiras plásticas*. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, 161p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/ed6bf1f5-fa94-475a-a57a-cc394ed83d90>. Acesso em 24 mar. 2026.

Casagrande, M. D. T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 219p. Disponível em: < https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5345> Acesso em 24 mar. 2026.

Consoli, N. C.; Casagrande, M. D. T.; Coop, M. R. (2005*) Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 131, n. 11, p. 1434–1436.

Costa, L. F. da; MARINHO FILHO, P. G. T.; TENÓRIO, E. A. G.; LUCENA, L. C. de F. L. (2021) *Análise do comportamento mecânico de solo silto-argiloso reforçado com geotêxtil*. Revista Principia, n. 57, p. 234–241.Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4983. Acesso em: 26 mar. 2026.

Feuerharmel, M. R. (2000) *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 133p.

Gantus-Oliveira, T. (2023) *Avaliação do uso de fibras de garrafas pet como reforço de solo laterítico compactado*. Geociências (São Paulo. Online), v. 42, p. 253-268. Disponível em: < https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/17487> Acesso em 24 mar. 2026.

Lucarelli, D. C. (2018) *Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de Distribuição Aleatória*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 153p. Disponível em: < https://locus.ufv.br/items/4bfd2273-c9ff-4ecd-ad94-3e87df8fe263>. Acesso em 24 mar. 2026.

Merville, Ana Kelly Fernandes. (2024) *Estudo do comportamento hidromecânico de misturas de solo areno argiloso com fibras de polipropileno.* Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 96p.

Orth, C. M.; Baldin, N.; Zanotelli, C. T. (2012) *Implicações do Processo de Fabricação do Compósito Plástico Reforçado com Fibra de Vidro sobre o Meio Ambiente e a Saúde do Trabalhador: o Caso da Indústria Automobilística.* Revista Produção Online, Florianópolis, S, V.12, N. 2, p. 537-556.

Rocha, S. A. (2019) *Avaliação da Influência de Fibras de Polipropileno na Resistência Efetiva de um Solo Argiloso.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2019, 120p. Disponível em: < https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/11891>. Acesso em: 24 mar. 2026

Silva, C. M., Martins, C. P. (2024) *Estudo da resistência ao cisalhamento direto em misturas compactadas de solo residual maduro e resíduo fibroso PRFV*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,21. Campinas, São Paulo, Brasil.

Silva, C. M. (2023) *Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas compactadas de um solo residual com o resíduo fibroso PRFV*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, p.81.

Teodoro, J. M. (1999). *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. Dissertação de Mestrado de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-14062018-144401/es.php>. Acesso em: 24 mar. 2026.

Trindade, T. P.; Iasbik, I.; Lima, D. C.; Carvalho Silva, C. H.; Barbosa, P. S. A. (2004) *Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório.* Revista Escola de Minas, Ouro Preto. v. 57(1), 2004, p. 53-58.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/116

Resistência de Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos em Função da Variação do Teor de Matéria Orgânica

Maria Clara Moreira Fort
Mestre em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, maria.c.fort@ufv.br

Rejane Nascentes
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

Simone Cristina de Jesus
Docente, UFMT, Uberaba, Brasil, simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: Frente aos diversos desafios encontrados na experimentação dos RSU, este trabalho teve como objetivo propor o uso de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) em substituição dos RSU, verificando se os RSMS simulam adequadamente o comportamento de RSU em ensaios geotécnicos convencionais. Foi dada ênfase na avaliação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em função da variação do teor de matéria orgânica. Para tanto, a partir da gravimetria da cidade de Viçosa, MG, foram preparadas três misturas de RSMS (MO01, MO02 e MO03), com teor de matéria orgânica compostável decrescente a partir de MO01. As amostras foram submetidas aos ensaios de compactação na energia de Proctor Normal e triaxial não drenado (CIU). No ensaio CIU os corpos de prova foram moldados com pesos específicos entre 5,5 e 6,0 kN/m³, padronizados a 60% de umidade conforme curvas de compactação obtidas previamente no ensaio de compactação. Avaliaram-se também o comportamento dos parâmetros coesão e ângulo de atrito para tensões totais e efetivas com a deformação. Os resultados indicam que o teor de matéria orgânica influencia diretamente o peso específico seco máximo, que foi de 6,0, 5,8 e 5,5 kN/m³ para MO01, MO02 e MO03, respectivamente. Observou-se também que a constituição de RSMS proposta neste trabalho não apresentou pico de resistência ao cisalhamento, manifestando, inclusive, comportamento ascendente nas curvas tensão-deformação em maiores taxas de deformação, conforme já previsto para RSU na literatura. Relata-se que a composição gravimétrica e presença de materiais fibrosos influência na resistência ao cisalhamento, que também é dependente da deformação e ancoragem das fibras no maciço. Foram encontrados, em todos os tratamentos, altos valores do ângulo de atrito efetivo (58º a 69º, para 15% de deformação axial) e coesão nula para MO01 e MO03, semelhante a trabalhos anteriores que realizaram testes CIU em larga escala com RSU. Finalmente, conclui-se que o comportamento qualitativo das amostras com RSMS se revelou muito semelhante ao dos RSU reais, demonstrando a eficácia do método para simular esses resíduos para utilização em testes geotécnicos de escala convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros Sanitários; Resistência ao Cisalhamento; Coesão; Ângulo de Atrito; RSU

ABSTRACT: Given the various challenges encountered in the experimentation with MSW (Municipal Solid Waste), this work aimed to propose the use of synthetic municipal solid waste (SMW) as a substitute for MSW, verifying whether SMW adequately simulates the behavior of MSW in conventional geotechnical tests. Emphasis was placed on evaluating shear strength parameters as a function of varying organic matter content. To this end, three MSW mixtures (MO01, MO02, and MO03) were prepared from the gravimetric data of the city of Viçosa, MG, with decreasing compostable organic matter content starting from MO01. The samples were subjected to compaction tests using the Standard Proctor energy and undrained triaxial (UCI) tests. In the UCI test, the specimens were molded with specific weights between 5.5 and 6.0 kN/m³, standardized to 60% moisture content according to compaction curves obtained previously in the compaction test. The behavior of the cohesion and friction angle parameters for total and effective stresses with deformation was also evaluated. The results indicate that the organic matter content directly influences the maximum dry specific weight, which was 6.0, 5.8, and 5.5 kN/m³ for MO01, MO02, and MO03, respectively. It was also observed that the proposed

MSW composition in this work did not present a peak shear strength, even showing an upward trend in the stress-strain curves at higher deformation rates, as already predicted for MSW in the literature. It is reported that the gravimetric composition and presence of fibrous materials influence the shear strength, which is also dependent on the deformation and anchoring of the fibers in the mass. In all treatments, high values of the effective friction angle (58º to 69º, for 15% axial deformation) and zero cohesion were found for MO01 and MO03, similar to previous studies that performed large-scale CIU tests with MSW. Finally, it is concluded that the qualitative behavior of the samples with RSMS proved to be very similar to that of real MSW, demonstrating the effectiveness of the method to simulate these residues for use in conventional-scale geotechnical tests.

KEYWORDS: Landfills; Shear Strength; Cohesion; Angle of Friction; MSW

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma grandeza crescente, impulsionada pelo crescimento populacional e pelo aumento da geração per capita de resíduos. As projeções indicam que em 2050 podem ser geradas globalmente até 3,8 bilhões de toneladas anuais de RSU, o que representa um aumento de mais de 80% em relação às 2,1 bilhões de toneladas produzidas em 2020 (United Nations Environment Programme, 2024). Deste modo, diante da demanda crescente por áreas para aterros sanitários, observa-se como resultado a busca de uma maior vida útil destas obras. Isto acontece já prevendo grandes alturas de células desde a concepção inicial ou fazendo projetos para ampliar os aterros que se encontram em operação.

Contudo, a avaliação da estabilidade de taludes nos aterros sanitários requer estimativas confiáveis dos parâmetros geotécnicos dos maciços sanitários. Muito embora na prática de projeto de aterros sanitário recorra-se a critérios e modelos teóricos da Mecânica dos Solos Clássica adaptados à geomecânica dos resíduos, há logo de início a incompatibilidade de escala entre os RSU e os equipamentos geotécnicos convencionais, sendo necessário a adaptação dos equipamentos a escalas maiores, tornando ensaios onerosos e de difícil execução.

Frente a isto, observa-se avanços recentes em estudos com resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) que se concentram, sobretudo, na elaboração de composições sintéticas que simulem com maior fidelidade a gravimetria e propriedades dos elementos reais do RSU, considerando características como tamanho, forma, e comportamento mecânico dos componentes (Reddy *et al* 2009; Singh e Uchimura, 2023 e Xie et al., 2022).

A opção de utilizar RSMS no lugar de resíduos sólidos urbanos reais possui diversas vantagens, podendo citar entre elas o melhor controle da composição da amostra, a utilização de equipamentos convencionais comumente utilizados em ensaios geotécnicos; bem como a utilização de componentes mais limpos, superando preocupações sanitárias e de segurança no laboratório (Singh e Uchimura, 2023). Com a escassez de pesquisas no mundo, devido ao caráter inovador da metodologia, existem diversas lacunas sobre o uso dos RSMS e sua validação para simulação de RSU. Tampouco há alguma metodologia definida, seja para a realização dos ensaios geotécnicos ou até para a forma de construção e constituição das amostras.

Portanto, os objetivos deste trabalho foram: (1) fornecer subsídios práticos para o desenvolvimento de métodos experimentais mais acessíveis; (2) obter parâmetros de resistência ao cisalhamento em composições de RSMS representativas dos RSU brasileiros; (3) investigar a influência do teor de matéria orgânica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparação dos Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos (RSMS)

Os RSMS foram produzidos em laboratório a partir da mistura de componentes controlados e na composição desejada, com a finalidade de simular RSU para a realização de testes geotécnicos convencionais. Foram representadas cada uma das frações gravimétricas por diferentes materiais a saber: sendo com matéria orgânica compostável (carne moída de bovino), plástico mole (sacos de lixo), plástico duro (PET, polímero politereftalato de etileno), papel e papelão, vidro, metais (aluminio), couro/borracha/têxtil, madeira (maravalha), rejeitos (papel higiênico e enchimento absorvente de fraldas). A escolha se deu ao fato de estes

materiais serem os principais componentes dessa fração observados nos resíduos reais e a divisão por serem materiais de comportamentos muito distintos.

Todos os materiais utilizados para a produção dos RSMS estavam secos, com exceção da carne moída que foi adicionada em sua umidade natural e do enchimento absorvente que foi preparado considerando 50% de peso seco e 50% de água, uma vez que este ao ser descartado normalmente contém líquido absorvido. Para realização de testes utilizando equipamentos geotécnicos tradicionais, foi necessário limitar o tamanho do resíduo, conforme redução e padronização das dimensões mostrados na Figura 1.

Deste modo, Plásticos, Papéis, Metais, Têxteis, Madeira e Papel Higiênico foram cortados à mão em tamanhos que variam entre 1 a 3 mm de largura e 5 a 15 mm de comprimento. Os cubos de vidro possuíam em média 5 mm de lado e a carne e enchimento absorvente foram misturados em seus tamanhos originais.

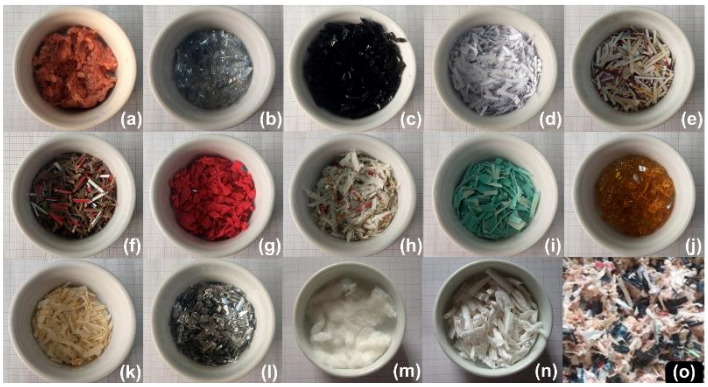


Figura 1 - Tamanho e forma das partículas do Resíduo Sólido Municipal Sintético (RSMS) após preparo para ensaios laboratoriais. Legenda: (a) Carne moída – M.O.C.; (b) PET – plástico duro; (c) sacos de lixo – plástico mole; (d) papel de escritório – papel e papelão; (e) papel cartão – papel e papelão; (f) papelão – papel e papelão; (g) tecido de algodão – borracha e têxtil; (h) tecido de poliéster – borracha e têxtil; (i) borracha – borracha e têxtil; (j) vidro; (k) maravalha – madeira; (l) alumínio – metais; (m) enchimento absorvente – rejeito; (n) papel higiênico – rejeito; (o) mistura final dos materiais.

2.2 Composições gravimétricas estudadas

O programa experimental estabeleceu três diferentes tratamentos (MO01, MO02 e MO03) que variam entre si na porcentagem de matéria orgânica dentro da composição gravimétrica, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição gravimétrica final dos tratamentos MO01, MO02 e MO03

		Frações		
Categoria	Soares (2021)	MO01	MO02	MO03
Matéria orgânica compostável	44,5%	45,1%	35,1%	25,1%
Plástico Mole	11,2%	11,5%	13,4%	15,5%
Plástico Duro	4,4%	4,5%	5,3%	6,1%
Papel e papelão	8,2%	8,3%	9,8%	11,4%
Vidro	2,4%	2,4%	2,9%	3,3%
Metais	1,1%	1,1%	1,3%	1,5%
Couro, borracha e têxtil	3,2%	3,2%	3,8%	4,4%
Madeira	0,3%	0,3%	0,4%	0,4%
Outros	1,4%	-	-	-
Rejeitos	23,3%	23,6%	28,0%	32,3%

No primeiro tratamento proposto, MO01, a gravimetria inicial a ser tomada foi a gravimetria típica da cidade de Viçosa-MG, determinada por Soares (2021), que é representativa da gravimetria brasileira estimada pela ABRELPE (2020). Para o segundo e o terceiro tratamentos propostos, MO02 e MO03, a porcentagem de matéria orgânica compostável (MOC) foi decrescida, diminuindo-se 10% desta a cada tratamento. Após fixado o novo valor de MOC, as demais frações foram recalculadas de modo a manter as proporções que existiam entre os elementos.

Além disso, como a fração "Outros" é justamente composta por quaisquer objetos que são não se enquadram nas demais frações,ela foi desconsiderada e a quantidade referente a ela redistribuída proporcionalmente entre as demais frações.

Às amostras de RSMS que foram submetidas a ensaios geotécnicos em laboratório, foi acrescentada a quantidade de 10% em peso seco de um solo local. O material adicionado consiste em uma argila de alta compressibilidade (CH), já caracterizado anteriormente por Queiroz *et al* (2025), sendo composto por 69% de argila, 10,4% de site e 20,6% de areia. Este acréscimo se justifica, pois, quantidades significativas de solo podem se misturar aos resíduos nos aterros devido a aplicações sucessivas de cobertura diária (Reddy *et al*, 2011) e o peso específico da combinação de resíduos e solo é um parâmetro de relevância para as análises de engenharia.

2.2.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação seguiu as diretrizes da ABNT (2016), com as amostras compactadas à energia normal de Proctor. Para se mensurar a umidade, foram tomadas a cada ponto da curva de compactação seis cápsulas que foram submetidas à secagem em estufa em uma temperatura controlada de 60ºC até que a massa permanecesse constante (Reddy *et al*, 2011).

2.2.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento consolidado não drenado

O ensaio de cisalhamento triaxial consolidado não drenado (CIU) foi montado segundo a norma ASTM D4767 (ASTM, 2008). A umidade do RSMS foi ajustada para o valor de 60% na base seca e as amostras foram compactadas em cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme pode ser observado na Figura 2 (a). Para cada mistura proposta, MO01, MO02 e MO03, três amostras foram consolidadas previamente por 24 horas sob pressões confinantes de 70, 140 e 280 kPa (Figura 2 (b)). Os corpos de prova foram então cisalhados a uma taxa de deformação constante de 2,1 mm/min, medindo-se também a poropressão durante todo o cisalhamento. Na ausência de resposta de pico de cisalhamento, os ensaios foram continuados até atingirem no mínimo 15% de deformação axial, conforme apresentado na Figura 2 (c).

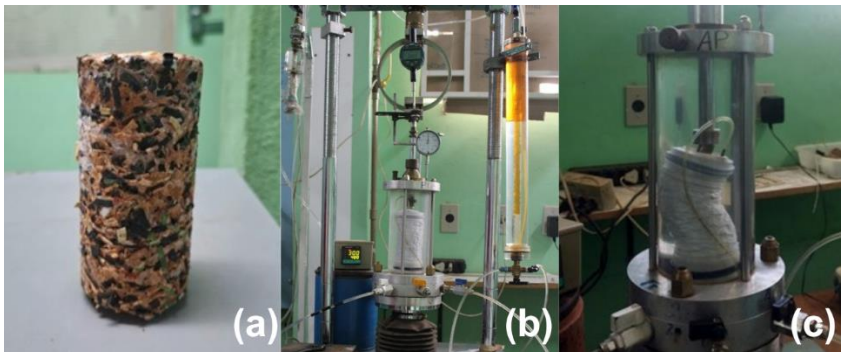


Figura 2 – (a) Corpo de prova de RSMS obtido por compressão estática – Mistura MO01; (b) Corpo de prova na câmara triaxial antes da realização do ensaio CIU; (c) Corpo de prova MO02 ao final do cisalhamento

Foi escolhido o teor de umidade de 60% padronizado à todas as amostras por ser um teor de umidade comumente encontrado nos resíduos *in situ*. A escolha é justificada por, além do fato que na operação do aterro sanitário não ser comum o umedecimento dos RSU para controle da compactação, neste valor de umidade o peso específico seco se encontrava próximo ao peso específico seco máximo. Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, foram determinados com base nas envoltórias de rupturas modificadas definidas em termos de s' e t.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Compactação

Os pesos específicos secos máximos obtidos foram 6,0 kN/m³ (MO01), 5,8 kN/m³ (MO02) e 5,5 kN/m³ (MO03), decrescentes assim como as porcentagens de MOC nos tratamentos. Essa tendência é consistente

com estudos anteriores tanto com RSMS (Sigh e Uchimura, 2023), quanto com RSU reais (Pantic *et al*, 2022) e pode ser atribuída ao aumento das propriedades volumétricas dos materiais plásticos. Isto, pois, o aumento do teor de material plástico deixa a amostra mais leve e, além disso, mesmo após a compactação, o corpo de prova busca recuperar a sua forma elástica, contribuindo também para a diminuição do peso específico.

3.2 Ensaio Triaxial

3.2.1 Comportamento do diagrama tensão x deformação

Em todas as composições gravimétricas testadas, Figura 3, pode ser observado o fenômeno de endurecimento por deformação, ou seja, não ocorreu resistência de pico bem definida, acontecendo inclusive uma tendência ao aumento da tensão desviadora (σd) para maiores deformações.

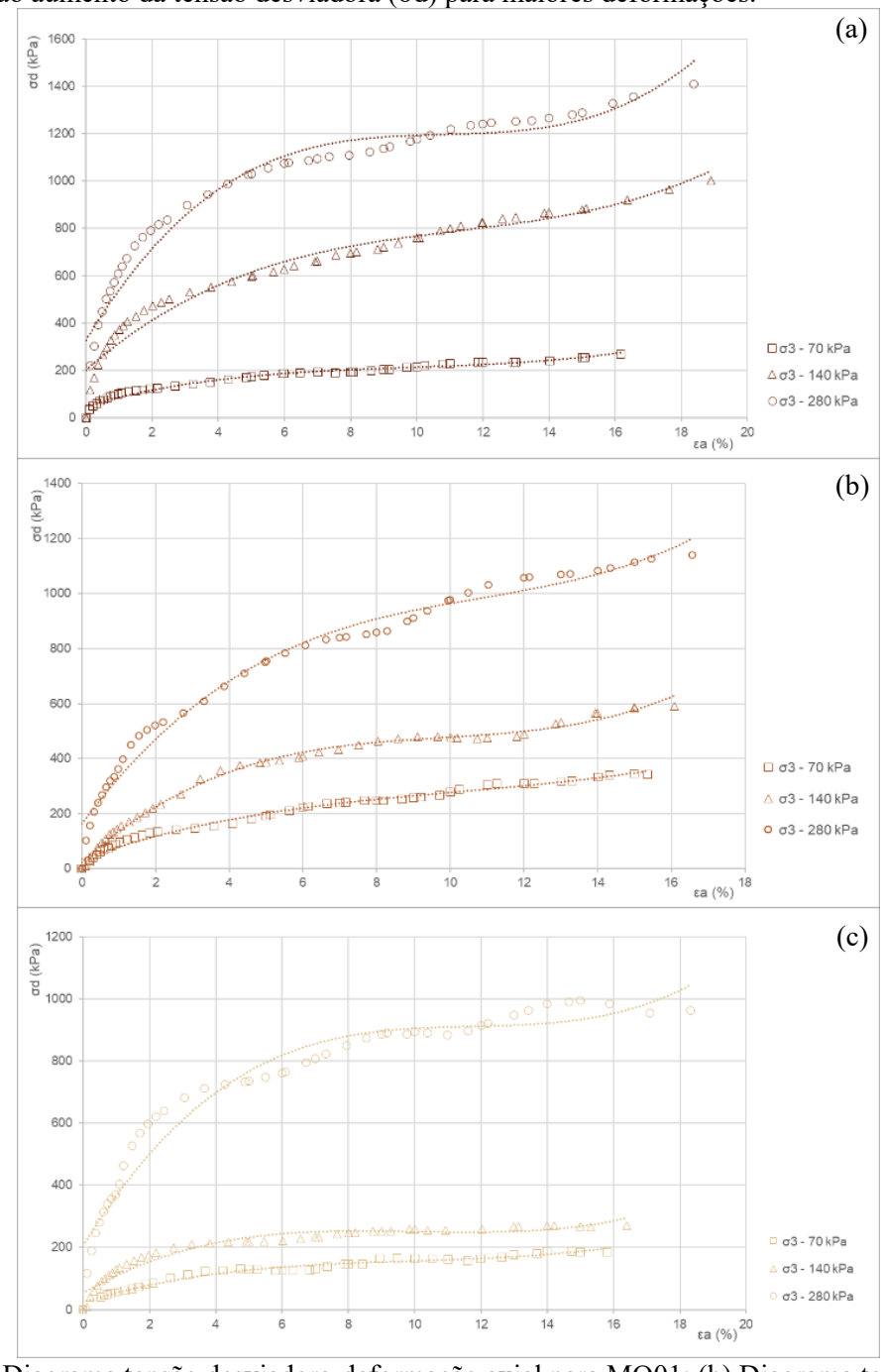


Figura 3 – (a) Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO01; (b) Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO02; (c) Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO03

De acordo com Ramaiah e Ramana (2017), em ensaios triaxiais consolidados não drenados (CIU), a ação de reforço dos materiais fibrosos proporciona suporte lateral ao espécime, impedindo sua liquefação estática. Por tanto, segundo os autores, o aumento do teor de fibras nos RSU torna as características de endurecimento por deformação ainda mais significativas.

As curvas tensão-deformação deste estudo exibiram inicialmente forma convexa, seguida de um comportamento quase linear e, por fim, exibindo curvatura ascendente em deformações maiores, conforme já descrito por Bray *et al* (2009). Embora esse comportamento qualitativo da curva corresponda ao já descrito na literatura para RSU reais, em RSMS esse trabalho será primeiro trabalho relatando esse comportamento, pois nos trabalhos anteriores (Reddy *et al* 2011; Xie *et al* 2022) mesmo não havendo pico de ruptura, não ocorreu a curvatura ascendente em maiores deformações.

3.2.2 Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Foram traçadas envoltórias de resistência para determinar os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, totais e efetivos, dos resíduos sólidos em testes triaxiais não drenados variando de 5% a 15% da deformação axial, Figura 4. Os ângulos de atrito efetivos a 15% de deformação axial variaram de 58º (MO03), 62º (MO02) e 69° (MO01). Os valores de coesão efetiva foram nulos para MO01 e MO03 em todas as pressões confinantes. A mistura MO02 apresentou valores de coesão (máximo de 38,7 kPa a 15% de deformação), aparentemente relacionados à mobilização de fibras.

Trabalhos anteriores indicam que o desenvolvimento de elevados valores de poropressão durante ensaios CIU em RSU podem provocar distorções nas envoltórias efetivas das amostras. Nascimento (2007) observou em ensaios CIU com RSU reais elevados valores de ângulo de atrito efetivo, 57,7º e 66º, e reduzidos valores de coesão efetiva, inclusive com valores negativos, obrigando a serem feitos ajustes que forçassem as envoltórias a passar pela origem dos eixos coordenados. De maneira semelhante, os ensaios CIU de Vilar e Carvalho (2004) também resultaram em coesão nula e ângulos de atrito efetivos na ordem de 48,5º.

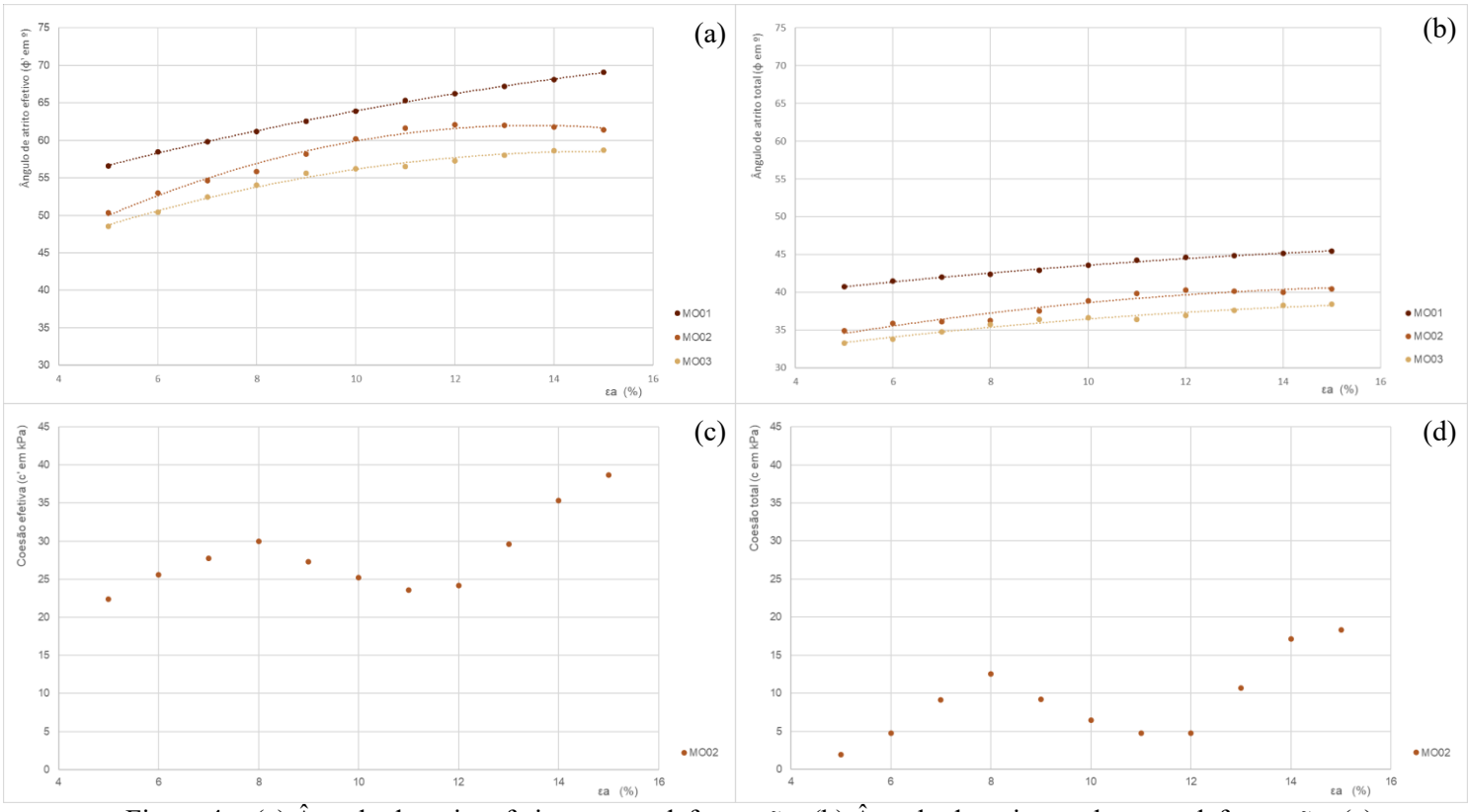


Figura 4 - (a) Ângulo de atrito efetivo versus deformação; (b) Ângulo de atrito total versus deformação; (c) Coesão efetiva versus deformação; (d) Coesão total versus deformação

Comparando o diagrama de tensão x deformação da Figura 3 (b) com a Figura 4 (c) e (d) percebe-se que para MO02 a partir de 12% de deformação, há um aumento da tensão desviadora e também os valores de coesão começam uma tendência crescente. Esse ponto, 12% de deformação da mistura MO02, situa-se provavelmente na transição da Fase I, quando há apenas mobilização das forças de atrito, para a Fase II, marcada pelo aumento da contribuição da parcela de tensão de tração das fibras na resistência, do proposto por Kölsch (1996), ou seja, o momento em que ocorre o aumento da contribuição da parcela de tensão de tração das fibras na resistência.

Já no tratamento MO01, que possui maior teor de matéria orgânica e, por consequência, menor proporção de materiais fibrosos, a coesão teve o valor de 0 kPa. Como também se observa a curvatura ascendente para MO01, Figura 3 (a), aliada a uma mobilização progressiva e crescente do ângulo de atrito sem vistas de atingir o ponto máximo do ajuste proposto, pode-se deduzir a partir do exposto que o ângulo de atrito também é sensível à presença de fibras. Por fim, sobre a mistura MO03, observa-se que ela também possui o valor de 0 kPa para a coesão. Porém, como já tratado por Kölsch (1996), a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento dos resíduos é fruto não apenas da resistência à tração da própria fibra, mas também do ancoramento dela no maciço sanitário.

A importância do ancoramento das fibras no maciço ocorre de tal maneira que, segundo o modelo constitutivo bifásico de Li e Feng (2022), é justamente o escorregamento das fibras o responsável pelo amolecimento de RSU em grandes deformações. Isto posto, embora MO03 seja o tratamento com maior teor de fibras proporcionalmente ao total, é o que possui menor teor de matéria orgânica. Logo, a coesão parece estar ligada não apenas à presença das fibras, mas também à capacidade de elas serem ancoradas no maciço sanitário, o que por sua vez parece ser fruto da presença de matéria orgânica.

4 CONCLUSÕES

A falta de parâmetros e critérios de projeto para as condições dos RSU brasileiros é tanto notável quanto preocupante, uma vez que as correlações empíricas podem colocar em risco a estabilidade dos taludes quando mal empregadas. O uso de RSMS é uma realidade bastante promissora, por permitir contornar vários dos desafios de experimentação como os relacionados à heterogeneidade, à dificuldade de realizar ensaios de grande porte, a grande variação na distribuição do tamanho das partículas e as preocupações sanitárias.

Os resultados deste estudo mostram que as amostras de RSMS possuem comportamento qualitativo em equipamentos geotécnicos convencionais muito semelhante aos RSU quando ensaiados em adaptações dos equipamentos construídos em escala maior. Foi observado ainda que o protocolo de simulação utilizado para constituição do RSMS, com o máximo de representação das frações gravimétricas por materiais equivalentes, aproximou-se mais do comportamento do RSU real do que os protocolos anteriores de RSMS da literatura, que muitas vezes possuem maior adição de solo ao corpo de prova. A variabilidade nas composições gravimétricas revelou impactos sobre as propriedades físicas e mecânicas dos RSMS, especialmente peso específico e parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Todas as composições cisalhadas nos ensaios triaxiais exibiram ausência de resistência de pico e curvas tensão-deformação de curvatura ascendente em grandes deformações. Esse comportamento, predito na literatura para RSU, mas pela primeira vez observado em RSMS, corrobora as evidências da atuação da fração fibrosa na resistência ao cisalhamento e reforça a necessidade de reproduzí-la adequadamente nas simulações com RSMS. Essa representatividade frente às condições reais é um dos indicativos que validam o uso de RSMS como ferramenta experimental no campo de resíduos sólidos urbanos, contando ainda com as vantagens de controle sobre variáveis críticas e adequamento sanitário.

Por isso, sugere-se para pesquisas futuras a realização de ensaios de cisalhamento diretos, além de ensaios triaxiais drenados e ensaios de consolidação para as mesmas condições, com vistas a permitir mais interpretações dos dados de estresse efetivo. Finalmente, sugere-se ainda explorar diferentes variações granulométricas e modos mais mecanizados de produção das frações inorgânicas para padronizar e acelerar o processo de produção do RSMS.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020. 52 p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 01 mar. 2026.

BRAY, Jonathan D. et al. Shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.

KOLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. **5th International Landfill Symposium - Sardinia 95**, Cagliari, Itália, p. 711-729, 1996.

LI, An-Zheng; FENG, Shi-Jin. A double-phase constitutive model for municipal solid waste with a fiber pullout criterion to evaluate the softening behavior. **Computers and Geotechnics**, v. 150, p. 104901, 2022.

NASCIMENTO, Júlio César Fialho do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

QUEIROZ, B.P., NASCENTES, R., FERRAZ, R.L. et al. Hydraulic conductivity of compressible clayey soil stabilized with kraft black liquor and composite cement. **Environ Earth Sci** 84, 479 (2025).

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. **Waste Management**, v. 63, p. 366-379, 2017.

REDDY, Krishna R. et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste management**, v. 31, n. 11, p. 2275-2286, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.002.

SINGH, Vidit; UCHIMURA, Taro. Effect of material composition on geotechnical properties—Study on synthetic municipal solid waste. **Geotechnics**, v. 3, n. 2, p. 397-415, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/geotechnics3020023.

SOARES, Nathália Delage. **Resistência dos resíduos sólidos urbanos em função do nível de compactação e presença de plásticos moles**. Orientadora: Profa. Dra. Rejane Nascentes. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. 137 p. 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2024). **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939 DOI: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939.

VILAR, Orencio M.; CARVALHOD, MdeF. Mechanical properties of municipal solid waste. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 6, p. 438-449, 2004.

XIE, Yuekai et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid wastes with different compositions under leachate exposure. **Waste Management**, v. 149, p. 207-217, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.020.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/117

Revisão da literatura sobre o uso de modelagem computacional na análise de estabilidade de aterros sanitários

Karolyne dos Santos Balbino Cordeiro
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, karolyne.santos@estudante.ufjf.br

Igor Gordiano Fernandes Heleno
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil,
igorgordiano.fernandes@estudante.ufjf.br

Jonathan do Amaral Braz
Discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Cátia de Paula Martins
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

RESUMO: Os aterros sanitários constituem estruturas relativamente recentes em comparação às obras geotécnicas convencionais e passaram a ocupar papel central na gestão de resíduos após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que os define como forma ambientalmente adequada de disposição final. Diferentemente de barragens e fundações, apresentam comportamento dinâmico e evolutivo, sofrendo transformações contínuas desde a operação até o pós-encerramento, com alterações nas propriedades físicas e químicas decorrentes da biodegradação, recalques e variações de umidade e poropressão. A infiltração hídrica favorece a geração de lixiviado, modifica as pressões neutras e influencia diretamente a resistência e o estado de tensões do maciço, evidenciando a importância da análise integrada entre fluxo e estabilidade. Nesse contexto, como etapa metodológica para fundamentar os resultados e a discussão deste artigo, realizou-se uma revisão de artigos publicados entre 2020 e 2025 no Portal de Periódicos da CAPES, com foco no uso de modelagem computacional em estudos relacionados à estabilidade de aterros sanitários. A análise evidenciou três linhas predominantes: modelagens exclusivamente hidráulicas, análises acopladas fluxo–estabilidade e abordagens essencialmente mecânicas. Do total examinado, dois estudos dedicaram-se apenas à modelagem hidráulica, quatro adotaram estratégias acopladas e dois priorizaram avaliações mecânicas. Apesar da recorrência de abordagens acopladas, observa-se a necessidade de maior integração entre ferramentas como SEEP/W e SLOPE/W, a fim de proporcionar análises mais robustas e representativas do comportamento hidro-mecânico dessas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários, Estabilidade de taludes, Fator de segurança, Modelagem computacional.

ABSTRACT: Sanitary landfills are relatively recent structures when compared to conventional geotechnical works and have assumed a central role in waste management following the enactment of the Política Nacional de Resíduos Sólidos (Law No. 12,305/2010), which defines them as an environmentally appropriate method for final disposal. Unlike dams and foundations, landfills exhibit a dynamic and evolving behavior, undergoing continuous transformations from operation through post-closure, with changes in physical and chemical properties resulting from biodegradation processes, settlements, and variations in moisture content and pore pressure. Water infiltration promotes leachate generation, alters pore-water pressures, and directly affects shear strength and the stress state of the waste mass, thereby highlighting the importance of integrated analyses that

couple flow and stability. Within this context, as a methodological step to support the results and discussion presented in this paper, a review of articles published between 2020 and 2025 was conducted using the CAPES Periodicals Portal, focusing on the application of computational modeling in studies addressing landfill stability. The analysis identified three predominant approaches: exclusively hydraulic modeling, coupled flow–stability analyses, and primarily mechanical assessments. Of the studies reviewed, two were devoted solely to hydraulic modeling, four adopted coupled strategies, and two emphasized mechanical evaluations. Despite the recurrent use of coupled approaches, there remains a need for greater integration between tools such as SEEP/W and SLOPE/W in order to provide more robust and representative analyses of the hydro-mechanical behavior of these structures.

KEYWORDS: Sanitary landfills, Slope stability, Factor of safety, Computational modeling.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da urbanização aliado ao crescimento demográfico tem resultado em um aumento expressivo na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), configurando-se como um dos principais entraves ao saneamento ambiental no Brasil (Santos, 2008). Esse cenário está diretamente relacionado não apenas à expansão populacional, mas também à intensificação do consumo, ao aumento do poder aquisitivo e à incorporação constante de novas tecnologias ao cotidiano da sociedade (Silva *et al*., 2020).

Conforme a Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (2011), no contexto nacional, a ocupação urbana muitas vezes ocorre de forma acelerada e sem o acompanhamento proporcional de sistemas estruturados e eficientes de coleta, tratamento e destinação final de resíduos. Como reflexo dessa dinâmica, a gestão tende a concentrar esforços predominantemente na etapa de disposição final, ampliando a demanda por soluções tecnicamente adequadas (ABLP, 2011).

Em resposta a esse cenário, a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei Federal nº 12.305/2010, configurou um importante avanço no âmbito regulatório ao estabelecer o aterro sanitário como a modalidade ambientalmente adequada para a disposição final de rejeitos, devendo ser executado de forma a não gerar riscos à saúde pública nem causar danos ao meio ambiente. A referida legislação também definiu princípios, diretrizes e metas voltadas à eliminação progressiva dos lixões e aterros controlados. Posteriormente, o novo marco legal do saneamento, instituído pela Lei nº 14.026/2020, atualizou os prazos para o encerramento dessas estruturas irregulares. A partir dessas diretrizes normativas, observou-se a ampliação da implantação de aterros sanitários no país, ao mesmo tempo em que se tornou evidente a necessidade de constante aperfeiçoamento técnico dessas estruturas, visando assegurar maior eficiência operacional, segurança ambiental e conformidade com os requisitos normativos.

De acordo com Norberto *et al*. (2020), os aterros sanitários configuram-se como obras geotécnicas de elevada complexidade e com particularidades que as diferenciam das estruturas convencionais. Os maciços de resíduos apresentam elevada heterogeneidade e comportamento mecânico não linear, sofrendo modificações progressivas desde a fase inicial de disposição até o período pós-encerramento. Ao longo desse processo, ocorrem alterações substanciais nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, decorrentes da biodegradação, dos recalques diferenciais e das variações de umidade e poropressões internas. Essas transformações influenciam diretamente o comportamento resistente do maciço, podendo comprometer as condições de estabilidade dos taludes e a segurança global da estrutura.

Diante dessa problemática, o uso de ferramentas de modelagem numérica e computacional, como os softwares SEEP/W e SLOPE/W, torna-se essencial para a análise dos fenômenos de fluxo e estabilidade. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a aplicação combinada dessas aplicações, destacando os avanços, limitações e oportunidades na área da geotecnia ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Heterogeneidades dos resíduos sólidos urbanos

Os aterros sanitários constituem sistemas formados pela deposição sucessiva de resíduos com distintas origens, granulometrias, composições e estágios de degradação, o que lhes confere elevada heterogeneidade e

significativa variabilidade espacial das propriedades físicas e mecânicas (Norberto *et al*., 2020). A estratificação resultante da disposição em camadas sucessivas gera contrastes locais de densidade, teor de umidade e grau de decomposição, condicionando um comportamento mecânico intrinsecamente não uniforme do maciço. Ademais, a presença de fração orgânica acentua o caráter evolutivo do sistema, pois os processos de biodegradação promovem recalques diferenciais, geração de lixiviado e biogás e alterações graduais nas propriedades geotécnicas ao longo do tempo (Zhan *et al*., 2017)

As estruturas de aterros sanitários apresentam elevada complexidade devido à interação simultânea entre as fases sólida, líquida e gasosa dos resíduos. Além disso, envolvem a atuação conjunta dos solos de cobertura, camadas drenantes, sistemas de impermeabilização e dispositivos de contenção. Essa interação integrada influencia diretamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, as condições de drenagem interna e os processos de geração e dissipação de poropressões (Benvenuto; Cipriano, 2010). Dessa forma, a estabilidade global do aterro não está condicionada exclusivamente à sua configuração geométrica, mas também às condições hidráulicas vigentes e às práticas operacionais adotadas ao longo de sua vida útil.

2.2 Influência da água na estabilidade dos aterros

A água exerce papel determinante na estabilidade de aterros sanitários, atuando tanto por meio da infiltração pluvial quanto pela própria geração interna de lixiviados decorrente da degradação dos resíduos orgânicos. A elevação do teor de umidade no interior do maciço tende a aumentar as poropressões e reduzir as tensões efetivas, impactando diretamente a resistência ao cisalhamento dos resíduos (Yang; Xu; Chai, 2020).

A interação entre água, resíduos e sistemas de drenagem demanda avaliação integrada e contínua, uma vez que a eficiência da coleta de lixiviados e do controle das águas superficiais está diretamente associada à manutenção da estabilidade global. Situações de drenagem deficiente, obstruções ou eventos climáticos intensos podem induzir estados críticos, alterando significativamente os fatores de segurança (Yang; Xu; Chai, 2020).

Yang, Xu e Chai (2020) destacam ainda que a representação adequada das condições de infiltração e das propriedades hidráulicas do maciço é determinante para a correta simulação do comportamento do lixiviado. Sob a perspectiva da modelagem computacional, a correta representação da influência da água é elemento central nas análises numéricas de estabilidade. A definição de condições de contorno hidráulicas, níveis de lixiviado e coeficientes de permeabilidade condicionam diretamente os resultados obtidos em termos de tensões efetivas e fatores de segurança. Dessa forma, a inserção criteriosa de dados hidrológicos e operacionais nos modelos computacionais contribui para a redução de incertezas, favorece representações mais próximas da realidade e possibilita avaliações mais confiáveis ao longo das diferentes etapas de operação e pós-encerramento dos aterros sanitários.

2.3 Modelagem numérica do fluxo e da estabilidade

De acordo com o estudo de Meye *et al.* (2022), a modelagem numérica do fluxo e da estabilidade em aterros sanitários está inserida em um cenário de alta complexidade, marcado pela heterogeneidade dos resíduos, pela variabilidade espacial e temporal das propriedades e pela influência constante de fatores ambientais. Ainda segundo o autor, a natureza evolutiva do maciço, decorrente da degradação de matéria orgânica, da geração de lixiviados e dos alteamentos sucessivos, impõe desafios adicionais à representação computacional.

No que se refere à análises de estabilidade, é pontuado no trabalho de Gomes (2019) que métodos de equilíbrio limite continuam amplamente empregados na prática geotécnica, permitindo estimar o fator de segurança a partir da relação entre esforços resistentes e solicitantes ao longo de superfícies potenciais de ruptura. A resistência ao cisalhamento é usualmente representada por critérios como o de Mohr-Coulomb, com parâmetros obtidos a partir de ensaios ou valores médios equivalentes, considerando a dificuldade de caracterização detalhada dos resíduos. Embora tais métodos não reproduzam explicitamente o campo de deformações, constituem ferramentas objetivas e consolidadas para verificação da segurança de taludes e seções críticas do aterro.

Por outro lado, abordagens baseadas no Método dos Elementos Finitos permitem uma análise mais abrangente, ao resolver de forma acoplada as equações de fluxo e de equilíbrio mecânico. Essa técnica possibilita acompanhar a redistribuição de tensões, a evolução das poropressões e a concentração de deformações ao longo do tempo, além de incorporar a heterogeneidade espacial do maciço. Ademais, favorece a realização de análises paramétricas e de sensibilidade, particularmente relevantes diante das incertezas associadas às propriedades dos resíduos (Meye *et al*., 2022).

Por fim, diferentes ferramentas computacionais podem ser citadas como exemplos de aplicação nas análises hidráulicas e de estabilidade em estudos geotécnicos. Programas baseados no Método dos Elementos Finitos, como o SEEP/W e o ABAQUS, são utilizados para simulações de fluxo em meios porosos, permitindo análises em regime permanente e transiente, tanto em condições saturadas quanto não saturadas. Para análises de estabilidade de taludes, utilizam-se softwares fundamentados no Método do Equilíbrio Limite, como o SLOPE/W, que possibilita a determinação do Fator de Segurança a partir da geometria, das pressões neutras e dos parâmetros de resistência do material. Além disso, modelos hidrológicos como o HELP podem ser empregados para estimar o balanço hídrico e a geração de percolado em aterros sanitários. Dessa forma, diferentes ferramentas computacionais podem ser citadas como exemplos de aplicação nas análises hidráulicas e de estabilidade em estudos geotécnicos (Baldodano-Goulding; Poveda-Montoya, 2024; Park; Kim; Kang, 2021; Wang, 2021; Yang; Xu; Chai, 2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se em uma revisão da literatura, envolvendo etapas de busca, seleção, leitura crítica e organização dos artigos científicos conforme critérios de relevância temática, atualidade e aderência ao objetivo do estudo. As pesquisas foram realizadas no Portal de Periódicos da CAPES, contemplando publicações no período de 2020 a 2025, recorte temporal definido com o propósito de reunir estudos recentes que evidenciam avanços na modelagem numérica aplicada a aterros sanitários. Destaca-se que foram considerados artigos publicados nos idiomas português e inglês, visando ampliar o escopo da revisão e contemplar tanto a produção científica nacional quanto internacional.

A estratégia de busca utilizou combinações booleanas de palavras-chave em inglês, estruturadas da seguinte forma: ("landfill" OR "solid waste" OR "MSW") AND ("seepage" OR "rainfall" OR "infiltration") AND ("stability analysis" OR "slope stability"). Foram excluídos estudos com acesso restrito e aqueles que não abordavam aterros sanitários ou estruturas análogas como objeto de investigação.

4 RESULTADOS

Os estudos foram organizados conforme o tipo de abordagem analítica, considerando o nível de integração entre os fenômenos hidráulicos e mecânicos nas modelagens numéricas (Tabela 1). Assim, foram classificados em três grupos: (i) modelagens hidráulicas isoladas, voltadas exclusivamente à simulação de escoamento e infiltração, sem cálculo do fator de segurança; (ii) análises acopladas fluxo–estabilidade, nas quais as poropressões obtidas na modelagem hidráulica são incorporadas à análise geotécnica; e (iii) avaliações predominantemente mecânicas, centradas na estabilidade ou no desempenho estrutural, com consideração simplificada do regime de fluxo ou inexistente.

Tabela 1. Classificação dos estudos segundo a abordagem de modelagem numérica e os softwares empregados (Autores, 2026).

Grupos	Artigos Pesquisados	Software
Modelagens hidráulicas isoladas	Yang, Xu e Chai (2020)	ABAQUS 6.14
	Baltodano-Goulding e Poveda-Montoya (2024)	HELP v4.0
Análises acopladas fluxo–estabilidade	Meye et al. (2022)	Não especificado
	Park, Kim e Kang (2021)	SEEP/W + SLOPE/W
	Gao, Zhu e Zhang (2022)	Não especificado
	Zhang et al. (2025)	Não especificado

Grupos	Artigos Pesquisados	Software
Avaliações predominantemente mecânicas	Budihardjo et al. (2021) Wang (2021)	Não especificado SLOPE/W

4.1 Modelagens hidráulicas isoladas

O estudo desenvolvido por Yang, Xu e Chai (2020) analisou, por meio de modelagem tridimensional, o escoamento de lixiviado em um aterro sanitário real localizado em Xi'an, empregando o software ABAQUS 6.14 com sub-rotinas definidas pelo usuário para representar a heterogeneidade hidráulica do maciço. A simulação foi conduzida com enfoque transiente da infiltração sob diferentes cenários de precipitação intensa. Consideraram-se variações de condutividade hidráulica e densidade ao longo da profundidade, possibilitando avaliar a formação de níveis suspensos de lixiviado e a evolução das poropressões.

Baltodano-Goulding e Poveda-Montoya (2024) realizaram uma análise de balanço hídrico aplicada ao Aterro Miramar, na Costa Rica, utilizando o software HELP v4.0 (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance). A metodologia consistiu na simulação dos principais componentes do ciclo hidrológico como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração, com a finalidade de estimar a geração de lixiviado ao longo do tempo. Foram empregados dados climáticos locais, características geométricas do aterro, condições de drenagem e propriedades hidráulicas dos materiais determinadas por ensaios laboratoriais, incluindo a curva característica solo–água para representação do comportamento não saturado. As estimativas obtidas por diferentes metodologias foram comparadas com dados de campo, sendo o modelo HELP V 4.0 o que apresentou melhor concordância com as medições observadas.

4.2 Análises acopladas fluxo–estabilidade

O estudo de Meye *et al.* (2022) envolveu modelagem numérica integrada do campo de percolação e da estabilidade de taludes, considerando explicitamente a heterogeneidade dos resíduos. A análise foi realizada por elementos finitos em duas e três dimensões, com implementação de sub-rotinas para representar variações espaciais de permeabilidade, peso específico e resistência ao cisalhamento. O regime hidráulico saturado e não saturado foi modelado de forma transiente, incluindo cenários de colmatação do sistema de drenagem. A estabilidade foi avaliada pelo método de redução de resistência, permitindo a obtenção direta do fator de segurança no próprio modelo numérico.

A análise de Park, Kim e Kang (2021) foi conduzida com utilização sequencial dos módulos SEEP/W e SLOPE/W. Inicialmente, o SEEP/W foi empregado para simular o fluxo não saturado sob eventos de precipitação intensa, considerando a curva característica solo–água (SWCC) e condições transientes; posteriormente, as poropressões obtidas foram transferidas ao SLOPE/W para cálculo do fator de segurança pelo método de Bishop. O diferencial do trabalho consiste na incorporação experimental do reforço radicular à coesão do solo de cobertura, integrando ensaios laboratoriais à modelagem numérica.

Ademais, o estudo de Gao, Zhu e Zhang (2022) propõe um método analítico para avaliar a estabilidade de coberturas com barreira capilar inclinadas sob infiltração de chuva. A abordagem combina o modelo de infiltração de Green–Ampt com o método de equilíbrio limite de Janbu, considerando a evolução da frente de umedecimento, a redistribuição lateral da água e a atuação das forças de percolação na camada de solo fino. O fator de segurança é obtido por procedimento iterativo, assumindo a frente de umedecimento como superfície potencial de ruptura. Os resultados indicam que a saturação progressiva da camada superior reduz significativamente a estabilidade.

Por fim, o estudo de Zhang *et al.* (2025) analisou o comportamento mecânico de compósitos solo–raiz aplicados à estabilização de taludes constituídos por resíduos de construção e demolição, combinando investigação experimental e modelagem numérica por elementos finitos. Inicialmente, foram realizados ensaios de tração em raízes de azevém e ensaios de cisalhamento direto em compósitos solo–raiz sob diferentes teores de umidade e proporções de reforço radicular, permitindo a quantificação dos parâmetros de resistência e a avaliação do incremento de coesão promovido pelas raízes. Na etapa numérica, foi implementada uma análise bidimensional de infiltração transiente baseada na equação de Richards para meios não saturados, com incorporação da curva característica solo–água pelo modelo de Van Genuchten. A estabilidade foi avaliada no próprio modelo em elementos finitos, com determinação do fator de segurança, análise de plastificação e

monitoramento dos deslocamentos e da evolução da saturação. Os resultados evidenciaram que o reforço radicular reduz deslocamentos, limita a progressão de zonas plásticas e eleva o fator de segurança mesmo sob chuva prolongada.

4.3 Avaliações predominantemente mecânicas

O estudo de Budihardjo *et al.* (2021) investigou o desempenho hidráulico e mecânico de misturas de cinza volante e bentonita (FAB) aplicadas como material de revestimento (liner) em sistemas de contenção de aterros sanitários. Foram realizados ensaios laboratoriais, incluindo cisalhamento direto, permeabilidade e determinação de propriedades físicas, com diferentes teores de bentonita, a fim de avaliar a influência da composição na resistência ao cisalhamento e na estabilidade do material. Os resultados indicaram que o aumento do teor de bentonita promove acréscimo da coesão e da resistência ao cisalhamento, ainda que a exposição a soluções salinas possa reduzir parcialmente esse ganho. A análise numérica foi conduzida no SLOPE/W para estimativa do fator de segurança, evidenciando desempenho satisfatório para determinadas proporções da mistura. O fluxo não foi modelado de forma transiente ou acoplada, concentrando-se o estudo na melhoria das propriedades mecânicas e na viabilidade do material como alternativa de baixo custo para liners.

De forma semelhante, Wang (2021) realizou a análise de estabilidade de uma barragem de contenção de resíduos sólidos, componente integrante de um aterro sanitário, que apresentava indícios de recalque excessivo e risco potencial de instabilidade. Após investigação de campo e execução de ensaios geotécnicos, os parâmetros obtidos subsidiaram simulações numéricas no software SLOPE/W, com determinação do fator de segurança da estrutura. Os resultados indicaram que a condição existente não atendia plenamente aos critérios normativos, justificando a proposição de medidas corretivas, como reforço estrutural e intervenções para mitigação de danos por percolação e fissuração.

5 DISCUSSÕES

A análise sistemática dos estudos selecionados evidenciou aspectos metodológicos relevantes, com implicações diretas para a robustez, a reprodutibilidade e o avanço das investigações em geotecnia ambiental. Inicialmente, destaca-se a ausência de especificação dos softwares empregados em metade dos trabalhos analisados (4 de 8 artigos), o que configura uma limitação significativa sob a perspectiva científica. A não explicitação das ferramentas computacionais utilizadas compromete a transparência metodológica, dificulta a replicabilidade dos modelos numéricos e restringe a possibilidade de comparação crítica entre diferentes abordagens, considerando que distintos programas podem adotar formulações constitutivas, esquemas de discretização e algoritmos de solução específicos.

Outro resultado relevante refere-se à expectativa de predominância da integração sequencial entre modelagem hidráulica e análise de estabilidade, particularmente por meio da combinação SEEP/W e SLOPE/W. Tal associação é amplamente reconhecida na literatura técnica por possibilitar a incorporação consistente das poropressões obtidas na simulação de fluxo à determinação do fator de segurança. Entretanto, verificou-se que apenas 1 dos 8 estudos analisados adotaram explicitamente essa estratégia integrada, evidenciando que, apesar de sua reconhecida fundamentação teórica e aplicabilidade prática, essa abordagem ainda não se consolidou como prática dominante no conjunto amostral considerado.

No que se refere à distribuição metodológica, observou-se que 2 estudos se concentraram exclusivamente em modelagens hidráulicas, 4 adotaram análises acopladas fluxo–estabilidade e 2 privilegiaram avaliações predominantemente mecânicas. A maior incidência de análises acopladas reforça o reconhecimento da natureza intrinsecamente hidromecânica dos problemas geotécnicos, sobretudo em contextos envolvendo infiltração, variações de poropressão e possíveis reduções da resistência ao cisalhamento. Ainda assim, a presença significativa de abordagens isoladas indica que simplificações persistem, seja pela dissociação entre fluxo e estabilidade, seja pela consideração simplificada do regime hidráulico.

Entre os avanços observados, destaca-se a adoção de modelagens tridimensionais por elementos finitos com representação da heterogeneidade hidráulica e da variabilidade espacial dos parâmetros, bem como o uso sistemático de curvas característica solo–água (SWCC) e de modelos constitutivos, como o de Van Genuchten,

para descrever o comportamento não saturado com maior rigor. Também se verifica a incorporação experimental do reforço radicular em modelos numéricos e a determinação do fator de segurança diretamente no domínio computacional,por meio de técnicas como a redução progressiva dos parâmetros de resistência ao cisalhamento no método dos elementos finitos, reduzindo a dependência exclusiva de procedimentos simplificados baseados no equilíbrio limite. Esses avanços elevam a fidelidade física das simulações e permitem analisar, com maior consistência, fenômenos como a formação de níveis suspensos de lixiviado, a evolução de zonas plásticas e a influência de eventos pluviométricos extremos na estabilidade do maciço, consolidando uma tendência de maior integração hidromecânica nas análises.

6 CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou que a modelagem numérica aplicada à análise de estabilidade de aterros sanitários tem avançado de forma significativa nos últimos anos, especialmente no que se refere à incorporação de abordagens hidromecânicas mais integradas e ao uso de técnicas baseadas no Método dos Elementos Finitos. Entretanto, os resultados também revelam limitações metodológicas importantes, destacando-se a ausência de especificação dos softwares utilizados em parte expressiva dos estudos, fator que compromete a reprodutibilidade científica e dificulta a consolidação comparativa do conhecimento produzido. Observou-se que, embora as análises acopladas fluxo–estabilidade representem o grupo mais frequente entre os trabalhos examinados, a utilização explícita e sequencial dos módulos SEEP/W e SLOPE/W ainda é restrita.

Os avanços identificados como a modelagem tridimensional, o uso de curvas característica solo–água, a incorporação de modelos constitutivos mais representativos e a determinação direta do fator de segurança em campo numérico apontam para uma tendência de maior fidelidade física das simulações. Tais progressos ampliam a capacidade preditiva das análises, permitindo investigar cenários críticos associados a eventos pluviométricos extremos, falhas de drenagem e evolução de poropressões ao longo da vida útil do aterro.

Por fim, ressalta-se que o recorte temporal e a limitação a uma única base de dados indicam a necessidade de ampliação futura da revisão, incluindo períodos mais extensos e outras bases indexadoras, a fim de consolidar um panorama mais abrangente das tendências contemporâneas. Nesse contexto, reforça-se o potencial do uso integrado de SEEP/W e SLOPE/W como alternativa promissora para análises mais consistentes, contribuindo para o aprimoramento técnico da geotecnia ambiental e para a segurança operacional dos aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFJF pela concessão da bolsa de iniciação científica BIC/UFJF, vinculada ao projeto de pesquisa intitulado “Estudo da influência de eventos climáticos extremos na estabilidade de aterros sanitários”, coordenado pela autora Júlia Righi de Almeida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP (2011). *Revista Limpeza Pública*. São Paulo, n. 77, 2º trimestre de 2011. ISSN 1806-0390.

Baldodano-Goulding, R.; Poveda-Montoya, A. (2024) *Water balance estimation for an ordinary solid waste sanitary landfill in Costa Rica. Waste Management*, v. 34, n. 10, p. 1828–1838. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.05.008.

Benvenuto, C.; Cipriano, M. A. (2010) Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitários, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil. *Revista Limpeza Pública*, São Paulo, n. 74, p. 42–47, 2010.

Brasil (2010). Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos [...]. Brasília.

Brasil (2020). Lei no 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento [...]. Brasília.

Budihardjo, M. A.; Syafrudin, S. ; Priyambada, I. B.; Ramadan, B. S. (2021) . *Hydraulic stability of fly ash-bentonite mixtures in landfill containment system*. E3S Web of Conferences, v. 148, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202014801003.

Gao, C.; Zhu, Y.; Zhang, Y. (2022) *Stability analysis of the inclined capillary barrier covers under rainfall condition*. Buildings, Basel, v. 12, n. 3, 2022. DOI: 10.3390/buildings12030347.

GOMES, T. B. S (2019) *Modelagem e caracterização geotécnica do solo da barragem do Assentamento Olivencia localizada no município de Quixadá/CE*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, Russas, 89p.

Meye, S. M.; Li, G.; Shen, Z.; Gan, L.; Xu, L. (2022) *Research on seepage field and slope stability considering heterogeneous characteristics of waste piles: a less costly way to reduce high leachate levels and avoid accidents.* Sustainability, v. 14.

Norberto, A. S.; Corrêa, C. L.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2020) Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 1, p. 108–116.

Park, J.; Kim, I.; Kang, J. K. (2021) *Root reinforcement effect on cover slopes of solid waste landfill in soil bioengineering*. Sustainability, v. 13, n. 3. DOI: 10.3390/su13031101.

Santos, T. F. L. (2008) *Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói – RJ*. Dissertação de Mestrado em Saneamento Ambiental: controle da poluição urbana e industrial), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Silva, C. S. S.; Boll, N.; Zanin, G. B.; Peretti, G.; Souza, D. S. (2020) Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 41, p. 125–138, ed. Especial.

Wang, X. (2021) *Stability analysis and repair of a garbage dam*. Natural Hazards, v. 45, n. 3, p. 375–385. DOI: 10.1007/s11069-007-9175-3.

Yang, R.; Xu, Z.; Chai, J. (2020) Numerical analysis of three-dimensional infiltration in a municipal solid waste landfill under rainfall. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 29, n. 2, p. 1953–1963. DOI: 10.15244/pjoes/110044.

Zhan, L. T.; Xu, H.; Chen, Y.; Lü, F.; Lan, J.; Shao, L.; Lin, W. (2017) *Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment*. Waste Management, v. 63, p. 27–40.

Zhang, Z.; Tian, A.; Zhou, Y.; Ding, C.; Tang, Q. (2025) Ryegrass root-soil composites mechanical properties and its slope stability: experimental study and numerical analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 75, n. 2, p. 164–179. DOI: 10.1080/10962247.2024.2436531.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/118

Revisão Sistemática do Reaproveitamento de Resíduos de Mineração de Ferro para Aplicação em Pavimentação

Gabrieli Guterres de Jesus
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, gguterresdejesus@gmail.com

Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rinaldo@ufsm.br

Larissa De Brum Passini
Professora, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, larrisa.passini@ufsm.br

RESUMO: A produção brasileira de minério de ferro gera grandes volumes de rejeitos, cujo manejo inadequado pode causar impactos ambientais, sociais e econômicos significativos. Nesse contexto, o reaproveitamento desses materiais em pavimentação apresenta-se como alternativa sustentável. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da utilização dos rejeitos de minério de ferro em pavimentação. A metodologia consistiu na busca de publicações nas bases de dados Scopus, Scielo e BDTD, com aplicação de critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Os estudos selecionados foram analisados quanto ao tipo de rejeito, forma de aplicação, ensaios realizados e principais resultados obtidos. Observou-se predominância de pesquisas com rejeitos finos e em misturas com outros materiais, especialmente solos e cimento. A maioria dos trabalhos concentra-se na aplicação em camadas estruturais, com maior incidência de ensaios físicos e mecânicos. Conclui-se que, embora o desempenho técnico seja amplamente investigado, há menor enfoque nos aspectos ambientais da aplicação. Ainda assim, o reaproveitamento demonstra potencial para reduzir impactos ambientais e o consumo de agregados naturais, configurando-se como alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora.

PALAVRAS-CHAVE: Minério de Ferro, Rejeito de Mineração, Sustentabilidade, Reutilização, Pavimento.

ABSTRACT: Brazilian iron ore production generates large volumes of tailings, whose inadequate management may cause significant environmental, social, and economic impacts. In this context, the reuse of these materials in pavement applications presents itself as a sustainable alternative. This study aims to conduct a systematic literature review on the use of iron ore tailings in pavement construction. The methodology consisted of searching for publications in the Scopus, Scielo, and BDTD databases, applying previously defined inclusion and exclusion criteria. The selected studies were analyzed regarding the type of tailings, application method, tests performed, and main results obtained. A predominance of studies involving fine tailings and mixtures with other materials, especially soils and cement, was observed. Most studies focus on applications in structural pavement layers, with a higher incidence of physical and mechanical tests. It is concluded that, although technical performance has been widely investigated, less emphasis has been given to the environmental aspects of the application. Nevertheless, the reuse of these materials demonstrates potential to reduce environmental impacts and the consumption of natural aggregates, representing a technically feasible and environmentally promising alternative.

KEYWORDS: Iron Ore, Mining Tailings, Sustainability, Reutilization, Pavement.

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2024, o Brasil beneficiou 278,4 milhões de toneladas de minério de ferro, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (Brasil, 2025), sendo este o mineral mais explorado, o que evidencia a importância econômica do setor mineral. O crescimento da atividade mineradora está diretamente associado à

geração de grandes volumes de rejeitos. Conforme apresentado por Carmignano *et al*. (2021), a porcentagem de rejeitos gerados pode variar entre 20% e 40% de material beneficiado, dependendo de características do minério e dos processos de beneficiamento adotados.

Tradicionalmente, os rejeitos de mineração têm como destino final a disposição em barragens. Contudo, a ocorrência de rompimentos de barragens de rejeitos em Mariana e Brumadinho, no Brasil, acentuou a necessidade de alternativas mais seguras para a destinação desses materiais. Nesse contexto, surgiram diversos estudos voltados à reutilização dos rejeitos de mineração para diferentes finalidades, entre as quais se destaca a aplicação em pavimentação.

Com o objetivo de minimizar os riscos e impactos ambientais associados às formas convencionais de disposição, o reaproveitamento apresenta-se como uma alternativa promissora. Entretanto, conforme destacado por Dantas (2019), a complexidade do comportamento geotécnico dos rejeitos evidencia a importância de sua adequada caracterização. Além disso, o aumento contínuo da geração desses materiais intensifica as preocupações ambientais, reforçando a necessidade de soluções técnicas que viabilizem sua reutilização de forma segura.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura, abrangendo o período de 2015 a 2025, com foco em estudos que avaliem a aplicação de rejeitos de minério de ferro em pavimentação. A pesquisa busca identificar as principais formas de incorporação desses materiais, os ensaios laboratoriais empregados para sua caracterização e os critérios utilizados na avaliação de desempenho. Apesar do número crescente de estudos, ainda não há uma sistematização consolidada das principais abordgens metodológicas e dos critérios de avaliação empregados. Pretende-se analisar as tendências de aplicação e as lacunas existentes na literatura fornecendo subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo adota como procedimento metodológico a revisão sistemática da literatura, a qual consiste na busca, seleção e análise de produções científicas relacionadas com o tema investigado. Para a realização da pesquisa foram utilizadas as bases de dados Scopus, SciELO e BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações) delimitando-se o período entre 2015 e 2025.

A busca foi realizada por meio da utilização e combinação de palavras-chave específicas em cada base de dados, conforme apresentado na Tabela 1, na qual também se encontram as quantidades de resultados obtidos. Após essa etapa, foi realizada a triagem dos estudos com base em critérios de inclusão e exclusão, previamente definidos.

Tabela 1. Procedimento de busca nas base de dados.

Bases de dados	**Palavras-chave e Combinações**	**Quantidade de resultados obtidos**
Scopus	iron ore tailings + pavement	170
	mining waste + iron ore + pavement	233
Scielo	iron ore tailings	53
BDTD	rejeito de minério de ferro + pavimento	12

Como critérios de inclusão, consideraram-se estudos que abordassem o uso de rejeito de minério de ferro aplicados à pavimentação, seja em camadas estruturais do pavimento ou na misturas asfálticas, bem como pesquisas que apresentassem ensaios laboratoriais e dados quantitativos possíveis de comparação. Os critérios de exclusão, por sua vez, envolveram estudos fora do período estabelecido, pesquisas com rejeitos distintos do minério de ferro, aplicação em áreas não relacionadas à pavimentação e trabalhos que não se enquadrassem nas categorias de dissertação, teses, artigos de conferência ou artigos de periódicos científicos. Após a aplicação dos critérios, a Tabela 2 apresenta a quantidade de estudos selecionados por base de dados.

Tabela 2. Quantidade de pesquisas selecionadas por base de dados.

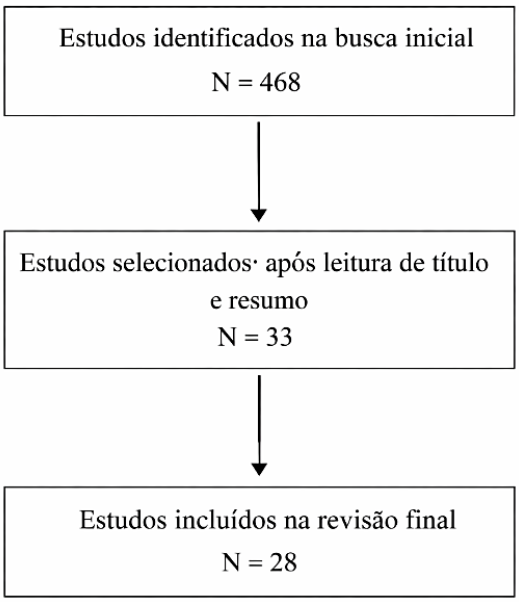
Bases de dados	**Quantidade de pesquisas selecionadas**
Scopus	27
Scielo	2*
BDTD	6

* as pesquisas selecionadas também foram encontradas na base de dados Scopus

As etapas metodológicas compreendem: definição do tema e delimitação do escopo da pesquisa, seleção das bases de dados e período de busca, realização das buscas, triagem dos estudos, leitura dos resumos e seleção dos estudos e seleção dos trabalhos relevantes, seguida da extração e tabulação dos dados e, por fim, análise comparativa e discussão.

Na etapa de extração e tabulação dos dados foram considerados como parâmetros: classificação do rejeito, a natureza da amostra, composição e condição de mistura (quando aplicável), ensaios físicos, químico-mineralógicos, ambientais e mecânicos realizados, bem como os principais resultados obtidos. Durante o processo de extração de dados, com a leitura dos artigos, um total de 5 estudos, obtidos do Scopus, foram descartados por não possuírem ensaios laboratoriais e se tratarem de revisões bibliográficas, desta forma o total de pesquisas da base de dados Scopus foi de 22. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas de busca e seleção dos estudos, com a quantidade de trabalhos identificados, triados e incluídos na revisão.

Figura 1. Fluxograma de seleção dos estudos.



Dessa forma, o procedimento metodológico adotado permitiu a organização sistemática das informações e a padronização dos dados extraídos dos estudos selecionados, possibilitando uma análise comparativa consistente entre as diferentes abordagens. A partir dessa estrutura metodológica, torna-se viável a identificação de tendências, lacunas e desempenhos observados na literatura, os quais são apresentados e discutidos na seção seguinte. De forma auxiliar, foi feito uso da ferramenta Chat gpt com a finalidade de revisão do texto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados extraídos dos estudos elegíveis, totalizando 28 trabalhos, foram organizados em categorias de

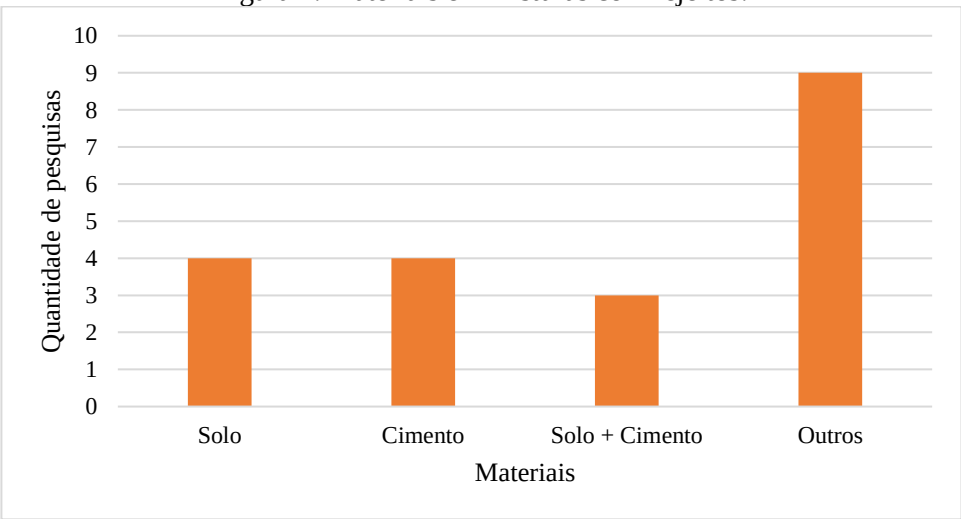
análise previamente definidas e apresentadas, possibilitando a sistematização das informações e a identificação de tendências relacionadas à aplicação de resíduos de minério de ferro em camadas de pavimentação. O objetivo central desta etapa consistiu em compreender o panorama das pesquisas desenvolvidas no âmbito da reutilização dos rejeitos de minério de ferro em diferentes camadas do pavimento.

Inicialmente, analisou-se o tipo de rejeito empregado em cada estudo, sendo identificadas quatro classificações: ultrafino, fino, grosseiro e variado. Verificou-se predominância significativa dos rejeitos finos, presentes em 20 pesquisas. Em menor proporção, quatro estudos utilizaram materiais com granulometria variada, três empregaram rejeitos grosseiros e apenas um investigou rejeito ultrafino. A predominância de rejeitos finos está associada, principalmente, aos processos de beneficiamento empregando etapas cada vez mais modernas, procurando recuperar mais ferro, o que favorece a substituição parcial dos agregados miúdos por esse material residual.

Quanto à finalidade de aplicação, os estudos foram agrupados em duas categorias: uso em camadas estruturais do pavimento e uso em revestimento asfáltico. Observou-se que a maioria das pesquisas concentrou-se na aplicação em camadas estruturais, totalizando 19 estudos, enquanto nove abordaram o emprego em revestimento asfáltico. Em conjunto com essa etapa, avaliou-se a utilização do rejeito de minério de ferro em substituição total aos agregados ou em misturas para substituições parciais. Apenas oito pesquisas empregaram o rejeito como substituição total do agregado, enquanto 20 realizaram misturas com outros materiais, com a finalidade de estabilização e melhoria de desempenho.

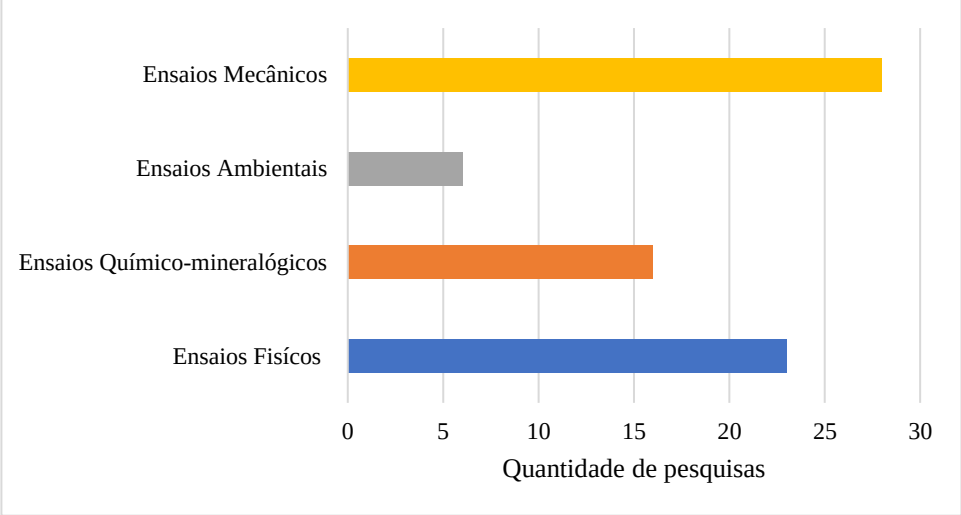
Dentre as pesquisas que utilizaram o rejeito em misturas com outros materiais, foi possível identificar alguns componentes com maior recorrência de análise. Na Figura 2, observa-se que a maioria dos estudos avalia a mistura do rejeito com solo (geralmente solo local da própria pesquisa), cimento ou a combinação de solo e cimento. As demais investigações envolvem misturas com outros resíduos, como cinzas de incineração de resíduos sólidos, apresentadas no estudo de Jing *et al.* (2023a), ou ainda o emprego de resíduo de escavação de túneis conforme Jing *et al.* (2023b). Grande parte das pesquisas que utilizam materiais alternativos contém a combinação de mais de um componente juntamente ao rejeito.

Figura 2. Materiais em misturas com rejeitos.



Em seguida, realizou-se a análise dos ensaios laboratoriais executados em cada estudo, os quais foram divididos em quatro grupos: ensaios físicos, químico-mineralógicos, ambientais e mecânicos. Na Figura 3 está apresentada a quantidade de pesquisas que realizaram ao menos um ensaio pertencente aos grupos mencionados. Os ensaios ambientais configuram-se como os menos recorrentes, estando presentes em apenas seis estudos, em todos eles foi realizado o ensaio de lixiviação e, em alguns casos, o ensaio de solubilização apareceu de forma complementar à análise.

Figura 3. Quantidade de ensaios realizados por grupo.



Em sequência dos ensaios menos recorrentes, destacam-se os ensaios químico-mineralógicos, presentes em dezesseis pesquisas. Dentre eles, os ensaios de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) foram os mais frequentes, estando ao menos um desses procedimentos presentes em todos os estudos que contemplaram essa categoria. Em seguida, os ensaios físicos aparecem em quase a totalidade das investigações, sendo identificados em 23 trabalhos, com predominância das análises de granulometria, limites de Atterberg e densidade. Em alguns casos, especialmente em pesquisas voltadas ao uso em pavimentação asfáltica, observam-se ainda ensaios como penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

Por fim, os ensaios mecânicos foram encontrados em todas as pesquisas, ensaios como resistência à compressão, resistência a tração, compactação Proctor, CBR (*California Bearing Test*) e módulo de resiliência, foram os mais recorrentes, da mesma forma que nos ensaios físicos, em alguns casos aparecem ensaios de *creep* estático e *creep* dinâmico, e também ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*).

Quanto aos resultados obtidos pelas pesquisas analisadas, de modo geral os estudos reportaram desempenho satisfatório dentro dos parâmetros normativos avaliados. Em estudos que avaliaram substituições parciais em diferentes proporções, observou-se que determinadas porcentagem apresentaram desempenho superior as demais. Como exemplo, destaca-se a substituição de 40% do agregado graúdo na pesquisa de Gayana e Ram Chandar (2018); no estudo de Babatude *et al.* (2020), verificou-se maior resistência com 8% de substituição; e, na investigação conduzida por Guimarães *et al.* (2024), as porcentagens de 17% e 20% apresentaram os melhores resultados quanto ao módulo de resiliência e à resistência à fadiga em comparação à mistura referência (sem rejeito).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu analisar o panorama das pesquisas voltadas ao reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro na pavimentação, evidenciando tendências quanto aos tipos de materiais empregados, formas de incorporação e métodos de avaliação utilizados. Verificou-se a predominância de estudos que utilizam rejeitos finos, majoritariamente aplicados em camadas estruturais e incorporados por meio de substituições parciais associadas a outros materiais, como solo e cimento.

De modo geral, os resultados apresentados indicam desempenho técnico satisfatório, atendendo a requisitos normativos e, em alguns casos, melhorias mecânicas com proporções específicas de substituição, reforçando o potencial de aplicação desses resíduos como alternativa viável aos agregados convencionais. Contudo, observa-se que a maioria das pesquisas se concentra na análise mecânica, sendo menos frequentes as análises ambientais, o que evidencia uma lacuna de investigação que necessita de avaliação tanto a curto como a longo prazo.

As pesquisas que abordaram as análises ambientais apontaram positivamente para o uso do rejeito na pavimentação, não indicando a possibilidade de contaminação do solo. Contudo, observa-se que as poucas análises ambientais, foram realizadas em condições de curto prazo, não possuindo avaliações que considerem

o comportamento ambiental a longo prazo. Essa limitação demonstra a existência de uma lacuna cientifica nas análises para a investigação ambiental, o que é apontado nos estudos considerados. Embora, a preocupação principal das pesquisas esteja relacionada ao desempenho mecânico do material, por se tratar de um resíduo, é imprescindível que as análises ambientais, e químicas também, sejam realizadas, para garantir a aplicação do mesmo.

Observa-se que, embora os resultados técnicos sejam promissores, a baixa incidência de análises ambientais representa uma lacuna relevante. A avaliação do comportamento ambiental, tanto a curto quanto a longo prazo, é fundamental para assegurar a segurança e a sustentabilidade da aplicação desses materiais. Dessa forma, recomenda-se que futuras pesquisas integrem de maneira mais consistente os aspectos mecânicos e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andalicio, A. F., Pereira, E. L., Oliveira, T. M. (2022) Flexible pavement with mining waste proposal - execution and analysis of an experimental section. *REM - Revista Internacional de Engenharia*, vol. 75, no. 4, pp. 297–305.

Apaza, F. R. A. *et al.* (2021) Evaluation of the performance os iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 266, 2021.

Babatunde, A. Q. *et al.* (2020) Effect of elapsed time after mixing on the strength properties of lime–iron ore tailings treated black cotton soil as a road construction material. *Infrastructures*, vol. 5, no. 11, p. 89.

Brasil, Agência Nacional de Mineração. (2025) *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas*. Brasília, DF. Disponível em: www.anm.gov.br. Acesso at: 22 Feb. 2026.

Cao, L. *et al.* (2022) Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: A sustainable and eco-friendly solution for mining waste. *Journal of Cleaner Production*, vol. 37.

Carmignano, O. R. *et al.* (2021) Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 32, no. 10, p. 1895–1911.

Dantas, A. A. N. (2019) *Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 226 p.

Dong, Y. *et al.* (2021) Study on mechanical properties of recycled mixture with high content of iron tailings sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, p. 12, 2021.

Galhardo, D. C. *et al.* (2024) Influence of iron mining waste addition as a sustainable alternative on the resilient and physical properties of soils for pavement design. *Sustentability*, vol. 16, no. 23.

Gayana, B. C., Ram Chandar, K. (2018) A study on suitability os iron ore overburden waste rock for partial replacement os coarse aggregates in concrete pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 431, n. 10, Institute of Physics Publishing.

Guimarães, A. C. R. *et al.* (2024) Evaluation of the Mechanical Behavior of Asphaltic Mixtures Utilizing Waste of the Processing of Iron Ore. *Mining*, vol. 4, no. 4, pp. 889–903.

Jahanshahi, F. S., Ghanizadeh, A. R. (2024) Compressive strength, durability, and resilient modulus of cement-treated magnetite and hematite iron ore tailings as pavement material. *Construction and Building Materials*, vol. 447.

Jahanshahi, F. S., Ghanizadeh, A. R. (2025) Machine learning approaches for resilient modulus modeling of cement-stabilized magnetite and hematite iron ore tailings. *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1.

Jiang, P. *et al.* (2022) Study on compressive properties and dynamic characteristics of polypropylene-fiber-and-cement-modified iron-ore tailing under traffic load. *Polymers***,** vol. 14, no. 10, p. 1995.

Jing, C. *et al.* (2023a) Experimental study on iron ore tailings sand and municipal solid waste incineration fly ash used in semi-rigid base of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 393.

Jing, C. *et al.* (2023b) Laboratory investigation of solid wastes combined with tunnel slag in cement stabilized base of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 392.

Kong, Y. *et al.* (2024) Investigation on utilization and microstructure of fine iron tailing slag in road subbase construction. *Construction and Building Materials*, vol. 447.

Li, Y. *et al.* (2025) Application of composite cementitious materials and mine wastes in pavement concrete: Mechanical properties, durability, application examples. *Construction and Building Materials*, vol. 469.

Lopes, M. M. (2022) *Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Minério de Ferro Ultrafino Estabilizado Com Solução Polimérica*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.

Martinez, J. G. B. (2017) *Asfaltos e Misturas Modificadas com Materiais Alternativos*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.

Narciso, M. M. *et al.* (2025) Optimizing the Thermal Treatment of Mining-Waste-Amended Clays for Ceramic Aggregates in Pavement Applications. *Materials*, vol. 18, no. 13.

Oda, S. *et al.* (2024) Utilização de resíduos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. *Revista Matéria*, vol. 29, no. 2.

Ren, Q. *et al.* (2024) Effect of Iron Ore Tailings Replacing Porous Basalt on Properties of Cement Stabilized Macadam. *Korean Journal of Materials Research*, vol. 34, no. 6, pp. 291–302.

Rodrigues, K. H. P. (2018) *Estudo de Estabilização Granulométrica de Solos Utilizando Rejeitos de Mineração.* Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 108 p.

Sá, T. S. W. *et al.* (2022) Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. *Construction and Building Materials*, vol. 342.

Santos, D. D. C. (2024) *Estudo da Utilização de Rejeito de Minério de Ferro em Pavimento de Acessos de Mina*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 90 p.

Satheesh, A., Gangaputhiran, S. (2025) Avaliação abrangente de rejeitos de minério de ferro e solo litomárgico tratado com cimento para aplicação em pavimentação. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 11, no. 2.

Silva, R. G. O. (2017) *Caracterização de Concreto Asfáltico Elaborado com Rejeitos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Tese de Doutorado, Núcleo de Geotecnia de Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 207 p.

Wei, Z. *et al.* (2022) Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production*, vol. 335.

Xin, Y. *et al.* (2025) Effects of different dosages of iron ore tailings on the fatigue performance of high-strength modified AC asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 494.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/119

SM soils and biochar in landfill cover layers: Sustainable potential for containment works

Jaquelynne C. Amorim
Ph.D. Student, UFCG–UFPE, Campina Grande, Brazil, jaquelynne.amorim@gmail.com

Maurício Alves da Motta Sobrinho
Full Professor, UFPE, Recife, Brazil, mauricio.motta@ufpe.br

Derovil Antônio dos Santos Filho
Postdoctoral Researcher, UFG, Goiânia, Brazil, derovil.santos@ufg.br

Ph.D. Viviane Farias Silva
Professor, UFCG, Campina Grande, Brazil, viviane.farias@professor.ufcg.edu.br

ABSTRACT: The search for sustainable practices in geotechnical engineering has encouraged the use of residual materials in environmental containment works. In sanitary landfills, slope stability and the performance of cover layers are essential to ensure waste containment, control infiltration, and mitigate gas emissions, especially under critical climatic conditions. With the increasing occurrence of extreme events, the response of these layers must also be evaluated under more severe scenarios, which may compromise their long-term efficiency. This study evaluated soils from two areas of the Campina Grande Sanitary Landfill (ASCG), classified as silty sand (SM), regarding their suitability as barrier materials in surface layers and slopes. Biochar, obtained from the gasification of wood waste, was characterized by BET, XRD, and SEM/EDS, aiming at its incorporation into the soil. The results indicated a material with high porosity, amorphous carbon, and a microstructure favorable to water retention and gas adsorption, contributing to the reorganization of the pore structure, increased tortuosity, and control of fluid flow. Geotechnical tests showed soils with good compaction and permeability on the order of 10^{-7} m/s, consistent with barrier function. The addition of biochar increased the liquid limit, indicating improvement in hydraulic behavior. The results suggest that the controlled incorporation of biochar contributes to infiltration control, gas retention, and slope stability under wetting–drying cycles, with technical and environmental benefits.

KEYWORDS: biochar, environmental geotechnics, infiltration, stability, barriers

1 INTRODUCTION

The final cover layer of sanitary landfills plays an important role in controlling infiltration, gas emissions, odors, erosion, and in supporting vegetation cover, maintaining the environmental and structural integrity of the system (Kamaruddin et al., 2021). However, factors such as biogas generation, waste decomposition, and moisture variations may compromise stability, causing settlements and consolidation (Bonaparte et al., 2020).

The use of biochar in cover soils has been investigated to improve geotechnical properties. This carbonaceous material, produced by the pyrolysis of organic residues under limited oxygen conditions, presents high porosity, large specific surface area, thermal stability, and water retention capacity, enhancing soil performance (Zhang et al., 2020).

From a geotechnical perspective, biochar addition can increase apparent cohesion, reduce maximum dry density, and improve water retention, contributing to erosion control and to mechanical and hydraulic behavior under climatic variations (Li et al., 2020; Ng et al., 2022). In addition, it can act as an adsorbent, retaining toxic compounds and reducing gas emissions such as methane (Nanda et al., 2016). Its effects vary according to soil type, feedstock, pyrolysis conditions, and applied proportion, requiring further full-scale studies (Sikiru et al., 2024).

This scenario becomes more critical with the increasing frequency of extreme climatic events, which impose severe wetting–drying conditions. In semi-arid regions, cover soils often exhibit low water retention and high susceptibility to cracking, compromising long-term performance (Boscov, 2008; Catapreta et al., 2016).

In this context, the incorporation of materials with high porosity and water retention capacity has been investigated. The use of biochar has gained attention due to its ability to improve the physical, chemical, and environmental properties of soils (Downie et al., 2009; Gonzaga et al., 2019). From a physical standpoint, its porous structure allows void filling, modifying density, porosity, and infiltration (Abrishamkesh et al., 2015). Chemically, it influences soil pH, provides nutrients, enhances contaminant adsorption, and improves cation exchange capacity (Glaser et al., 2002).

In soil–biochar mixtures, changes in dry density, optimum moisture content, shear strength, and permeability are observed, depending on soil characteristics and applied proportion (Kong et al., 2021). Biochar promotes aggregate formation, increases interparticle friction, and improves shear strength, reducing erosion. It can also reduce permeability, favoring soil stabilization and its application in hydraulic barriers and slopes (Zhang et al., 2019).

Beyond mechanical and hydraulic effects, soil–biochar mixtures can reduce gas emissions and promote methane oxidation. Its porous structure creates a favorable environment for methanotrophic bacteria, contributing to CH_4 degradation (Yaghoubi, 2011). Biochar derived from lignocellulosic residues, such as wood, presents higher fixed carbon content, thermal stability, and structural rigidity, providing advantageous structural and adsorptive properties (Lehmann and Joseph, 2015; Zhang et al., 2019). It is recognized for improving soil properties, adsorbing pollutants, and reinforcing soil–biochar mixtures (Inda and Bayer, 2018).

A sustainable alternative is the use of wood waste from discarded school furniture for biochar production. Pyrolysis produces a porous material capable of improving soil properties, increasing water retention, and contributing to carbon sequestration (Li et al., 2021), while promoting circular economy and waste management (Zhang et al., 2020).

Studies highlight the potential of biochar in modifying geotechnical parameters (Rajakaruna et al., 2020; Zhang et al., 2022). Sadasivam and Reddy (2015) correlated mechanical properties with physicochemical characteristics, while Kinney et al. (2012) analyzed hydrological properties such as water retention.

In this study, the biochar was produced from wood residues, presenting high surface area, porous structure, and adsorption capacity (Guo et al., 2016; Hussain and Ravi, 2022). Its incorporation can modify soil pore structure, influencing water retention, permeability, and shear strength (Reddy et al., 2015; Chorbani et al., 2024). The characterization of these mixtures involves granulometry, Atterberg limits, compaction, permeability, and shear strength tests, allowing the assessment of their suitability for different applications.

Therefore, this study evaluates the geotechnical behavior of soils used in cover layers and slopes of a sanitary landfill in the semi-arid region of Paraíba, as well as the potential incorporation of biochar, focusing on fluid flow control and slope stability.

2 MATERIALS AND METHODS

Study Area – Campina Grande Landfill, State of Paraíba, Brazil

The study area corresponds to the Campina Grande Sanitary Landfill (ASCG), located in a semi-arid climate region, characterized by alternating periods of drought and intense rainfall events. These conditions impose additional challenges on the performance of cover layers, particularly regarding the maintenance of surface integrity and flow control.

2.1 MATERIALS

Two soils were analyzed: Both were classified as silty sand (SM), according to the Unified Soil Classification System (USCS).

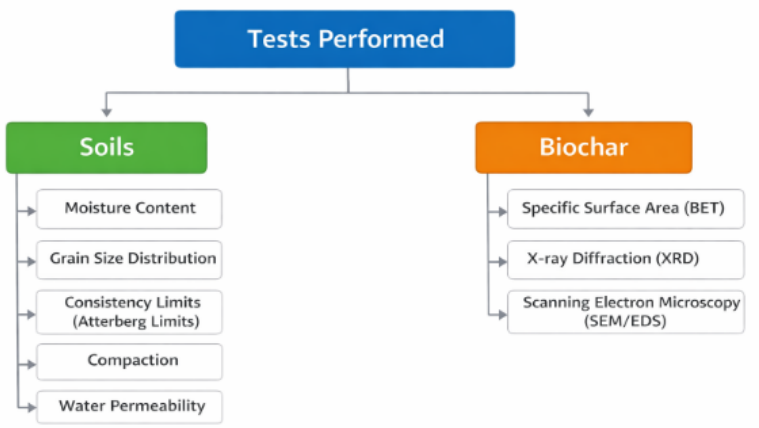
• **Soil A:** collected from the final cover layer, in an area defined by Souza (2021) with higher gas emission rates;

• **Soil B:** collected from an intermediate slope layer.

• **Biochar:** produced from the gasification of wood waste from discarded school furniture. The thermal process resulted in a carbonaceous material with typical biochar characteristics, including high porosity and the presence of amorphous carbon.

• **Mixture Preparation:** A soil–biochar mixture was prepared, containing 3% biochar by mass incorporated into Soil A, based on previous studies indicating this proportion as intermediate for evaluating initial effects (Marques et al., 2020; Yu et al., 2021).

2.2 METHODOLOGY



3 RESULTS AND DISCUSSION

The material shows a predominance of amorphous structure, with the presence of secondary crystalline phases such as quartz (SiO_2) and carbon domains with partial graphitic organization (Georgin et al., 2020; Salomon et al., 2022). The carbonaceous matrix is characterized by a disordered structure, typical of biochars derived from lignocellulosic biomass, with contributions associated with lignin and cellulose (Meili et al., 2019a, 2019b). This structural configuration, with the absence of long crystalline domains, is common in materials subjected to high-temperature carbonization processes (Li et al., 2022).

The structural organization, composed of amorphous regions interspersed with graphitic domains, is associated with high porosity and a heterogeneous distribution of micropores and mesopores (Crini et al., 2008; Tomassoni et al., 2020). These characteristics favor adsorption processes due to the increased surface area and the presence of active sites (Salomon, 2021), contributing to the retention of gases such as CO_2 and CH_4 (Peres et al., 2020; Liu et al., 2021).

BET analysis indicated that the biochar has a specific surface area of 330.3 m^2/g and a total pore volume of 0.1934 cm^3/g, with an average diameter of approximately 1.847 nm, characterizing a predominantly microporous structure with contribution from mesopores (Mohammadnezhad et al., 2019). These results are consistent with materials of high adsorption capacity, in which microporosity favors gas molecule retention by diffusion (Abuelnoor et al., 2021; Li and Lan, 2024). Although the obtained surface area is lower than maximum values reported for activated carbons under controlled conditions, it falls within the typical range of biochars produced by physical activation (Nazem et al., 2020).

Morphological analysis reveals a heterogeneous and interconnected structure, with cavities and discontinuities associated with the carbonization process, consistent with the development of micropores and mesopores indicated by BET analysis (Kelm et al., 2019). Complementary EDS analysis confirmed a high carbon content (94.1%), reinforcing the carbonaceous nature of the material. This combination of composition, morphology, and pore distribution indicates that the thermal process was sufficient to produce a material with relevant adsorption potential.

From a geotechnical perspective, this structure tends to influence properties such as moisture retention, permeability, and shear strength in soil–biochar mixtures, in addition to contributing to gas retention in landfill cover layers (Huang and Xu, 2024; Chorbani et al., 2024). The results indicated that the analyzed soils exhibit typical behavior of silty sand materials, with a predominance of sandy fractions and fine content close to the recommended limit for cover applications (CETESB, 1993; USEPA, 2004). The addition of biochar increased the fine fraction content, allowing the material to meet normative limits. Soil A presented approximately 28.36% fines, while the mixture with 3% biochar reached 30.1%.

Soils A and B showed liquid limits (LL) of 22% and 19%, respectively, below the minimum of 30% recommended by CETESB (1993), reflecting the silty sand nature and low water retention capacity of the materials. Although the natural soil fine content is slightly below the recommended minimum, studies indicate that soils with fine fractions between 15% and 30% can perform satisfactorily in cover layers when properly compacted (Benson et al., 2001; Kameyama, 2012). The Figure 1 illustrates the consistency limits of the natural soils and the soil–biochar mixture.

In this context, the incorporation of biochar promoted an increase in the liquid limit from 22% to 26%, associated with its high specific surface area, porous structure, and water retention capacity (Yang et al., 2014;

Zanutel et al., 2024; Lee et al., 2021), reducing liquid percolation and the potential for leachate generation, as well as contributing to surface erosion control.

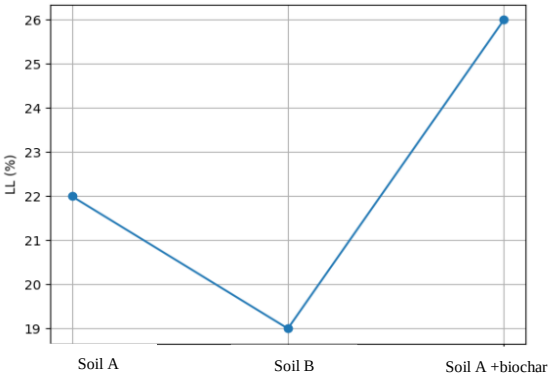


Figure 1 – Liquid limits of soils A and B and of the mixture Soil A + biochar

Although the materials remain non-plastic (NP), this variation indicates a change in hydraulic behavior, influencing suction, response to wetting and drying cycles, volumetric behavior, and shear strength. The increase in the liquid limit suggests improved hydraulic behavior, potentially reducing susceptibility to cracking, especially in semi-arid environments (Mirmongereh et al., 2023).

This modification has implications for slope stability, as increased water retention favors continuity of the medium and reduces crack formation, helping to control preferential flow paths and maintain surface integrity (Mirmongereh, Pakbaz, and Sasani, 2023). Furthermore, biochar tends to alter void distribution and permeability, influencing pore pressure dissipation and the balance between strength and deformation (Huang and Xu, 2024). However, these effects tend to be more pronounced at contents above 5%, indicating that the addition of 3% promotes moderate changes, with potential intensification at higher dosages (Wong et al., 2016).

The grain size distribution results indicate soils classified as silty sand (SM), with a predominance of sandy particles and the presence of fines that influence hydraulic and mechanical behavior. This composition presents limitations, such as low water retention and a higher tendency to crack during drying periods (Boscov, 2008; Catapreta et al., 2016). Pinto (2006) highlights that soils with good grain size distribution exhibit better compaction performance, forming denser and more stable structures.

Grain size heterogeneity is desirable in cover layers, as it influences water retention, shear strength, crack formation, permeability, and response to moisture variations (Araújo, 2016; Lima et al., 2019; Oliveira et al., 2011).

The analysis of the grain size curves indicates that the addition of biochar does not significantly alter particle distribution, demonstrating compatibility between the materials and contributing to better void distribution and fluid flow control. In terms of compaction, Soil A presented a maximum dry density of 1,925 kg/m³ and an optimum moisture content of 12%, values that indicate good compaction capacity and ease of field execution. These results are consistent with silty sandy soils, which tend to exhibit a relatively stable structure under compaction, with a balance between coarse particles (responsible for strength) and fine particles (responsible for cohesion and water retention) (Mitchell and Soga, 2005).

The achieved dry density can be considered high for this type of material, indicating a compacted structure with low compressibility and good mechanical strength. This behavior is particularly important in landfill cover layers, where surface stability and resistance to deformation are essential to prevent differential settlement and erosive processes. The literature indicates that compaction directly influences hydraulic conductivity and the overall performance of the cover layer, as increasing the degree of compaction reduces void volume and limits the formation of preferential flow paths (Daniel and Benson, 1990; Benson et al., 2001).

In this context, the obtained values indicate that the soil presents suitable conditions to act simultaneously as a structural support and a hydraulic barrier. Furthermore, the relationship between dry density and the estimated void ratio (ranging approximately from 0.27 to 0.34) shows that the compacted soil has a relatively dense structure, yet still with sufficient porosity to allow gas diffusion processes. This balance is particularly desirable in cover layers, as it enables the reduction of water infiltration while promoting gas oxidation (Thurner et al., 2024; Trinh et al., 2023).

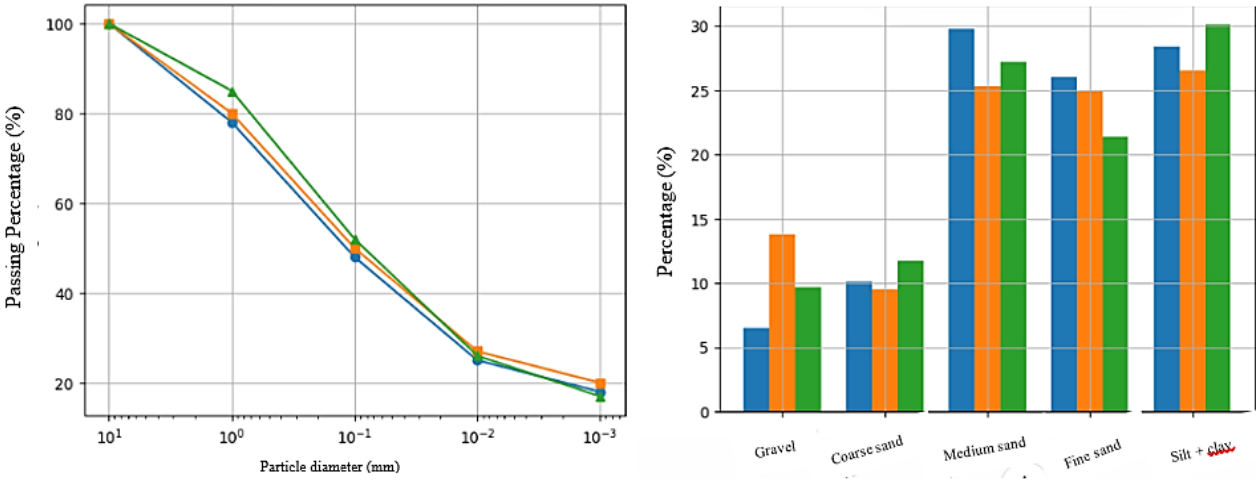


Figure 2 – Grain size distribution curves of the analyzed materials (a), highlighting Soil A (●), Soil B (■), and Soil A with 3% biochar (▲); Bar chart (b): orange → Soil A | blue → Soil B | green → Soil A + 3% biochar

Compaction of the cover layer in landfills is a key factor in soil permeability, controlling the movement of water and air within the pores (Gondim, 2020). Excessive compaction may limit the transport of moisture and nutrients, compromising methane oxidation, while adequate levels act as a barrier to gas emissions (Lima and Pinto Júnior, 2020). Typical dry density values between 1780 and 1950 kg/m³ indicate good geotechnical performance, associated with cover stability, infiltration control, and emission reduction (Mariano, 2008). The specific gravity of the particles also contributes to shear strength when combined with proper compaction, whereas lighter materials tend to form more porous structures (Pham et al., 2020; Santos, 2019).

The addition of biochar reduces the maximum dry density and increases the optimum moisture content due to its low density and high porosity (Zanutel et al., 2024; Reddy et al., 2015), favoring water retention but requiring control, as excessive reductions in density may compromise strength (Abichou et al., 2020). Consistent results have been reported by Lamprinakos (2019), Ganesan et al. (2024), and Mirmongereh et al. (2023), with variations depending on fines content and dosage. Studies also indicate that biochar particle size and porosity alter pore structure and compaction efficiency (Verheijen et al., 2019; Edeh and Mašek, 2021; Alghamdi et al., 2020).

Overall, biochar incorporation follows a consistent pattern of reducing dry density and increasing optimum moisture content, requiring a balance between functional benefits and mechanical performance maintenance. Regarding permeability, the tests indicated values on the order of 10^{-7} m/s, placing the soils within the recommended range for final cover layers, according to NBR 13896 (ABNT, 1997) and USEPA (2004). This order of magnitude is characteristic of materials with moderate hydraulic barrier behavior, capable of restricting water percolation without completely eliminating the presence of interconnected pores.

This behavior is consistent with studies such as Roessler et al. (2022), which observed similar values for compacted silty soils used in landfill covers. Furthermore, Thurner et al. (2024) highlight that materials with hydraulic conductivity in this range exhibit stable long-term performance, even under wetting and drying cycles. The interaction between grain size distribution, compaction, and permeability indicates that the analyzed soil presents a structure favorable for field performance. The presence of fine fractions contributes to filling voids between sandy particles, reducing permeability, while the sandy fraction ensures mechanical stability and shear strength.

The incorporation of biochar, even at low content (3%), tends to modify the internal soil structure, mainly through partial void filling and the introduction of an additional porous network. Studies indicate that, even in small proportions, biochar can influence soil matrix organization, increasing pore tortuosity and reducing hydraulic connectivity (Barnes et al., 2017; Mesbahnia et al., 2023). This effect, associated with the high specific surface area of biochar, can contribute to moisture redistribution in the soil and increased water retention, without significantly compromising compaction capacity. However, as observed by Marques et al. (2020) and Yu et al. (2021), low contents tend to produce subtler effects, acting mainly as local structural modifiers without significantly altering the overall soil parameters.

Therefore, the obtained results indicate that the analyzed soils exhibit geotechnical behavior compatible with their application in landfill cover layers, with adequate performance in terms of compaction and

permeability. The addition of biochar contributes to adjustments in soil structure, with potential for improved fluid flow control and behavior under variable environmental conditions.

4 REFERENCES

Abichou, T. (2020) Using methane biological oxidation to partially finance sustainable waste management systems and closure of dumpsites in the Southern Mediterranean region. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, v. 5, p. 21, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s41207-020-00157-z.

ABNT – (1997) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896: Projeto e execução de sistema de cobertura de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Abrishamkesh, S. et al. (2015) Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant Soil and Environment*, v. 61, n. 11, 2015.

Abuelnoor, N. et al. (2021) Activated carbons from biomass-based sources for CO_2 capture applications. *Chemosphere*, v. 282, p. 131111, 2021.

Araújo, T. T. (2016). Estudo experimental de emissões fugitivas de biogás em camadas de cobertura de uma célula de aterro sanitário. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

Alghamdi, A. G.; Alkhasha, A.; Ibrahim, H. M. (2020) Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 24, n. 12, p. 1042–1050, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.11.003.

Barnes, R. T. et al. (2017) Biochar's effects on soil water retention, hydraulic conductivity, and water repellency. *Environmental Science & Technology*, v. 51, n. 12, p. 6824–6831, 2017.

Benson, C. H. et al. (2001) Field evaluation of alternative earthen final covers. *International Journal of Phytoremediation*, v. 3, n. 1, p. 105–127, 2001.

Bonaparte, R.; Bachus, R. C.; Gross, B. A. (2020) Geotechnical stability of waste fills: lessons learned and continuing challenges. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 11, p. 05020010

Boscov, M. E. G. (2008) *Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: projeto, construção e operação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

Catapreta, C. A. A.; Simões, G. F. (2016) Monitoramento ambiental e geotécnico de aterros sanitários. In: *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, 2016.

CETESB – GTZ. Definição dos objetivos da amostragem de solo. São Paulo, 1993.

Costa, C. M. C. et al. (2015) Avaliação do ressecamento da camada de cobertura utilizando solo com adição de fibras de PET através de imagens. In: *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental*

Crini, G.; Badot, P.-M. (2008) Application of chitosan for dye removal from aqueous solutions. *Progress in Polymer Science*, v. 33, n. 4, p. 399–447, 2008.

Daniel, D. E.; Benson, C. H. (1990) Water content–density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990.

Downie, A.; Crosky, A.; munroe, P. (2009) Physical properties of biochar. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). *Biochar for environmental management*. London: Earthscan, 2009.

Edeh, I. G.; Mašek, O. (2021) The role of biochar particle size and hydrophobicity in improving soil hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 2021.

Ganesan, S. P. et al. (2024) Exploring implication of variation in biochar production on geotechnical properties of soil. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 14, p. 5791–5801, 2024.

Georgin, J. et al. (2020) Evaluation of bark powder as adsorbent for dye removal. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 25727–25739, 2020.

Ghorbani, M.; Amirahmadi, E. (2024) Biochar and soil contributions to crop lodging and yield performance: a meta-analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 215, p. 109053, 2024.

Glaser, B. et al. (2002) Ameliorating physical and chemical properties of soils with charcoal. *Biology and Fertility of Soils*, v. 35, p. 219–230, 2002.

Gonzaga, M. I. S. et al. (2019) Nitrogen and phosphorus uptake efficiency in Indian mustard. *Ciência Rural*, v. 49, n. 1, 2019.

Guo, M.; HE, Z.; Uchimiya, S. M. (2016) Agricultural and environmental applications of biochar. *Advances in Agronomy*, v. 63, p. 175–197, 2016.

Huang, D.; Xu, Q. (2024) Biocobertura à base de biochar para reduzir as emissões de CH_4 e H_2S em aterros sanitários. In: *Materiais e Resíduos Ambientais*. Elsevier, 2024.

Hussain, H.; Ravi, R. (2022) Geotechnical impacts of biochar on soils. *Geoscience Frontiers*, 2022.

Inda, A. V.; Bayer, C. (2018) Biochar: fundamentos e perspectivas para solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, 2018.

Juriga, M.; Šimanský, V. (2018) Effect of biochar on soil structure—A review. *Acta fytotechnica et zootechnica*, v. 21, p. 11–19, 2018.

Kamaruddin, M. A. et al. (2021) Sanitary landfill operation and management. In: *Solid Waste Engineering and Management*, 2021.

Kameyama, K. et al. (2012) Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching. *Journal of Environmental Quality*, v. 41, p. 1131–1137, 2012.

Kelm, M. A. P. et al. (2019) Removal of azo dye from water via adsorption on biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 28558–28573, 2019.

Kinney, T. J. et al. (20120 Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, v. 41, p. 34–43, 2012.

Kong, Z. et al. (2021) Biochar-pyrite bi-layer bioretention system. *Water Research*, v. 206, p. 117737, 2021.

Lawtae, P.; Tangsathitkulchai, C. (2021) Mesoporous activated carbon from biomass. *Molecules*, v. 26, p. 6521

Lee, M.-H. et al. (2021) Effects of biochar on soil aggregation. *Processes*, v. 9, p. 1431, 2021.

Lehmann, J.; Joseph, S. (eds.). (2015) *Biochar for environmental management*. 2. ed. London: Routledge.

Li, J. et al. (2020) Applications of coal combustion products. *Coal Geology of China*, p. 141–186, 2020.

Li, L. et al. (2021) Role of biochar in improving sandy soil water retention. *Water*, v. 13, n. 4, p. 407, 2021.

Li, W. et al. (2024) Sustainable carbon-based catalyst materials derived from lignocellulosic biomass. *Carbon Energy*, 2024.

Li, Y.; Zhang, Y.; Huang, Q. (2022) Structural properties and adsorption behavior of biomass-based activated carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 166, p. 105579, 2022.

Lima, A. E. M. M.; Pinto Junior, O. B. (2020) Quantificação de gases de efeito estufa em aterro sanitário no município de Cuiabá. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), p. 136–144, 2020.

Lima, J. R. S.; Oliveira, J. E. S.; Moura, A. S.; Silva, C. F.; Medeiros, E.V.; Hammecker, C. (2019). Produção e eficiência no uso de água do feijão comum adubado com biochar. Diversitas Journal, v. 4, 2019

Liu, X.; YU, J.; Zhao, X. (2021) Influence of pore structure on the adsorption performance of activated carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 323, p. 111254, 2021.

Maniarasu, R.; Rathore, S. K.; Murugan, S. (2023) Biomass-based activated carbon for CO_2 adsorption. *Energy & Environment*, v. 34, n. 5, p. 1674–1721, 2023.

Marques, J. P.; Rodrigues, V. G. S.; Vaz, C. M. P. (2020) Influence of biochar addition on compaction parameters of soil. Universidade de São Paulo, 2020.

Meili, L. et al. (2019a) Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, v. 141, p. 60–71, 2019a.

Meili, L. et al. (2019b) Cassava stump biochar characteristics and dye affinity. *Chemical Engineering Communications*, v. 206, p. 829–841, 2019b.

Mesbahnia, A. et al. (2023) Influence of biochar on water retention and hydraulic conductivity. *Journal of Environmental Management*, v. 341, 2023.

Mesbahnia, A.; Alazba, A. A.; Zhang, P. (2023) Long-term performance of biochar-amended soils. *Journal of Environmental Management*, v. 336, p. 117664, 2023.

Mirmongereh, A.; Pakbaz, M.; Sasani, H. (2023) Enhancing geotechnical properties of soil with biochar. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2023.

Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005) *Fundamentals of soil behavior*. 3. ed. New York: Wiley, 2005.

Mohammadnezhad, F. et al. (2019) Mixed matrix membrane synthesis and characterization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 71, p. 99–111, 2019.

Nanda, S. et al. (2016) Biochar as a bioresource. *Waste and Biomass Valorization*, v. 7, p. 201–235, 2016.

Nazem, M. A. et al. (2020) Preparation of activated nano-carbon from agricultural wastes. *RSC Advances*, v. 10, p. 1463–1475

Ng, C. et al. (2022) Effects of biochar on shear strength. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 49422–49428, 2022.

Peres, C. B. (2020) Captura de CO_2 em carvões ativados derivados de biomassa. 2020.

Pham, B. T. et al. (2020) Estimation of undrained shear strength of soil. *Sustainability*, v. 12, n. 6, p. 2218

Pinto, C. S. (2006) *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos

Rajakaruna, R.; Sewwandi, B. G. N. (2020) Treatment of lead-containing wastewater by adsorption process

Reddy, K. R. et al. Effects of biochar amendment on geotechnical properties. *Waste Management & Research*, v.33

Roessler, J. et al. (2022) Hydraulic performance of compacted silty soils. *Waste Management*, v. 152, p. 220-229

Sadasivam, B. Y.; Reddy, K. R. (2015) Engineering properties of biochar-amended soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2015.

Santos, J. J. N. (2019) Avaliação geotécnica de misturas para biocoberturas. Dissertação – UFCG, 2019.

Sikiru, S. et al. (2024) Technology projection in biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 200, p. 114535, 2024.

Thurner, M. et al. (2024) Hydraulic behavior of landfill cover soils. *Waste Management*, v. 171, p. 53–65

Trinh, Q. H. et al. (2023) Assessment of compacted soil parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 41, p. 2307–2323, 2023.

USEPA – U.S. (2004) Environmental Protection Agency. Solid Waste Disposal Guidelines, 2004.

Verheijen, F. et al. (2010) Biochar application to soils: a critical review. EUR, v. 24099, 2010.

Wong, J. T. F. et al. (2019) Effects of biochar on landfill cover soils. *Journal of Environmental Management*, v. 236, p. 667–673, 2019.

Yaghoubi, P. (2011) Development of biochar-amended landfill cover for landfill gas mitigation. PhD Thesis, University of Illinois, 2011.

Yang, F. et al. (2014) Organic matter controls of soil water retention. *Journal of Hydrology*, v. 519, p. 3086–3093, 2014

Zanutel, M. et al. (2024) Biochar modifies soil physical properties. *Vadose Zone Journal*, v. 23, n. 1, 2024.

Zhang, M. et al. (2019) Biochar impact on soil properties. *Catena*, v. 174, p. 429–437, 2019.

Zhang, S. et al. (2020) Sustainable production of carbon nanomaterials. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 9, p. 753–760

Zhang, Y. et al. (2022) Influence of biochar on strength and permeability. *Journal of Cleaner Production*, v. 350, p. 131472, 2022.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/120

Uso de Biopolímeros em Camadas de Solos para Impermeabilização de Base de Aterros Sanitários

Kellyane Miranda de Sousa
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, kellyanemsousa@alu.ufc.br

Luiz Gustavo Ribeiro Alves
Graduando, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, luiz.gustavo.ribeiro.alves@gmail.com

Maressa Oliveira Martins
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, maressamartins@alu.ufc.br

Amanda Torres Martins
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, amandatorresm@alu.ufc.br

Thiago Fernandes da Silva
Professor, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, thiagofernandes@crateus.ufc.br

RESUMO: O uso de biopolímeros em camadas de solos compactados tem emergido como alternativa sustentável para impermeabilização de base de aterros sanitários. Este estudo discute criticamente o desempenho geotécnico de solos tratados com biopolímeros, com ênfase em consistência, compactação, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e retenção de água. Evidências experimentais indicam que a formação de uma matriz gelificada ao redor das partículas promove agregação estrutural, redução do índice de vazios e diminuição da condutividade hidráulica. Observam-se ganhos significativos de coesão, além de aumento da capacidade de retenção de água, contribuindo para maior estabilidade frente a ciclos de umedecimento e secagem. A incorporação de biopolímeros também pode alterar parâmetros de compactação, influenciando a umidade ótima e a massa específica seca máxima. Apesar dos resultados promissores, aspectos relacionados à durabilidade, biodegradação, interação com contaminantes e desempenho sob variações térmicas ainda demandam investigação. No contexto das mudanças climáticas, tais materiais apresentam potencial para aumentar a resiliência de barreiras hidráulicas. Conclui-se que os biopolímeros constituem alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica, desde que incorporados a práticas de projeto fundamentadas em avaliação de desempenho a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de Base, Biopolímeros, Liners, Permeabilidade.

ABSTRACT: The use of biopolymers in compacted soil layers has emerged as a sustainable alternative for waterproofing the base of landfills. This study critically discusses the geotechnical performance of soils treated with biopolymers, with emphasis on consistency, compaction, shear strength, permeability, and water retention. Experimental evidence indicates that the formation of a gelled matrix around the particles promotes structural aggregation, reduces the void ratio, and decreases hydraulic conductivity. Significant gains in cohesion are observed, as well as an increase in water retention capacity, contributing to greater stability against wetting and drying cycles. The incorporation of biopolymers can also alter compaction parameters, influencing the optimum moisture content and maximum dry specific gravity. Despite the promising results, aspects related to durability, biodegradation, interaction with contaminants, and performance under thermal variations still require investigation. In the context of climate change, such materials show potential to increase the resilience of hydraulic barriers. It is concluded that biopolymers constitute a technically viable and environmentally strategic alternative, provided they are incorporated into design practices based on long-term performance evaluation.

KEYWORDS: Base layer, Biopolymers, Liners, Permeability.

1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização de base constitui um dos principais elementos em obras de aterros sanitários. A infiltração de lixiviado através dessa camada pode provocar a contaminação do subsolo e dos recursos hídricos adjacentes, resultando em impactos ambientais significativos e elevados custos de remediação. Entre as soluções técnicas mais adotadas destaca-se a execução de uma camada de solo de baixa permeabilidade, geralmente associada a uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD). Esse solo deve ser devidamente compactado, de modo a atingir coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm.s^{-1}, além de apresentar compatibilidade química com o lixiviado (Boscov, 2008).

Em diversas regiões, entretanto, a disponibilidade de jazidas com solos naturalmente adequados é limitada. Diante desse cenário, têm sido empregadas técnicas de melhoria de solos locais com o objetivo de reduzir a permeabilidade da camada de base. O uso de bentonita é uma solução amplamente consolidada (Middelhoff *et al.,* 2020), devido à sua elevada capacidade de expansão e baixa condutividade hidráulica. Contudo, a ocorrência restrita dessa argila expansiva, concentrada em regiões específicas, pode elevar significativamente os custos de aquisição e transporte.

Nesse contexto, alternativas sustentáveis vêm sendo investigadas, entre elas o uso de biopolímeros. Esses materiais são constituídos por cadeias monoméricas obtidas a partir de fontes naturais, como microrganismos, resíduos vegetais e animais (Kumar *et al*., 2025). Tratam-se de materiais renováveis, com potencial de neutralidade de carbono e menor impacto ambiental (Dagliya *et al*., 2023). Recentemente, os biopolímeros têm sido aplicados na engenharia geotécnica em função de sua capacidade de formação de gel e da modificação das propriedades hidromecânicas dos solos (Chang *et al.*, 2020; Shalchian *et al.*, 2025).

Em aterros sanitários, a incorporação de biopolímeros pode contribuir para a melhoria das propriedades geotécnicas de solos locais, viabilizando sua aplicação em camadas de base e cobertura, além de auxiliar no controle da erosão superficial. Tal abordagem pode reduzir custos associados à aquisição e transporte de materiais e ampliar a viabilidade técnica e ambiental desses empreendimentos.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, identificando os principais materiais empregados, analisando seus efeitos nas propriedades geotécnicas dos solos e discutindo desafios e limitações associados à sua aplicação.

2 CONTEXTO TÉCNICO E NORMATIVO DE CAMADAS DE BASE

A camada de base configura-se como um dos principais componentes dos aterros sanitários, cuja finalidade principal é impedir a migração de contaminantes para a zona não saturada e para os aquíferos subjacentes (Boscov, 2008). Sendo assim, em aterros sanitários, a camada de base - também denominada *liner* - utilizada como barreira de impermeabilização, tem a função de evitar a movimentação de contaminantes para o meio ambiente.

Estes revestimentos de base podem ser compostos de diversas maneiras, a depender do tipo de resíduo aterrado e da segurança ambiental requerida. Os sistemas simples consistem em uma barreira única, sendo mineral ou sintética. Os sistemas compostos associam dois tipos de proteção de natureza diferentes, podendo ser uma camada de argila compactada sobreposta por uma geomembrana, por exemplo. Já os sistemas duplos são compostos de duas barreiras independentes com mecanismos de drenagem intermediários para detecção de vazamentos (Sarsby, 2013).

Segundo Boscov (2008), a maioria dos países utiliza sistemas compostos na base. A barreira primária trata-se de uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) seguida por uma camadas de argila compactada (*Compacted Clay Liners – CCL*) de espessura variável. O uso da *CCL* se justifica devido à sua baixa permeabilidade ($k \leq 10^{-7}$ cm.s^{-1}) e elevada capacidade de atenuação de metais pesados, caso haja qualquer acidente na camada primária.

Tradicionalmente, a construção de barreiras minerais fundamenta-se no emprego de solos argilosos compactados ou misturas de solo-bentonita, visando o preenchimento de vazios e a redução da porosidade da matriz. Contudo, a escassez de materiais naturais adequados e a necessidade de soluções sustentáveis têm impulsionado a investigação de biopolímeros, como a goma xantana e a goma guar, que atuam na estabilização

da estrutura do solo e no selamento de poros por meio da formação de hidrogéis, viabilizando o uso de solos locais para o atendimento das exigências normativas e bom desempenho.

3 BIOPOLÍMEROS APLICADOS EM CAMADAS DE SOLOS

Os biopolímeros são grandes moléculas formadas por longas cadeias de polissacarídeos por meio da reação química de polimerização (Shalchian *et al*., 2025), podendo ser encontrados em espécies vivas, como plantas, árvores, animais e outros organismos vivos (Das *et al.*, 2023). De acordo com a forma de obtenção dos biopolímeros, eles podem ser classificados em dois grandes grupos: biopolímeros naturais e sintéticos (Das *et al*., 2023). Os biopolímeros mais conhecidos e utilizados em diversas aplicações são: goma xantana, goma guar, quitosana, caseína, goma gelana e carragenina (Liu *et al*., 2024).

A versatilidade dos polímeros naturais na engenharia permite que a sua aplicação abranja desde o reforço de fundações e estabilização de encostas até a implementação de sistemas de contenção ambiental. Tal desempenho fundamenta-se na capacidade destas macromoléculas em atuar como agentes aglutinantes sustentáveis, demonstrando eficácia superior em solos arenosos ou afetados por sais, onde biopolímeros à base de proteína elevam a resistência ao cisalhamento e mitigam os efeitos da salinidade que comprometem o cimento convencional (Babatunde *et al*., 2024). Sob a ótica geotécnica, a elevada viscosidade de polímeros como a goma xantana viabiliza a modificação de solos *in situ* pelo preenchimento do espaço poroso, o que reduz a permeabilidade para valores normativos e qualifica o material para uso como revestimento de base em aterros sanitários (Kumar *et al.,* 2022). Assim, a utilização destes materiais pode ser considerada como uma solução técnica e econômica para obras de infraestrutura que exigem vedação hidráulica e suporte mecânico sob condições químicas adversas (Babatunde et al., 2024).

Os mecanismos de interação dos biopolímeros nos solos encontrados na literatura se resumem em ligação iônica/hidrogênio e preenchimento de poros, apresentando a capacidade de formar uma matriz de gel estável dentro do solo (Pydi *et al*., 2024). Esse fenômeno é conhecido como biocimentação, quando a superfície das partículas do solo entram em contato com o biopolímero e um biogel é formado aderido às partículas, preenchendo os vazios do solo (Shalchian *et al*., 2025). Além disso, quanto maior for o grau de compactação, maior a redução dos poros disponíveis, visto que as cadeias do biopolímero podem interagir mais facilmente com as partículas (Ng *et al.,* 2020). Nesse sentido, pesquisas devem ser aplicadas para verificar a compatibilidade do biopolimero com o solo local e o líquido a ser contido.

4 EFEITO DOS BIOPOLÍMEROS EM ALGUMAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

4.1 Consistência

Com base em estudos dos efeitos dos biopolímeros incorporados no solo, existem alterações significativas nas propriedades fundamentais dos limites de consistência. Segundo Chang *et al.* (2020), a interação entre o biopolímero e a água intersticial, somada à ligação com a superfície das partículas de argila, aumenta a espessura da camada difusa dupla. Isso requer um teor de umidade maior para que a mistura vá do estado plástico para o líquido, elevando assim, o limite de liquidez (LL).

A magnitude desse aumento depende do biopolímero. Pydi *et al.* (2024) verificou que o incremento de 1,5% de goma xantana elevou o LL de um solo em mais de 50%, quando comparado ao solo não tratado. De acordo com Kumar *et al.* (2023) a aplicação de goma guar em teores de 0,5% a 2% sobre uma mistura areno-argilosa mal graduada resultou em um incremento de 1,4 a 2,5 vezes do LL em relação ao solo não tratado.

Diferente do LL, o limite de plasticidade (LP) exibiu um aumento gradual, variando de 20% para 27%, na dosagem máxima de 2% no mesmo estudo de Kumar *et al.* (2023). O índice de plasticidade demonstrou um acréscimo expressivo, sendo bastante influenciado pela variação do LL em função da dosagem.

Os resultados experimentais obtidos por Shaji *et al.* (2024) em um silte arenoso, demonstram que a incorporação da goma xantana promoveu um aumento progressivo no LL e no LP. O solo sem tratamento apresentou um LL de 48%, enquanto que para incrementos de goma xantana de 0,5 e 2%, foram obtidos os valores de LL de 65 e 86%, respectivamente. Adicionalmente, o valor do LP para dosagem de 2% foi de 41%, enquanto que o solo sem tratamento apresentou o valor de LP de 24%.

Os incrementos nos limites de consistência ocorrem devido à natureza hidrofílica dos biopolímeros e à sua capacidade de formar uma rede de hidrogel estável que preenche os vazios do solo. Conforme Kumar *et al.* (2023), a abundância de grupos hidroxila (OH) na goma guar facilita a formação de ligações de hidrogênio e a adsorção de cátions, aumentando a retenção de água na superfície das partículas.

Paralelamente, a goma xantana, por ser um polímero aniônico, interage com os cátions da superfície das argilas, criando uma matriz gelatinosa de alta viscosidade. Esse fenômeno, descrito por Shaji *et al.* (2024), promove a agregação das partículas e captura moléculas de água nos poros, elevando a plasticidade do solo tratado.

4.2 Compactação e resistência a compressão não confinada

Estudos relacionados aos efeitos de biopolímeros no estado de compactação dos solos indicam que o processo é influenciado pela formação de uma rede tridimensional de hidrogel nos vazios intergranulares. Nesse contexto, Ali *et al.* (2025) observaram que ocorreu um deslocamento significativo da curva de compactação Proctor normal ao adicionar 2% de pectina em um solo argiloso, elevando a umidade ótima de 15% para 17%, enquanto o peso específico seco máximo reduziu de 16,5 para 15,5 $kN.m^{-3}$. Apesar dessa redução na densidade, a coesão do solo aumentou de 100 para 348 kPa, com incremento de 1% de pectina e 28 dias de cura.

Cabalar *et al.* (2023) demonstraram que a inclusão de 5% de goma xantana elevou o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 38,2% para 73,3%, consolidando o potencial desses materiais em aplicações que demandam alta capacidade de suporte e baixa deformabilidade sob cargas cíclicas. Vale ressaltar que tal estabilização reflete em ganhos diretos de suporte para infraestrutura.

De forma análoga, Cheng e Geng (2023) verificaram que a incorporação de 1% de Alginato de Sódio (SA), um biopolímero derivado de algas marrons com alta capacidade gelificante, proporcionou um aumento de 4,11% na Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) da argila quando comparado ao solo natural em estado não tratado. Esse ganho de eficiência é atribuído à formação de uma matriz cimentante hidrofílica que estabiliza a estrutura do solo, otimizando seu desempenho mecânico. De modo similar, Kumar *et al.* (2023) encontraram ganhos de 74,78% de RCNC para amostras de areia e argila mal graduada incrementadas com 2% de goma guar (7 dias de cura).

Esse comportamento está associado, principalmente, à natureza hidrofílica das matrizes poliméricas que alteram a lubricidade entre os grãos e a retenção de água, resultando em altos incrementos de resistência sob condições ideais de hidratação (Ilman e Balkis, 2023). Vale ressaltar que o desenvolvimento dessas ligações promove modificações microestruturais que permitem mitigar os danos ambientais de aglutinantes tradicionais, uma vez que o envolvimento das partículas por ligações químicas fortes estabelece uma densificação superior à obtida apenas pelo rearranjo físico (Tasuji *et al.*, 2024).

A eficácia do tratamento é condicionada pela capacidade de gelificação do polímero na matriz do solo. Dessa forma, embora possam ocorrer alterações nos parâmetros de compactação, a consolidação de uma estrutura estável e menos deformável valida a estabilização biopolimérica e provê ganhos mecânicos, que podem superar as propriedades do solo compactado de forma convencional (Zhang *et al.,* 2024).

4.3 Permeabilidade

A permeabilidade é a principal característica geotécnica de camadas de solos compactados utilizadas como revestimento de base em aterros sanitários, que pode ser afetada com o incremento de biopolímeros. A maioria dos estudos experimentais têm mostrado que pequenas porcentagens de biopolímeros incrementadas em solos são capazes de reduzirem o coeficiente de permeabilidade (k) substancialmente, mantendo essa eficiência por, pelo menos, um ano com variações mínimas. Dehghan *et al.* (2018) verificaram que a aplicação de biopolímeros reduz tanto a densidade máxima seca quanto a permeabilidade do solo colapsável.

Shaji *et al.* (2024) observaram que a adição de 1,5% de goma xantana em um solo silte arenoso provocou uma redução no valor de k de $4{,}5.10^{-5}$ para $1{,}5.10^{-8}$ $cm.s^{-1}$. De forma similar, Tasuji *et.al.* (2024) identificou que o acréscimo de 0,32% de quitosana em um solo arenoso resultou na redução do coeficiente de condutividade hidráulica de $1{,}6 \times 10^{-6}$ para $5{,}7 \times 10^{-7}$ $m.s^{-1}$. Os autores sugerem que a adição deste biopolímero

tem a capacidade de aumentar a ligação entre as partículas e melhorar significativamente as propriedades mecânicas e hidráulicas de solos arenosos.

Zhang *et al*. (2024) observaram que a alta viscosidade de biopolímeros, como a goma xantana, promoveu uma selagem eficaz da rede porosa de um solo siltoso, reduzindo o coeficiente de permeabilidade de $2{,}29 \times 10^{-5}$ para $3{,}16 \times 10^{-7}$ cm.s^{-1} para um percentual de 0,5% de incremento da goma com 28 dias de cura. Esse efeito deriva da obstrução física e redução da conectividade dos poros, o que contribui diretamente para a durabilidade e resistência à erosão hídrica do material.

Kumar *et al.* (2023) obtiveram reduções no valor de *k* ainda mais abruptas. A adição de 2% de goma guar em uma areia argilosa mal graduada reduziu esse coeficiente de 1.10^{-3} para 1.10^{-7} cm.s^{-1} para amostras com 3 dias de cura. Esse valor pode ser ainda mais reduzido para tempos de cura de 56 e 120 dias, chegando a valores menores que 1.10^{-8} cm.s^{-1}.

No entanto, um estudo experimental demonstrou efeito adverso em relação à redução de *k*. Biju e Arnepalli (2020) e misturaram areia fina e bentonita acrescida de goma guar e de goma xantana em variados percentuais com mistura úmida. Os autores verificaram que houve ligeiro aumento no valor de k para todas as amostras, no entanto, ainda se enquadrando nos parâmetros normativos de *k*. Verificou-se que a adição de biopolímeros em contato com a bentonita induziu a agregação de plaquetas de argila, o que, por sua vez, ampliou os caminhos de fluxo das camadas. Então, deve-se ter atenção especial no estudo experimental levando em consideração a fração argilosa presente no solo.

4.4 Retenção de água

Estudos recentes sobre os efeitos de biopolímeros adicionados em solos têm apontado para alterações na capacidade de retenção de água. Hamza *et al.* (2023) avaliaram o comportamento de um solo argiloso de alta plasticidade incrementado com 1% de goma xantana. Esses autores verificaram que, após 12 ciclos de congelamento/descongelamento, a perda de umidade reduziu em 51% quando comparado ao solo não tratado.

Resultados semelhantes foram observados por Shalchian *et al.* (2025), que utilizaram quitosana reforçada com biochar de casca de arroz e fibra de cânhamo em uma mistura de 60% areia e 40% caulinita. Os autores investigaram a influência direta do aumento no teor de quitosana na capacidade de absorção de água da mistura e constataram um aumento significativo do teor de umidade ótimo (OMC), devido à característica hidrofílica do biopolímero. Assim, o OMC foi de 12,9% (solo puro) para 13,9%, 14,3% e 14,7% nas proporções de 1,5%, 3% e 4,5% de quitosana, respectivamente.

Esse efeito deriva, principalmente, da estrutura química dos biopolímeros, tais como goma guar e goma xantana, cuja área superficial específica moderada permite estabelecer ligações de hidrogênio com as moléculas de H_2O (Liu *et al*., 2023). Concomitantemente, o tipo de solo pode potencializar a capacidade de retenção de água na mistura por meio do desenvolvimento das ligações solo-biopolímero, visto que os grupos hidroxila dos biopolímeros são adsorvidos pelos cátions dos minerais presentes na superfície dos grãos do solo.

Tal observação é discutida no trabalho de Kumar *et al*. (2023), no qual concluíram que os mecanismos de interação da goma xantana com a areia e argila são, respectivamente, forças de van der Waals fracas e ligações de hidrogênio. Dessa forma, o comportamento observado acerca da retenção de água pode se diferenciar entre os tipos existentes de solo.

Nota-se, ainda, que as alterações na capacidade de retenção de água no solo podem ser analisadas indiretamente por outros índices mecânicos. Kumar *et al*. (2023), por exemplo, ao testar incrementos de goma guar de 0,5% e 2% em uma mistura areno-argilosa mal graduada, obtiveram aumentos de 1,44 e 4,40 vezes, respectivamente, no índice de compressão dos solos. Tal aumento pode ser explicado pela formação de hidrogéis dos biopolímeros, que leva ao aumento dos espaços vazios e à elevação da compressibilidade, à medida que se aumenta a dosagem de goma guar.

Portanto, a característica hidrofílica dos biopolímeros contribui para aumento na retenção de água no solo, que tem consequências práticas na coesão e na resistência do solo, tornando possível sua utilização em camada de base de estradas, taludes e aterros (Kumar *et al.,* 2025), bem como em solos de cultivo, ao melhorar a resiliência às mudanças climáticas em ambientes de clima seco (Liu *et al*., 2024).

4 DISCUSSÃO CRÍTICA

O incremento de biopolímeros em camadas de solos compactados tem se consolidado como uma alternativa promissora na geotecnia ambiental. Estudos recentes indicam melhorias significativas na consistência, na resistência ao cisalhamento, na redução da permeabilidade e no aumento da capacidade de retenção de água. Tais avanços estão associados à formação de uma matriz gelificada que envolve as partículas do solo, promovendo interações físico-químicas entre solo e biopolímero. Esse mecanismo favorece a agregação estrutural, a redução do índice de vazios e a obstrução de caminhos preferenciais de fluxo, contribuindo para o desempenho hidráulico da camada.

A durabilidade constitui um dos principais desafios técnicos. Por se tratar de materiais com elevada fração orgânica, os biopolímeros estão sujeitos à degradação biológica, especialmente em ambientes com elevada atividade microbiana, umidade e temperatura favoráveis. Esse processo pode comprometer a estabilidade estrutural do gel formado e, consequentemente, alterar as propriedades hidráulicas e mecânicas ao longo do tempo. Estratégias como a utilização de retardadores de atividade microbiana, o controle do teor de umidade, a modificação química e os processos de reticulação durante a preparação dos biopolímeros têm sido apontadas como alternativas para aumentar a resistência à biodegradação e ampliar a vida útil da camada impermeabilizante.

Outro aspecto determinante refere-se ao tempo de cura e ao método de incorporação do biopolímero (via seca ou via úmida). O processo de cura influencia diretamente a formação da rede polimérica e a interação com as partículas do solo. Resultados experimentais relatados por Ali *et al.* (2025) indicam que a coesão aumentou de aproximadamente 100 kPa, no solo natural, para até 348 kPa em amostras com 1% de pectina após 28 dias de cura, evidenciando o papel do tempo na consolidação das ligações estruturais. Esses dados reforçam que o desempenho não depende apenas da dosagem, mas também das condições de hidratação e da evolução microestrutural do material.

Adicionalmente, os efeitos da temperatura e da interação com contaminantes ainda são pouco explorados. Variações térmicas podem influenciar a viscosidade do gel e a estabilidade das ligações intermoleculares, enquanto a presença de lixiviados ricos em íons e compostos orgânicos pode alterar o comportamento físico-químico do biopolímero. Mohammadian *et al.* (2024) destacam que determinados biopolímeros apresentam elevada capacidade de adsorção de metais pesados, sugerindo que essas camadas podem desempenhar dupla função: atuar como barreira hidráulica e como meio reativo de retenção de contaminantes. Contudo, a saturação desses sítios ativos ao longo do tempo e seus efeitos na condutividade hidráulica ainda precisam ser melhor compreendidos.

Do ponto de vista econômico, Kumar *et al.* (2023) indicam que solos tratados com 2% de goma guar podem apresentar custos até 77% inferiores em comparação a revestimentos convencionais com bentonita. Essa diferença reforça o potencial competitivo dos biopolímeros, sobretudo em regiões onde não há disponibilidade de bentonita ou que apresente elevado custo de transporte.

No contexto das mudanças climáticas, o uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização de base ganha relevância estratégica. Projeções climáticas indicam aumento na frequência de eventos extremos, como chuvas intensas e períodos prolongados de seca. Esses cenários impõem às barreiras hidráulicas maiores gradientes hidráulicos, ciclos mais severos de umedecimento e secagem e variações térmicas acentuadas.

Solos tratados com biopolímeros podem reduzir a suscetibilidade à fissuração por retração, fenômeno crítico em *liners* compactados submetidos a secas prolongadas. A mitigação de fissuras é essencial para evitar a formação de caminhos preferenciais de fluxo e o consequente aumento da percolação de lixiviados. Além disso, o aumento da resistência ao cisalhamento contribui para a estabilidade global do sistema de base, especialmente sob condições de saturação variável.

Sob a ótica da geotecnia ambiental, esses materiais se inserem em uma agenda de soluções de menor pegada de carbono, uma vez que podem reduzir a dependência de materiais industrializados de alta energia incorporada. Entretanto, práticas de projeto devem evoluir para incorporar análises de desempenho sob cenários climáticos diversos, incluindo ensaios de durabilidade acelerada, ciclos térmicos e hidráulicos, e avaliação da biodegradação ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise do comportamento de solos tratados com biopolímeros para aplicação em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, podem-se estabelecer as seguintes conclusões:

- A incorporação de biopolímeros promove alterações relevantes nos limites de consistência, geralmente associadas ao aumento da plasticidade e da coesão aparente. A formação de uma matriz gelificada ao redor das partículas minerais contribui para maior estabilidade estrutural e menor dispersão das frações finas, favorecendo um comportamento mais homogêneo da camada compactada.
- A presença de biopolímeros influencia a curva de compactação, aumentando levemente a umidade ótima e reduzindo o peso específico seco máximo.
- O tratamento com biopolímeros resulta em ganhos expressivos de coesão, resultado da formação de pontes poliméricas entre partículas e ao reforço da estrutura do solo.
- Um dos principais benefícios observados é a redução da permeabilidade, fundamental para aplicação em sistemas de barreira, decorrente da obstrução dos poros e da diminuição da conectividade entre vazios.
- O aumento da capacidade de retenção de água contribui para maior estabilidade da camada frente a ciclos de umedecimento e secagem, reduzindo a suscetibilidade à retração e à formação de fissuras.

Os biopolímeros representam uma alternativa tecnicamente viável para melhoria de solos destinados à impermeabilização de base, promovendo avanços simultâneos em propriedades mecânicas e hidráulicas. Portanto, o avanço do uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização não depende apenas da comprovação de ganhos imediatos de resistência e redução de permeabilidade, mas de considerações acerca da durabilidade, variabilidade ambiental e resiliência climática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo incentivo para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, Z. S.; Fattah, M. Y.; Al-Gharbawi, A. S. A. (2025) Strength and Compressibility Characteristics of Clay Treated by Pectin Biopolymer. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, v. 5.

Babatunde, Q. O.; Kim, H. J.; Byun, Y. H. (2024) Shear strength improvement of sandy soils using zein biopolymer. *Results in Engineering*, v. 24, p. 102891.

Biju, M.S.; Arnepalli, D. N. (2020) Effect of biopolymers on permeability of sand-bentonite mixtures. *Journal of Rock Machanics and Geotechnical Engineering*, v. 12, p. 1093-1102.

Boscov, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. Oficina de Textos, 2008.

Cabalar, A. F.; Akbulut, N.; Demir, S.; Yildiz, O. (2023) Use of a Biopolymer for Road Pavement Subgrade. *Sustainability*, v. 15 (10), p. 8231.

Chang, I.; Lee, M.; Tran, A. T. P.; Lee, S.; Kwon, Y. M.; Im, J.; Cho, G. C. (2020) Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, v. 24.

Cheng, Z.; Geng, X. (2023) Investigation of unconfined compressive strength for biopolymer treated clay. *Construction and Building Materials*, v. 385, p. 131458.

Dagliya, M.; Satyam, N.; Garg, A. (2023) Desert sand stabilization using biopolymers: review. *Smart Construction and Sustainable Cities*, v. 1 (5).

Das, A.; Ringu, T.; Ghosh, S.; Pramanik, N. (2023) A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, v. 80 (7), p. 7247–7312.

Dehghan, H.; Tabarsa, A.; Latifi, N.; Bagheri, Y. (2018) Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 21, p. 155-165.

Hamza, M.; Nie, Z.; Aziz, M.; Ijaz, N.; Akram, O.; Fang, C.; Ghani, M. U.; Ijaz, Z.; Noshin, S.; Madni, M. F. (2023) Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environmental Earth Sciences*, v. 82 (3), p. 91.

Ilman, B.; Balkis, A. P. (2023) Sustainable biopolymer stabilized earthen: Utilization of chitosan biopolymer on mechanical, durability, and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 107220.

Kumar, S. A.; Sujatha, E. R. (2022) Assessing the potential of xanthan gum to modify in-situ soil as baseliners for landfills. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, p. 10613–10624.

Kumar, S. A.; Sujatha, E. R.; Pugazhendi, A.; Jamal, M. T. (2023) Guar gum-stabilized soil: a clean, sustainable and economic alternative liner material for landfills. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 25, p. 323–341.

Kumar, M. A.; Moghal, A. A. B.; Rasheed, R. M.; Rehman, A. U. (2025) Enhancing durability and erosion resistance of soils with varying plasticity using crosslinked biopolymers. *Scientific Reports*, v. 15 (1).

Liu, J.; Che, W.; Lan, X.; Hu, M.; Qi, M.; Song, Z.; Sun, M.; Jing, M.; Qian, W.; Qi, C. (2023) Performance and mechanism of a novel biopolymer binder for clayey soil stabilization: Mechanical properties and microstructure characteristics. *Transportation Geotechnics*, v. 42, p. 101044.

Liu, Y; Ni, J.; Gu, J.; Liu, S.; Huang, Y.; Sadeghi, H. (2024) Influence of biopolymer-vegetation interaction on soil hydro-mechanical properties under climate change: A review. *Science of The Total Environment*, v. 954, p. 176535.

Middelhoff, M.; Cuisinier, O.; Masrouri, F.; Talandier, J.; Conil, N. (2020) Combined impact of selected material properties and environmental conditions on the swelling pressure of compacted claystone/bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, v. 184.

Mohammadian, F.; Bonab, B. A.; Oliaei, M. (2024) A comprehensive review of biodegradable biopolymers' challenges and performance in improving soil mechanical characteristics. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 680.

Ng, C. W. W.; So, P. S.; Lau, S. Y.; Zhou, C.; Coo, J. L.; Ni, J. J. (2020) Influence of biopolymer on gas permeability in compacted clay at different densities and water contents. *Engineering Geology*, v. 272.

Pydi, R.; Yadu, L.; Chouksey, S. K. (2024) Evaluation of Xanthan and Guar Gum for Stabilising Soil in Terms of Strength Parameters - A Review. *Indian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 4, p. 1621–1643.

Sarsby, R. W. *Environmental Geotechnics*. ICE Publishing, 2ª ed., 2013.

Shaji, S.; Gade, V. K.; Sundaram, B.; Bande, G. R. Evaluating the Effectiveness of Xanthan Gum Biopolymer as a Soil Stabiliser. Indian Geotech J, 2024.

Shalchian, M. M.; Arabani, M.; Farshi, M.; Ranjbar, P. Z.; Khajeh, A.; Payan, M. (2025) Sustainable construction materials: Application of chitosan biopolymer, rice husk biochar, and hemp fibers in geo-structures. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22.

Tasuji, M. A.; Ghadir, P.; Hosseini, A.; Javadi, A. A.; Korayem, A. H.; Ranjbar, N. (2024) Experimental investigation of sandy soil stabilization using chitosan biopolymer. *Transportation Geotechnics*, v. 46.

Zhang, J.; Cheng, Y.; Liu, J.; Jiang, T.; Sun, D. (2024) Permeability of xanthan gum-improved silty soil and its prediction model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 83, p. 130.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/121

Uso de Resíduo de Mármore Para Estabilização de Solos Expansivos: Uma Revisão Sistemática

Melissa de Jesus Menezes
Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, melissamenezesj@gmal.com

Maria do Socorro Costa São Mateus
Professora Doutora, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, socorro@uefs.br

RESUMO: O uso de resíduos industriais na engenharia geotécnica tem se consolidado como alternativa sustentável à estabilização convencional de solos, destacando-se o pó de mármore pelo elevado volume gerado e pelo potencial de aplicação em solos expansivos. Este trabalho tem como objetivo apresentar as pesquisas existentes na literatura referentes ao tema, buscando destacar os benefícios que têm sido alcançados. Foi realizada uma revisão sistemática de estudos publicados nos últimos onze anos, analisando ensaios empregados, faixas de dosagem e efeitos nas propriedades físicas, mecânicas, volumétricas e microestruturais. A revisão não encontrou concordância unânime entre os resultados, mesmo para solos e teores semelhantes. Observou-se que a resposta do solo depende fortemente da mineralogia, do tipo de resíduo, da dosagem, do método de ensaio e do tempo de cura, resultando em grande variabilidade nos parâmetros e critérios de interpretação. Embora predomine a indicação de redução da plasticidade e da expansibilidade e aumento da resistência e da capacidade de suporte, os resultados são heterogêneos. Os resultados da pesquisa evidenciam a necessidade de metodologias mais uniformes e estudos integrados para o avanço do uso do pó de mármore na engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de mármore, Solos expansivos, Estabilização de solos, Geotecnia ambiental.

ABSTRACT: The use of industrial waste in geotechnical engineering has established itself as a sustainable alternative to conventional soil stabilization, with marble dust standing out due to the high volume generated and its potential for application in expansive soils. This study aims to present existing research in the literature on the subject, seeking to highlight the benefits that have been achieved. A systematic review of studies published in the last eleven years was conducted, analyzing the tests used, dosage ranges, and effects on physical, mechanical, volumetric, and microstructural properties. The review did not find unanimous agreement among the results, even for similar soils and contents. It was observed that the soil response depends heavily on mineralogy, waste type, dosage, test method, and curing time, resulting in great variability in the parameters and interpretation criteria. Although the indication of reduced plasticity and expansibility and increased strength and bearing capacity predominates, the results are heterogeneous. The research results highlight the need for more uniform methodologies and integrated studies to advance the use of marble powder in geotechnical engineering.

KEYWORDS: Marble waste, Expansive soils, Soil stabilization, Environmental geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos constituem um dos principais desafios geotécnicos associados à durabilidade e à segurança de obras de engenharia civil, em razão da sua elevada variação volumétrica com o teor de umidade. A presença de argilominerais como montmorilonita e esmectitas confere elevada capacidade de absorção de água, resultando em ciclos de expansão e retração (Lacerda et al., 2020). Tais variações volumétricas são provocadas exclusivamente pela variação de umidade, promovendo fissuração na superestrutura, recalques diferenciais e deformações excessivas em pavimentos, edificações e estruturas enterradas. A intensidade dos problemas provocados dependerá da pressão de expansão do solo e do carregamento ao qual ele está submetido, podendo este último conter os efeitos da pressão de expansão. Do ponto de vista da gênese, esses

solos podem derivar da alteração intempérica de rochas ígneas básicas, como basaltos, diabásios e gabros, cuja decomposição favorece a formação de esmectitas, especialmente montmorilonita. Também se originam de rochas sedimentares finas, como folhelhos, que são argilitos compostos predominantemente por ilita e montmorilonita, e, em menor escala, de calcários impuros (Fredlund; Rahardjo; Fredlund, 2012). No Brasil, apresentam ocorrência significativa, sobretudo na Região Nordeste, onde a alternância entre estiagens prolongadas e chuvas intensas intensifica as variações de umidade. Os primeiros registros nacionais associam-se a problemas em obras rodoviárias (Sobral, 1956). Diversas técnicas têm sido empregadas para mitigar a expansibilidade, como substituição do solo e estabilização com cal e cimento, embora impliquem custos elevados e impactos ambientais relevantes (Albuquerque et al., 2020). Dosagem dos solos expansivos com areias, RCC (resíduos da construção civil) e outros resíduos sólidos têm sido testados, resultando na redução significativa da expansão. Paralelamente, o avanço da atividade industrial ao longo dos anos tem intensificado a geração de resíduos sólidos, cujo descarte inadequado representa um passivo ambiental significativo, enquanto seu reaproveitamento na construção civil se insere em estratégias voltadas à sustentabilidade. No setor de rochas ornamentais, a produção de resíduos finos é particularmente expressiva, sendo frequentemente associado à degradação de áreas de disposição, assoreamento de corpos hídricos e impactos sobre a qualidade do solo e da água. A valorização desses resíduos como insumos para a construção civil surge, portanto, como estratégia alinhada aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, o uso de pó de mármore tem sido progressivamente investigado (Jain, 2020), motivado por sua disponibilidade e por sua composição rica em cálcio, capaz de interferir positivamente nas interações físico-químicas do solo. Sua incorporação promove alterações granulométricas, troca catiônica, floculação e redução da plasticidade. Todavia, apesar do crescente número de pesquisas, observa-se dispersão quanto às dosagens, aos ensaios e aos critérios de definição de teores ótimos, dificultando a consolidação do conhecimento. Assim, torna-se necessária uma análise sistemática que identifique convergências e lacunas, fornecendo base técnica mais consistente para o uso do pó de mármore na estabilização de solos expansivos.

2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido por meio de revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar, organizar, discutir as informações encontradas e apresentar de forma sistematizada o uso de resíduos de mármore na estabilização de solos expansivos, com ênfase nos métodos experimentais, faixas de dosagem e critérios de definição dos teores mais eficientes. As buscas foram realizadas nas bases Web of Science, ScienceDirect, Elsevier e Google Scholar, com apoio do software Litmaps. O recorte foi delimitado entre os anos de 2014 e 2025, priorizando a produção recente, sem desconsiderar os conceitos e os trabalhos precursores. Das 60 publicações identificadas, 25 foram selecionadas após triagem com base em critérios de inclusão.

A análise foi conduzida em duas etapas complementares. A análise bibliométrica considerou o ano de publicação e o país de origem dos estudos, permitindo visualizar a evolução temporal e a distribuição geográfica da produção científica. A análise sistemática concentrou-se nos aspectos técnicos, contemplando: áreas investigadas; teores de substituição e faixas de dosagem; ensaios laboratoriais realizados; identificação de argilominerais; condições de cura; e impactos nas propriedades físicas e mecânicas. Com base nesses dados, foram elaborados gráficos comparativos, possibilitando identificar convergências, divergências e lacunas, bem como indicar faixas de dosagem com resultados que alcançaram o efeito desejado.

3 RESULTADOS

3.1 Distribuição temporal e geográfca dos estudos

3.1.1 Evolução cronológica

A Figura 1 apresenta a quantidade de trabalhos no tema, durante o período 2014 – 2025.

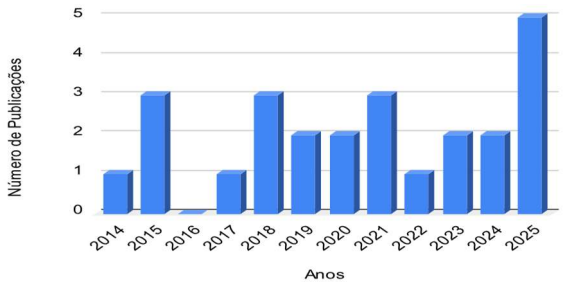


Figura 1. Número de trabalhos relacionados ao longo dos anos.

Conforme se observa, a Figura 1 evidencia não apenas o baixo número de publicações ao longo do período analisado, mas também uma tendência recente de crescimento da produção científica, especialmente no ano de 2025 que apresentou um aumento superior a 60%. Verifica-se que entre 2016 e 2017, praticamente a quantidade de estudos foi incipiente, sendo retomados em 2018 e prosseguindo com as produções até 2025. Observa-se também que houve uma queda em 2022, ano imediatamente após o período de pandemia da COVID, quando as pesquisas experimentais ficaram limitadas. Entre 2023 e 2025, a retomada do interesse acadêmico, pode estar associada à intensificação do debate sobre sustentabilidade, economia circular e reaproveitamento de resíduos industriais na engenharia. A figura mostra ainda que o tema permanece em fase de consolidação científica e demanda maior quantidade de investigações.

3.1.2 Distribuição geográfica dos estudos

A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica dos estudos realizados no período de 2014 à 2025.

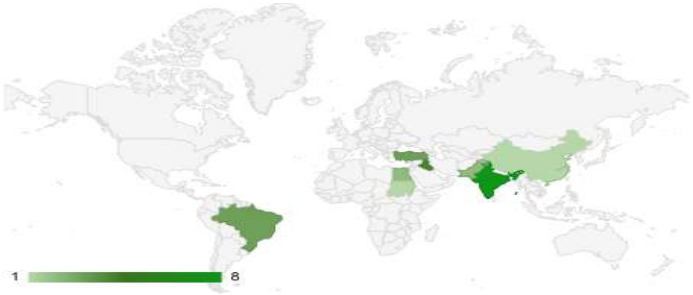


Figura 2. Distribuição geográfica dos estudos.

Conforme ilustrado na Figura 2, observa-se a produção científica concentrada majoritariamente na Índia e em países do Oriente Médio, como Iraque, Turquia, Sudão e Chipre, que juntos respondem por 68% das publicações analisadas. Esse protagonismo está diretamente associado à elevada geração de resíduos de mármore e à ampla ocorrência de solos expansivos nessas regiões. Na Índia, cerca de 95% da produção nacional de mármore concentra-se no estado do Rajastão, considerado um dos maiores pólos produtores do mundo, onde o descarte de aproximadamente 70% do material extraído tem causado impactos ambientais significativos, como aumento da alcalinidade, degradação do solo e redução da fertilidade (Jain, 2020). Adicionalmente, grandes extensões do território indiano são recobertas pelos chamados “Black Cotton Soil”, ricos em montmorilonita, argilomineral responsável por elevada expansividade, sob ciclos de umedecimento e secagem típicos do clima de monções (Gokani et al., 2018), explicando a elevada produção científica regional, voltada à mitigação simultânea de problemas geotécnicos e ambientais com o reaproveitamento de resíduos de mármore. Em contraste, o Brasil apresenta participação reduzida, apesar de estar entre os maiores produtores mundiais de mármore (Chiodi, 2021), indicando uma lacuna relevante entre potencial industrial e desenvolvimento científico aplicado.

Além dos fatores produtivos, o protagonismo científico observado nesses países está fortemente associado às condições climáticas e geológicas regionais. Índia, Iraque, Turquia, Sudão e Chipre apresentam climas predominantemente áridos a semiáridos, ou tropicais com marcada sazonalidade hídrica, caracterizados por ciclos intensos de umedecimento e secagem, que potencializam o comportamento expansivo dos solos. Do

ponto de vista geológico, essas regiões são amplamente constituídas por formações sedimentares e rochas basálticas e calcárias, cujo intemperismo químico favorece a formação de argilas do grupo das esmectitas, especialmente a montmorilonita. A associação entre clima sazonal, geologia favorável à formação de argilas expansivas e elevada disponibilidade de resíduos carbonáticos oriundos da mineração de mármore explica a concentração de estudos voltados à estabilização desses solos.

3.2 Ensaios utilizados

A avaliação do sucesso da estabilização de solos expansivos com pó de mármore é conduzida, na literatura analisada, por meio de um conjunto de ensaios laboratoriais, selecionados conforme os objetivos de cada pesquisa, a disponibilidade de infraestrutura e a relevância dos parâmetros a serem investigados. De modo geral, os autores combinam ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica e microestrutural, buscando compreender não apenas o desempenho mecânico do solo estabilizado, mas também os mecanismos responsáveis pela redução da expansibilidade. Nesse contexto, a Figura 4 apresenta a síntese dos ensaios empregados, bem como sua recorrência na bibliografia.

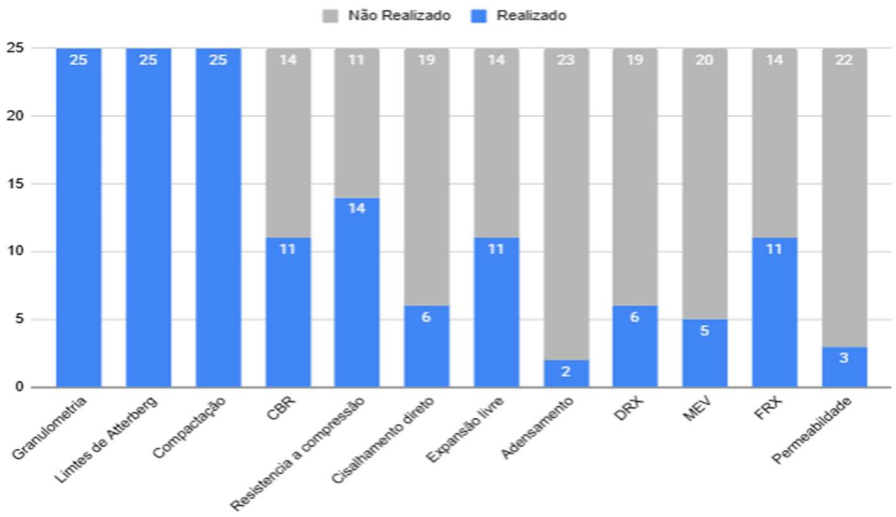


Figura 3. Ensaios usados nas diferentes amostras estudadas.

A Figura 3 evidencia os seguintes ensaios para verificar o efeito do uso do resíduo no solo: limites de Atterberg, compactação, resistência a compressão e ensaios de expansão livre. Os ensaios mineralógicos e microestruturais, como DRX, MEV e FRX, foram menos recorrentes, embora sejam fundamentais na interpretação dos mecanismos de interação entre o pó de mármore e os argilominerais, permitindo compreender a eficácia e a durabilidade do processo de estabilização. Dentre os três ensaios de mineralogia, geralmente dois deles são suficientes, sendo o MEV muito útil. É importante destacar que, independente dos parâmetros geotécnicos a serem estudados, é premissa básica realizar os ensaios de caracterização (massa específica dos grãos, granulometria e limites de Atterberg), para entender qual tipo de material está sendo avaliado. Além disso, quando se realiza dosagem de solos, os ensaios de compactação são obrigatórios para definir as condições ótimas de umidade e massa específica seca máxima a serem aplicadas no campo, de forma a garantir desempenho mecânico adequado. Quanto ao ensaio de expansão livre, este de fato avalia a eficácia da dosagem na redução do potencial de expansão, repercutindo na melhoria das propriedades mecânicas (resistência, adensamento, CBR) e hidráulicas (permeabilidade).

À luz das contribuições de Ferreira et. al (1997) e Presa (1997), observa-se que os estudos revisados ainda apresentam lacunas metodológicas relevantes na investigação de solos expansivos estabilizados. Predominam ensaios indiretos, enquanto são pouco frequentes avaliações edométricas diretas para determinação da tensão de expansão, especialmente sob condição de volume constante e considerando a trajetória de tensão durante a inundação, decisiva porque a sequência de carregamento e molhagem pode resultar em expansão ou colapso. Também são raros os estudos que incorporam ciclos de umedecimento e secagem para avaliar a propagação de fissuras e a fadiga de expansão, processos que degradam

progressivamente a resistência e a durabilidade do solo. Além disso, a limitada análise do tempo de cura pode subestimar a evolução das reações pozolânicas e do desempenho com o passar do tempo. Essas limitações indicam a necessidade de abordagens mais abrangentes voltadas à segurança e ao comportamento a longo prazo em condições reais de serviço.

3.2.1 Caracterização física

Os limites de consistência, o índice de plasticidade (IP) e o índice de atividade constituem parâmetros iniciais e fundamentais para a avaliação do potencial expansivo dos solos, pois refletem a quantidade de água requerida para transição entre estados físico–mecânicos, bem como a reatividade e coesão interna das partículas. De modo geral, os estudos analisados indicam que a incorporação de pó de mármore tende a promover a redução da plasticidade, estando esse comportamento associado tanto à presença de óxido de cálcio (CaO) no resíduo quanto à diminuição da fração argilosa na mistura.

Gokani et al (2018) ao estudar um “Black Cotton Soil” observou redução significativa do índice de plasticidade com o aumento do teor de resíduo, passando de 24,18% para 11,67% na adição de 30%, em massa. Resultado semelhante foi reportado por Fathonah et al. (2023), no estudo de uma argila orgânica de alta plasticidade da região vulcânica quaternária de Serang (Indonésia), derivada do intemperismo de depósitos de tefra e andesitos, em que o IP diminuiu à medida que aumentava a porcentagem de pó de mármore incorporado. Segundo os autores, esse comportamento está relacionado ao elevado teor de CaO presente no resíduo, que reage com a água do solo formando $Ca(OH)_2$, de natureza alcalina, acelerando o processo de ligação entre as partículas e favorecendo a agregação, o que reduz a deformabilidade do solo. De forma convergente, Jassim et al. (2022), ao estudarem um solo silte argiloso aluvionar, também atribuíram a redução do IP à formação de hidróxido de cálcio e ao aumento das ligações interpartículas. Jain et al. (2020) ressaltam que o desempenho do solo estabilizado com pó de mármore depende da composição mineralógica do solo, do teor de elementos químicos do resíduo e do tipo de solo analisado. Nessa revisão, observou-se redução da plasticidade com o aumento do teor de resíduo, todavia, a magnitude do efeito do pó de mármore sobre a plasticidade do solo é dependente da mineralogia do solo, da composição química do resíduo e do teor adotado, sendo que no universo da literatura adotada, esses teores de adição, em relação à massa de solo, variaram amplamente de 3% a 90%.

Como paralelo, Lacerda et al (2020), ao investigar a estabilização de um solo potencialmente expansivo com cinza de casca de arroz, verificou que o aumento do teor de CCA promoveu substituição parcial da fração argilosa por um resíduo de menor superfície específica. Como efeito da reação pozolânica, ocorreu cimentação entre os grãos do solo e a cinza, mantendo praticamente constante o Limite de Liquidez e promovendo aumento progressivo do Limite de Plasticidade, o que resultou na redução do índice de plasticidade. Embora se trate de outro material, o estudo denota que a adição em massa de resíduos finos com capacidade de interação química altera a estrutura do solo e repercute diretamente nos índices físicos, evidenciando que as características físico-químicas do resíduo são determinantes para a redução do IP.

3.2.2 Caracterização mineralógica

No universo das literaturas analisadas, observa-se que apenas cerca de 40% dos trabalhos realizaram efetivamente a caracterização mineralógica por DRX, o que limita comparações e evidencia uma lacuna metodológica na literatura.

Os estudos de Abdulla e Majeed (2021) evidenciam que a eficiência do pó de mármore como estabilizante não depende apenas do teor adicionado, mas está fortemente condicionada à mineralogia do solo e à origem geológica do resíduo, pois, para um mesmo teor de 30% de adição, os solos de Bastora (BA) e da Região do Aeroporto de Erbil (EA) apresentaram respostas distintas. O solo de Bastora desenvolve-se a partir do intemperismo das formações Mukdadiya e Injana, com ocorrência de terraços fluviais, enquanto o solo do Aeroporto de Erbil, é constituído por espessa camada de sedimentos quaternários não consolidados. Além disso, verificou-se que diferentes pós de mármore produziram desempenhos distintos quando aplicados ao mesmo solo. Com 30% de adição, o pó de mármore de Penjwen promoveu reduções do índice de plasticidade de aproximadamente 46,2% no

solo de BA e 49,3% no solo de EA, enquanto o pó de Pirmam reduziu 31,4% e 35,9%, respectivamente. Essa eficácia superior do pó de Penjwen é atribuída à sua origem metamórfica, associada à composição mineralógica mais favorável (calcita recristalizada e menor influência de rochas carbonáticas não metamorfizadas), ao passo que o pó de Pirmam, de origem sedimentar e com maior teor de minerais carbonáticos, apresentou menor eficiência na modificação dos índices físicos.

3.2.3 Caracterização mecânica

Os resultados dos ensaios de compactação indicam, de forma geral, que a adição de pó de mármore tende a aumentar a densidade aparente seca máxima e reduzir o teor de umidade ótima (w_{ot}), embora esse comportamento não seja uniforme para todos os solos e teores analisados. Sharma et al (2025) observou em solo argiloso aluvial, formado por sedimentos ricos em ilita, clorita, esmectita e caulinita, melhorias significativas para 15% de adição com aumento da densidade seca e redução da (w_{ot}), evidenciando benefícios diretos para aplicações em subleitos. Tendência semelhante foi reportada por Hwayyiz et al. (2023), em solo expansivo da região de Erbil, que identificaram comportamento ótimo para 18% de adição, associado à melhoria da granulometria e ao aumento da concentração de eletrólitos na água dos poros, favorecendo a floculação das partículas. Diversos autores associam a redução da (w_{ot}) à diminuição da fração argilosa e da área superficial específica.

Nos ensaios de resistência à compressão não confinada, a maioria dos estudos aponta ganhos expressivos, embora novamente dependentes do teor e do tipo de solo. Em solo expansivo originado de sedimentos aluviais derivados do intemperismo de rochas ígneas e metamórficas do Planalto Etíope, Zumrawi (2018) reportou aumento de até 3,7 vezes na resistência com 20% de pó de mármore, enquanto Sharma et al (2025) observou incremento de até 4 vezes após 28 dias de cura para o teor de 15%. Esses ganhos são atribuídos à formação de compostos cimentantes, decorrentes de reações pozolânicas envolvendo o CaO presente no resíduo. Contudo, em um solo argiloso analisado por Umar et al (2024), derivado do intemperismo de granitos peraluminosos e rochas metamórficas, com mineralogia predominantemente caulinítica, nota-se que teores excessivos podem ser prejudiciais, por identificar redução da resistência para adições acima de 75%, indicando um limite superior de eficiência.

Os ensaios de expansão livre e CBR confirmam a eficácia do pó de mármore na estabilização de solos expansivos. Reduções significativas do inchamento, em alguns casos próximas à eliminação do comportamento expansivo, foram observadas para teores em torno de 15%, acompanhadas por aumentos expressivos do CBR, inclusive em condição saturada (Sharma et al, 2025). Esses ganhos são atribuídos à redução da fração argilosa ativa, à melhor compactação e ao adensamento da matriz do solo. As análises por MEV reforçam essa interpretação ao indicar estruturas mais densas, com menor porosidade e melhor ligação interpartículas, evidenciando o potencial do pó de mármore para aplicações em subleitos e sub-bases rodoviárias. Adicionalmente, uma vez que a resistência à compressão não confinada e ao cisalhamento tendem a evoluir com o avanço da cura (Umar et al, 2024), novas pesquisas serão importantes, considerando-se que apenas cerca de 36% dos trabalhos analisados considerarem diferentes idades de cura.

3.3 Análise do teor ideal

A análise comparativa das dosagens investigadas evidencia que os teores de 20% e 30% de pó de mármore foram utilizadas na maior parte dos estudos, configurando-se como as faixas mais recorrentes de desempenho favorável. O teor de 20% foi adotado como ótimo em pesquisas conduzidas na Índia, Turquia, Paquistão e Sudão, indicando um consenso quanto à eficácia dessa dosagem na mitigação da expansibilidade e na melhoria das propriedades mecânicas do solo, mesmo em contextos geográficos distintos. Já o teor de 30% destacou-se como o mais frequentemente indicado como ideal em estudos realizados no Brasil, Índia, Iraque e Turquia, sendo que, em trabalhos indianos e brasileiros, essa convergência está associada a solos com predominância de montmorilonita, argilomineral reconhecido por sua elevada capacidade de expansão, e sendo o pó de mármore empregado, em sua maioria, proveniente de rocha metamórfica calcária.

Entretanto, os estudos conduzidos na Turquia, Paquistão e Sudão não apresentam análises mineralógicas por DRX. Essa ausência dificulta a verificação da similaridade mineralógica com os estudos indianos que

adotaram 30% como teor ótimo de resíduo e limita a interpretação dos mecanismos responsáveis pelo desempenho observado.

Nos estudos conduzidos na Turquia por Soğanci et al (2023), foram analisadas argilas de baixa (CL) e alta plasticidade (CH), ambas de origem predominantemente vulcânica, associadas a tufos e materiais sedimentares neógenos da região da Capadócia. O pó de mármore utilizado foi proveniente de mármore metamórfico calcítico com teor elevado de CaO (54,25%). Nesses casos, observou-se que a resposta do solo à estabilização variou em função da plasticidade: solos do tipo CH apresentaram aumento proporcional mais significativo na densidade seca máxima e redução mais acentuada do teor ótimo de umidade, em comparação aos solos CL. Tais diferenças foram atribuídas à maior capacidade de troca catiônica e à espessura da dupla camada difusa em argilas de alta plasticidade, o que intensifica os efeitos da adição de Ca^{2+} proveniente do resíduo.

A Figura 4 ilustra a expressiva dispersão das faixas de dosagem investigadas na literatura e variabildade de teores adotados como ideais, reforçando a influência de fatores como mineralogia do solo, origem e composição do resíduo.

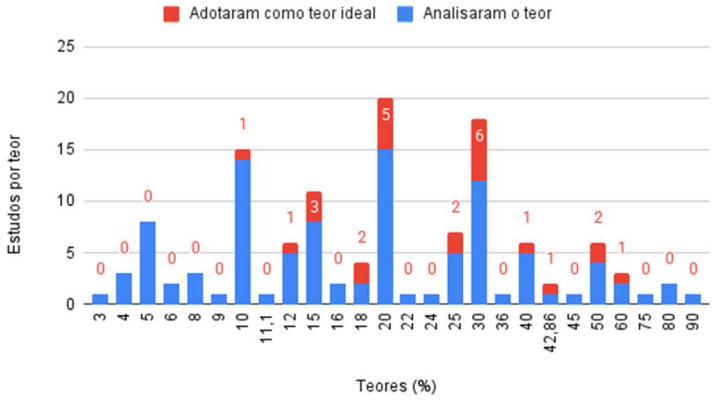


Figura 4. Recorrência dos teores analisados e adoção como dosagem ótima.

4 CONCLUSÃO

Esta revisão evidenciou que o pó de mármore apresenta elevado potencial como agente estabilizante de solos expansivos, promovendo reduções significativas da expansividade e melhorias relevantes nas propriedades físicas, mecânicas e funcionais do solo. De modo geral, a substituição parcial da fração argilosa por um material contribui para a diminuição da plasticidade, do inchamento e da sensibilidade à variação de umidade, além de favorecer o aumento da densidade seca, da resistência à compressão e da capacidade de suporte, ampliando a viabilidade do uso desses solos em obras geotécnicas e rodoviárias.

De modo geral, a incorporação do pó de mármore promove alterações granulométricas, troca catiônica imediata, floculação das partículas e redução das forças repulsivas intergranulares. A presença de CaO favorece a formação de $Ca(OH)_2$ e o desenvolvimento de reações pozolânicas com SiO_2 e Al_2O_3 presentes na matriz argilosa, resultando na formação de produtos cimentícios, responsáveis pelo incremento da resistência mecânica. Assim, quanto maior a pureza calcítica do mármore de origem, característica comum a rochas metamórficas derivadas de calcários recristalizados, maior tende a ser a disponibilidade de CaO e, consequentemente, o potencial de estabilização.

A análise também revelou lacunas importantes nos estudos existentes. Destacam-se a limitada consideração dos efeitos do tempo de cura, a pouca utilização de ensaios edométricos diretos para determinação da tensão de expansão, especialmente sob condição de volume constante e considerando a trajetória de tensão durante a inundação, e a escassez de investigações que avaliem o comportamento dos solos estabilizados sob ciclos sucessivos de umedecimento e secagem, condição mais representativa do desempenho em campo, incluindo a fadiga de expansão associada às variações volumétricas repetidas. Além disso, a ausência recorrente de caracterização mineralógica detalhada em parte dos estudos dificulta a correlação entre mecanismos microestruturais e respostas macroscópicas.

Dessa forma, conclui-se que, embora o uso do pó de mármore represente uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente favorável para a estabilização de solos expansivos, seu emprego deve ser precedido

por uma caracterização integrada do solo e do resíduo, bem como por análises que considerem a evolução temporal e os efeitos cíclicos de umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulla, R.; Majeed, N. (2021) Improvement of engineering properties of expansive soil using waste marble powder. *Iraqi Geological Journal*, 54 (1E), p. 43–53.

Albuquerque, F.C., Margalho, L.S.G., Burgos, P.C., Borges, L.M., Rivetti, M.L.S., Cardoso, L.S.P. (2020) Review of expansive soil stabilization methods. In: *Anais do VI Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia*. São Paulo: Blucher, p. 217–225.

Chiodi, C.F. (2021) *Balance of exports, imports and Brazilian domestic consumption of ornamental stones in 2020*. Brasília: ABIROCHAS, Informe n. 01/2021.

Fathonah, W.; Kusuma, R. I.; Mina, E.; Hasanah, N. D. (2023) Sustainable soil stabilization using marble dust waste on high plasticity soils: Physical and mechanical properties study. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 20 (4), p. 1–10.

Ferreira, S. R. M. (1997) Características de variação de volume de um Vertissolo devido à mudança do teor de umidade. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – ÑSAT*. Rio de Janeiro, p. 131–138.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D. (2012) *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Gokani, H. K.; Akoliya, K. D.; Davera, D. N.; Vaghela, P. J.; Patel, V. R. (2018) Efeito do pó de mármore residual nas propriedades índice de solos expansivos. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, v. 5, n. 11, p. 980-986.

Hwayyiz, C.A., Hasan, A.M., Hummadi, R.A., Ibrahim, H.H. (2023) Impact of marble powder on the geotechnical behavior of expansive soil. Zanco Journal of Pure and Applied Sciences, 35 (1), p. 30–37.

Jain, A.K., Jha, A.K., Shivanshi (2020b) Geotechnical behaviour and microanalysis of expansive soil treated with marble dust. *Soils and Foundations*, 60 (4), p. 737–751.

Jassim, N.W., Hassan, H.A., Mohammed, H.A., Fattah, M.Y. (2022) Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*, 14, 100436.

Lacerda, L. S. N.; Constantino, C. S.; Bezerra, A. L.; Ferreira, S. R. M. (2020) Influência da adição de cinza de casca de arroz em solos expansivos nos municípios de Paulista, Cabrobó e Brejo da Madre de Deus no estado de Pernambuco/Brasil. In: *Atas do 16.º Congresso Nacional de Geotecnia*, v. 1, p. 1321–1329.

Presa, E.P. (1997) The swelling fatigue in unsaturated expansive soils. In*: Proceedings of the 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*. Rio de Janeiro: ABMS, v. 1, p. 47–54.

Sharma, A.; Kour, J.; Senagah, A.; Tiwary, A. K.; Singh, K.; Juneja, G.; Verma, K.; Gupta, R.; Kumar, N. (2025) Eco-friendly stabilization of high plasticity soils using marble industry waste and molasses. Discover Materials, 5, 222.

Sobral, H. S. (1956) Contribuição ao estudo dos massapés como solos para construção. Tese (Cátedra de Matérias de Construção) – Escola de Belas Artes, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Soğancı, A. S.; Yenginar, Y.; Orman, A. (2023) Propriedades geotécnicas de solos argilosos estabilizados com pó de mármore e escória granulada de alto-forno. KSCE Journal of Civil Engineering, 27, p. 4622–4634.

Umar, I. H.; Lin, H. (2024) Marble powder as soil stabilizer: an experimental investigation of geotechnical properties and unconfined compressive strength analysis. Materials, 17, 1208

Zumrawi, M.M., Abdalla, E.A.E. (2018) Stabilization of expansive soil using marble waste powder. In: Conference Proceedings Civil Engineering, v. 2018.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/122

Utilização da Cinza da Casca de Arroz (CCA) como Agente Estabilizante para Solos Arenosos Finos em Palmas-TO

Janaina Lima de Araújo
Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil e Professora Mestre, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil janaina.araujo@uft.edu.br

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora Doutora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

Marcus Vinícius Ribeiro e Souza
Professor Doutor, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil, marcussouza@uft.edu.br

Thais Freitas Zenkner
Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, tfzenkner@gmail.com

RESUMO: Este estudo avaliou o uso da cinza da casca de arroz (CCA) como agente estabilizante em solos arenosos finos de Palmas-TO, com foco em sua aplicação em camadas de pavimentação asfáltica. A casca de arroz, subproduto da indústria arrozeira, quando descartada inadequadamente, gera impactos ambientais relevantes. Sua incineração produz a CCA, resíduo rico em sílica amorfa e com propriedades pozolânicas, que pode ser aproveitado na construção civil. Amostras de solo e CCA foram coletadas, caracterizadas química e fisicamente, e misturadas em proporções de 3%, 5% e 7% para análise de desempenho mecânico. Os ensaios laboratoriais incluíram granulometria, limites de Atterberg, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). O solo natural apresentou baixa plasticidade e ISC de 17%. A adição de CCA promoveu melhorias expressivas: 3% resultou em ISC de 83% e 5% atingiu 107%, atendendo às exigências para camadas de base e sub-base. Contudo, a proporção de 7% reduziu o desempenho (ISC de 51%) e apresentou expansão superior a 1%. Os resultados demonstram que a CCA aumenta a resistência do solo por efeito de preenchimento e reatividade da sílica, configurando alternativa sustentável para pavimentação. Estudos adicionais são recomendados para confirmar reações pozolânicas e avaliar o comportamento em diferentes condições geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Cinza de casca de arroz; Estabilização de solos; impactos ambientais; Pavimentação rodoviária.

ABSTRACT: This study evaluated the use of rice husk ash (RHA) as a stabilizing agent for fine sandy soils in Palmas-TO, focusing on its application in asphalt pavement layers. Rice husk, a byproduct of the rice industry, generates significant environmental impacts when improperly discarded. Its incineration produces RHA, a residue rich in amorphous silica with pozzolanic properties, which can be utilized in civil construction. Soil and RHA samples were collected, chemically and physically characterized, and mixed in proportions of 3%, 5%, and 7% to assess mechanical performance. Laboratory tests included grain size distribution, Atterberg limits, compaction, and California Bearing Ratio (CBR). The natural soil exhibited low plasticity and a CBR of 17%. The addition of RHA led to substantial improvements: 3% RHA resulted in a CBR of 83%, and 5% reached 107%, meeting requirements for base and sub-base layers. However, the 7% mixture showed reduced performance (CBR of 51%) and expansion above 1%. The findings demonstrate that RHA enhances soil strength through filler effect and silica reactivity, representing a sustainable alternative for pavement construction. Further studies are recommended to confirm pozzolanic reactions and to evaluate performance under different geotechnical conditions.

KEYWORDS: Rice husk ash; Soil stabilization; Road paving

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre a melhoria de solos na construção civil não é uma discussão nova, porém, a busca de novas alternativas e/ou técnicas de melhoria em solos são fundamentais para o desenvolvimento sustentável da sociedade. Para isso, diversas áreas de conhecimento vêm estudando formas de se adequar a esta realidade, inclusive a área rodoviária.

Isto porque o solo natural, por sua complexidade e variabilidade, muitas vezes não atende às exigências geotécnicas de projetos rodoviários. E uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico para viabilizar técnica e economicamente a realização de obras de pavimentação rodoviária sobre solos tecnicamente de baixa qualidade ou inadequado é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas para ser utilizado na obra.

A esta técnica de modificar e melhorar suas propriedades dá-se o nome de estabilização de solos, prática utilizada desde civilizações antigas. Na sua realização, na maioria das vezes, faz-se a inclusão de outros materiais no solo, como cal, cimento, asfaltos e fibras vegetais ou sintéticas, com a tentativa de aprimorar as características mecânicas da matriz do novo compósito, atribuindo-lhe resistência e rigidez, podendo ocorrer por meio de processos químicos ou físicos, que apresentam como ponto em comum, o aumento dos índices de resistência e a melhora da compressibilidade. O uso desses materiais resulta em compósitos geotécnicos de melhor desempenho, amplamente aplicados na construção civil e em rodovias.

Nesse contexto dependendo de cada região, materiais antes considerados como descartáveis hoje são considerados como alternativas viáveis para o desenvolvimento social de uma determinada população. Fato, não obstante, ocorre no estado do Tocantins cujo perfil econômico é sustentado por uma grande cadeia de produção agrícola que contribui para a geração expressiva de resíduos, dentre os resíduos gerados se insere a casca proveniente da produção de arroz.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil produziu cerca de 10,3 milhões de toneladas de arroz em 2023. O Estado do Tocantins, principalmente na região oeste do Estado, em municípios como Lagoa da Confusão, Formoso do Araguaia, Pium, Dueré e Cristalândia, produziu cerca de 604 mil toneladas de arroz em 2023, consolidando-se como o terceiro maior produtor do país.

A casca de arroz, consiste no principal subproduto da indústria arrozeira, correspondendo a cerca de 23% do total de arroz beneficiado, seu descarte constitui num grave e dispendioso problema ambiental, uma vez que, quando utilizadas pelas indústrias beneficiadoras em processos de cogeração de energia, ou seja, na incineração em usinas geradoras de energia elétrica por exemplo, tem-se a redução de volume deste resíduo, porém, há a geração de um novo subproduto, que são as cinzas de casca de arroz (cerca de 4%).

Não sendo apenas problema particular do Estado do Tocantins, mas a nível nacional, a geração desses resíduos encontra algumas opções comuns para seu destino final, a saber: (i) disposição a céu aberto; (ii) depósito em aterro sanitário; (iii) usina de compostagem; (iv) usina de reciclagem; e (v) usina de incineração. Entre essas opções, as mais utilizadas são a disposição a céu aberto – frequentemente realizada no próprio campo ou lavoura, como forma de adubação – e o depósito em aterros sanitários, no entanto, ambas alternativas ainda contribuem para uma alta emissão de gás metano (CH4), proveniente da casca de arroz, e altamente nocivo ambientalmente.

Pensando de maneira a reduzir esse potencial negativo surge a opção de fazer o uso da casca do arroz como biomassa pelo seu alto grau calorífico fazendo desse resíduo uma nova fonte energética. Todavia, ao queimar a casca é gerada a cinza da casca do arroz (CCA), que por sua vez vem encontrando destino final tanto na indústria agrícola como na construção civil, conforme pode-se observar nos trabalhos de Milani (2005), Santos (2015), Jaines & Arns (2016), Alcantara et al. (2017).

Em particular na construção civil o emprego da CCA decorre do comportamento pozolânico e do alto teor de dióxido de sílica (SiO2) encontrado na sua constituição (Bezerra et al., 2011). Sendo assim, neste trabalho é apresentado um estudo inicial da influência da adição da CCA a um solo típico da região de Palmas -TO quando empregado como material de pavimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa adotou-se basicamente duas etapas principais, uma primeira etapa se deu na coleta da cinza e observação do processo de queima da casca de arroz e posterior caracterização

química da casca de arroz (CCA). Posterior a essa etapa se iniciou a segunda etapa (experimental) dessa pesquisa que se caracterizou por ser a etapa mais determinante para a avaliação da CCA.

No desenvolvimento do projeto, contou-se com a estrutura do Laboratório de Engenharia Geotécnica & Infraestrutura – LEGI do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins (UFT) e do Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de Biocombustíveis – LAPEQ do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), que forneceu os recursos necessários à realização dos ensaios de caracterização da CCA e das misturas de solo com CCA.

2.1 A Cinza de Casca de Arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) foi coletada no município de Palmas – TO, na Cerâmica Santa Fé, na Quadra 512 Sul, Plano Diretor Sul, em quantidade suficiente para análises químicas, físicas e mecânicas. Na Figura 1 é possível observar a dinâmica da produção da CCA na cerâmica e o local de coleta da CCA, do ilustrado pode-se observar que após sofrer a combustão, durante o processo de queima dos blocos cerâmicos, a CCA produzida vai se depositando em forma de pilha no piso forno, próximo a boca de alimentação do forno.



Figura 1. Detalhe do processo de queima e obtenção da CCA

Após obtenção da CCA (in natura), que foi incinerada em temperatura não controlada por cerca de 10 horas, obtida do processo de queima da cerâmica para produção de tijolos, amostras (Figura 2) foram levadas ao LAPEQ para realização da caracterização química (espectroscopia de infravermelho).



Figura 2. Aspecto da cinza de casca de arroz (CCA)

2.2 Coleta de Solo

O solo utilizado no presente estudo, foi coletado de uma vala destinada ao assentamento da rede coletora de esgoto, localizada na Quadra 307 Sul, em frente as Avenidas NS 7 e LO 8 no Plano Diretor do munícipio de Palmas – TO. As coordenadas geográficas são 10°12'13.3"S 48°20'59.2"W.

A amostra de solo foi extraída manualmente com o auxílio de pás e sacos para armazenagem. E posteriormente, o material foi levado para o LEGI, para efetivação dos processos de secagem em estufa, destorroamento e peneiramento da amostra (Figura 3). As quantidades de material das amostras para a

realização de cada ensaio foram preparadas de acordo com a NBR 6457:16 – Amostras de solos: preparação para ensaios de compactação e caracterização.



Figura 3. Amostra do solo em estudo

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios físicos de análise granulométrica (peneiramento e sedimentação), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e massa específica dos grãos sólidos (Gs), obedecendo as diretrizes das normas técnicas vigentes: NBR 6459:1984 – Solo: Determinação do limite de liquidez; NBR 7180:1984 – Solo: Determinação do limite de plasticidade; NBR 7181:1984 – Solo: Análise granulométrica; DNER-ME 093/04 – Solos: Determinação da densidade real. Posteriormente, por meio dos resultados obtidos, foi realizada a classificação do solo segundo HRB (*Highway Research Board*) e USCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

2.3 Misturas de solo mais Cinza de Casca de Arroz (CCA)

Posterior a caracterização individual dos materiais se procedeu a elaboração do compósito, misturas de solo mais CCA, nas proporções de 0% (referência), 3%, 5%, e 7% de adição de CCA por peso seco de solo. Posterior a elaboração das misturas, conforme a Figura 4, se avaliou as misturas segundo aspectos de compactação e de capacidade suporte pelo método do índice de Suporte Califórnia (ISC).



Figura 4. Procedimento de mistura do solo + CCA

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da cinza de casca de arroz

Conforme observado na Figura 5, a seguir, o espectro de infravermelho é característico de SiO2 (sílica), que é o componente majoritário da cinza de casca de arroz (cerca de 90%). A intensidade do pico principal em torno de 1050 cm-1, e a presença de ombros em torno de 790 cm-1 são da sílica amorfa. A ausência ou a baixa intensidade de picos na região de 3000 - 4000 cm-1, e na região de 1400 - 3000 cm-1 indica que a amostra provavelmente tem um baixo teor de umidade com pouco carbono residual.

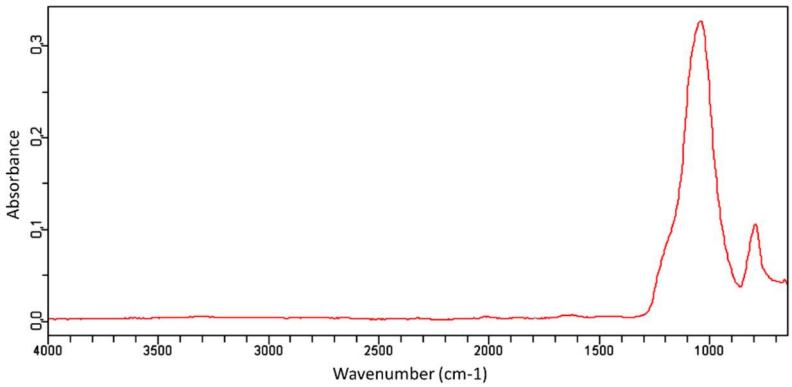


Figura 5. Espectro de infravermelho das cinzas de casca de arroz

Observa-se no espectro que, pico intenso e largo entre 1.000 e 1.100 cm-1 característico do grupo siloxano (Si-O-Si) indica alta concentração de sílica amorfa. E pico em torno de 790-810 cm-1 característico de estiramento simétrico da ligação Si-O-Si, novamente, indicando a presença de sílica em elevada concentração). Por sua vez, pico em torno de 460-470 cm-1 característico de vibração angular da ligação Si-O-Si, novamente, indicando a presença de sílica) e ainda bandas de estiramento das ligações C=O e C=C próximo de 1.610-1680 cm-1 e 1.460 cm-1 característico de -CH3 (indicando presença de carbono residual não queimado).

A combustão da casca de arroz promove a eliminação da matéria orgânica e, na maioria dos casos, resulta em uma cinza com elevado teor de sílica. Entre os resíduos agrícolas mais comuns, a casca de arroz destaca-se por gerar a maior quantidade de cinza, cerca de 20% de seu peso, e por apresentar o mais alto teor de sílica, aproximadamente 83%. Esse elevado conteúdo de sílica confere à cinza propriedades pozolânicas, tornando-a um material de grande potencial para aplicações na construção civil (Del Carpio, 2009).

3.2 Caracterização do solo

As amostras do solo foram objeto de estudo nos seguintes ensaios: Massa Específica dos Grãos do Solo; Limites de Atterberg; Granulometria com e sem defloculante. Dessa maneira, a seguir são apresentados na Tabela 1 os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e índices físicos para o solo.

Tabela 1. Resumo dos resultados da caracterização do solo e índices físicos

Profundidade da amostra (m)	Peso específico dos grãos γ_s (kN/m³)	Limites de consistência (%)		
		w_P	w_L	IP
1,00	27,0	18,0	22,0	4,0

A análise de granulometria conjunta, foi realizada no processo da sedimentação sem defloculante. Não sendo possível observar a agregação das partículas sem a presença de um agente químico desagregador. Na Tabela 2, são apresentados os valores da composição granulométrica obtidos relacionados à caracterização deste solo.

Tabela 2. Análise granulométrica do solo

Composição granulométrica	Profundidade 1,00 m
	Sem defloculante
Pedregulho	3%
Areia grossa	13%
Areia média	28%
Areia fina	33%
Silte	23%
Argila	0%

Todavia, a partir da curva granulométrica do solo sem defloculante e dos parâmetros de consistência do solo pode-se determinar que o solo é constituído por um material com a predominância da fração arenosa, mas com a presença de frações finas com baixa plasticidade.

Assim, segundo a USCS (*Unified Soil Classification System*) o solo pode ser classificado como sendo um solo tipo SW-SH e segunda a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials)* como sendo um solo tipo A-2-4. Dessa forma, ao apresentar um baixo Índice de Plasticidade (IP) o solo acaba por garantir uma boa aptidão para seu uso em obras de pavimentação. Aptidão comprovada para a maioria dos solos encontrados no município de Palmas/TO, conforme carta geotécnica proposta por Santos (2000).

3.3 Ensaio compactação e Índice Suporte Califórnia

Para os ensaios de compactação do solo foram elaboradas cinco amostras com umidade crescentes a fim de definir na energia normal, os valores de umidade ótima e peso específico seco máxima. Com os dados umidade e peso específico encontrados de 13,2% e 18,7 kN/m^3, ver Figura 6, foi definido o teor ótimo a ser utilizado como referência para elaboração das misturas Solo+CCA.

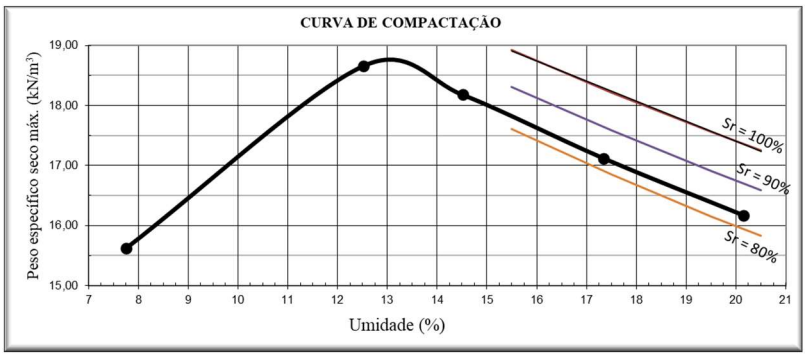


Figura 6 - Curva de compactação do solo natural na energia do Proctor Normal

Ensaios de ISC no solo e nas misturas de solo mais CCA

Ensaios realizados conforme a metodologia estabelecida pela NBR 9895:1987. Para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a determinação das percentagens de expansão do solo, com o intuito de verificar se o solo é apto como material para camadas de pavimentação rodoviária.

Primeiramente, foram ensaiados dois corpos de prova (CP's) com o solo em estudo, compactados na energia de compactação normal e com a umidade ótima encontrada no Proctor Normal. Após a compactação os CP's foram submersos no tanque d'água durante 96 horas conforme normativa, para medir a percentagem de expansão.

Na segunda etapa do ensaio foram compactados um conjunto de CP's. Sendo um com o solo em estudo apenas e outros 3 conjuntos do compósito solo + CCA, nas porcentagens em peso de 3%, 5% e 7% de cinza de casca de arroz (CCA). Estes corpos de prova foram compactados na energia de modificada fazendo o uso dos parâmetros de compactação na energia normal na busca pelos melhores resultados que o solo poderia apresentar, por se tratar de solo de características lateríticas, as normativas DER/SP M 196 e DER/PR ES-P 08/05 ressaltam como condições especificas para a utilização de um solo arenoso fino laterítico em camadas de pavimentos a utilização de energias de compactação intermediarias e modificadas para sub-bases e modificadas para base.

Em função disso se adotou a energia de compactação modificada para avaliar o comportamento do solo natural e da mistura solo + CCA quando exposto a condições elevadas de esforço. Após a compactação, os CP's foram colocados em imersão no tanque d'água para medir a porcentagem de expansão do solo e da mistura solo + CCA. Além das 96 horas atendendo a norma, foi adotado um tempo de cura de 7 dias, onde após 96 horas, os CP's ficaram no tanque por mais 3 dias. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Resultados de expansão

Os resultados apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 mostra os valores de expansão encontrados para o solo com e sem adição da CCA, respectivamente. Na Tabela 4 o solo natural teve expansão inferior a 1%, solo + 3% de CCA e solo + 5% de CCA também tiveram expansão inferior a 1%, atendendo normativas do DNIT, cumprindo assim requisitos em termos de porcentagem de expansão para sub-base e base de pavimentos. Apenas a mistura solo + 7% de CCA foi a única que não atendeu, ficando com expansão > 1%, resultados que devem ser analisados para buscar possíveis alterações que permitam aumentar a porcentagem de CCA na mistura.

Tabela 3 - Tabela do solo compactado com energia de compactação normal, em dois corpos de prova.

Ensaios	**Valores de expansão (%) após 96 horas submerso**
1	0,87
2	0,84
Σ Média	0,86

Tabela 4 - Resultados de expansão do solo natural e solo + CCA com percentagens de 3%, 5% e 7 % de CCA, compactados com energia de compactação modificada.

Ensaio	**Valores de expansão (%) após 7 dias submerso**
Solo	0,70
Solo + 3% CCA	0,17
Solo + 5% CCA	0,79
Solo + 7% CCA	1,29

Resultados do ISC

A seguir são descritos os resultados obtidos para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia para amostras de solo com e sem CCA. Após a estabilização com CCA observa-se um acréscimo e/ou uma melhora no desempenho das misturas, como pode ser observado comparativamente entre a Tabela 5 e Tabela 6 os valores de ISC para o solo sem adição passaram de 4,5% para 83% e 107% quando adicionados 3% e 5% CCA, respectivamente. No entanto, para a mistura com adições de 7% de cinza é observado um decréscimo no ISC, que provavelmente indique um teor máximo para adição das CCA para estabilização de solos.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de ISC obtidos nos corpos de prova compactados na energia de compactação normal.

Tabela 5 - Valores de ISC em energia normal

Ensaio	**ISC (%) após 96 horas submerso**
1	5
2	4
Σ Média	4,5

A Tabela 6 mostra os valores de ISC obtidos nos corpos de prova compactados na energia de compactação modificada, que passaram por um processo de cura de 7 dias submersos.

Tabela 6 - Valores de ISC em energia modificada

Ensaio	**ISC (%) após 7 dias de cura**
Solo	17
Solo + 3% de CCA	83
Solo + 5% de CCA	107
Solo + 7 % de CCA	51

4 CONCLUSÃO

Este estudo analisou os resíduos da indústria de beneficiamento de arroz, destacando o potencial da cinza de casca de arroz (CCA) como material estabilizante para solos arenosos finos da região de Palmas no Tocantins. Os ensaios mostraram que o solo natural apresenta baixo Índice de Suporte Califórnia (ISC), sendo adequado apenas para subleito. Entretanto, a adição de CCA em diferentes proporções promoveu ganhos significativos de resistência, evidenciando seu potencial para aplicação em pavimentação rodoviária.

Os resultados indicaram que a mistura solo + 3% de CCA atende às normas para uso em bases de pavimento, enquanto a proporção de 5% é adequada para sub-bases e a de 7% apenas para reforço de subleito. Embora a mistura com 5% de CCA tenha apresentado o maior Índice de Suporte Califórnia (ISC), sua classificação normativa para aplicação em pavimentação considera não apenas a resistência mecânica, mas também os critérios de expansão. Nesse sentido, a dosagem de 5% apresentou valores de expansão superiores ao limite estabelecido para camadas de base, restringindo sua utilização a sub-bases. Essa decisão técnica assegura a compatibilidade com os parâmetros normativos, garantindo desempenho adequado da estrutura do pavimento e prevenindo patologias associadas à expansão excessiva.

Apesar da ausência de análises químicas detalhadas que confirmem reações pozolânicas, o aumento da resistência pode ser atribuído ao efeito filler e à reatividade da cinza. Assim, a CCA mostra-se como alternativa promissora para obras de baixo custo, embora sejam necessários estudos complementares para validar seu uso em diferentes condições geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcantara, M. A. M.; Santos, L. P. dos; Souza, A.; Lima, D. C. de (2017). *Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-ca*l. Matéria (Rio J.) [online]. 2017, vol.22, n.3, e11875.

Bezerra, I. M. T.; Souza, J.; Carvalho, J. B. Q. de; Neves, G. A. (2011). *Aplicação da cinza de casca do arroz em argamassa de assentamento.* In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.6, p.639-645, 2011. Campina Grande, PB. UAEA/UFCG. 2011.

Del Carpio, J. A. V. (2009) *Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (concreto compactado com rolo) para seu uso em pavimentos compostos.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, SC. PPGEC/UFSC. 2009.

Della, V. P.; Kuhn, I.; Hotza, D. (2001). *Caracterização da cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratário de sílica.* Química Nova, v.24, n.6, p.778-782, 2001.

Freitas, J.E. (2018). *Uso de Cinza da casca de arroz na Estabilização de solos para uso em Pavimento Rodoviário.* Dissertação de Mestrado, Publicação nº 302/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF

Jaines, L.; Arns, P. (2016). *Estabilização de um solo com cinza da casca de arroz para a utilização em camadas de pavimento.* 2016. Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

Milani, A. P. S. (2005). *Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento de solo-cal adicionados de casca de arroz*. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

Santos, S. H. T. (2015). *Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz.* Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Santos, L. F. dos. (2000) *Cartografia Geotécnica Regional do Município de Palmas/TO: Área a Oeste do Meridiano 48º W*. Gr.. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/123

Utilização de Composto Orgânico como Material Estruturante em Biopilhas para Tratamento de Solo Areno Argiloso Contaminado por Óleo Diesel

Antônio Italcy de Oliveira Júnior
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, antonioitalcy@hotmail.com

Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida
Doutora em Engenharia Civil (Geotecnia), UFMA, São Luís, Brasil, alice.almeida@ufma.br

Flávio Leôncio Guedes
Doutorando em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, f_l_guedes@hotmail.com

Leonardo José do Nascimento Guimarães
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, leonardo.guimaraes@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

Alison de Souza Norberto
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, alison.norberto@ufpe.br

RESUMO: A contaminação de solos por derivados de petróleo, como o óleo diesel, altera significativamente suas características físicas e geotécnicas, sendo este um problema crítico em regiões semiáridas, onde o comportamento do solo não saturado é dominante. O presente trabalho investigou a técnica de biorremediação em biopilhas, utilizando o composto orgânico como material estruturante, para a remediação de um solo areno-argiloso da região semiárida do Nordeste brasileiro (Caruaru-PE) contaminado por óleo diesel. O experimento foi conduzido em escala de bancada durante 180 dias, em ambiente com controle de temperatura e umidade. As misturas avaliadas incluíram o solo contaminado (controle – Bioatenuação Natural, BAN – 0% de material estruturante) e bioestimulação com 5% e 10% de composto orgânico (BI5CO e BI10CO). A cada 15 dias, amostras foram coletadas em triplicata para determinações de hidrocarbonetos totais de petróleo, teores de carbono/nitrogênio e contagem de microrganismos. A técnica de biopilhas com composto orgânico demonstrou alta eficácia. A biopilha com 10% de composto orgânico promoveu a remoção de até 92,06% dos hidrocarbonetos totais de petróleo em 180 dias. Concluiu-se que o uso de composto orgânico em biopilhas é viável e eficiente para a remediação de solo areno-argiloso contaminado por óleo diesel, mitigando os efeitos adversos da contaminação.

PALAVRAS-CHAVE: Biorremediação, Solo Contaminado, Composto Orgânico.

ABSTRACT: Soil contamination by petroleum derivatives, such as diesel oil, significantly alters its physical and geotechnical characteristics. This is a critical issue in semi-arid regions, where unsaturated soil behavior is dominant. This study investigated the biopile bioremediation technique, using organic compost as a bulking agent, for the remediation of a sandy-clay soil from the semi-arid region of the Brazilian Northeast (Caruaru-PE) contaminated by diesel oil. The experiment was conducted at a bench scale for 180 days in a temperature- and humidity-controlled environment. The evaluated mixtures included the contaminated soil (control – Natural Bioattenuation, NBA – 0% bulking agent) and biostimulation with 5% and 10% organic compost (BI5CO and BI10CO). Every 15 days, samples were collected in triplicate to determine total petroleum hydrocarbons (TPH), carbon/nitrogen content, and microbial counts. The biopile technique with organic compost demonstrated high efficacy. The biopile with 10% organic compost promoted the removal of up to

92.06% of total petroleum hydrocarbons within 180 days. It was concluded that the use of organic compost in biopiles is a viable and efficient method for the remediation of sandy-clay soil contaminated by diesel oil, mitigating the adverse effects of contamination.

KEYWORDS: Bioremediation, Contaminated soil, Organic compost.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades industriais e o transporte de hidrocarbonetos têm gerado impactos ambientais significativos, resultando frequentemente na contaminação de solos e recursos hídricos. Dentre os poluentes, os derivados de petróleo, como o óleo diesel, destacam-se pela elevada ocorrência de derramamentos acidentais em rodovias e postos de revenda (Andrade *et al*., 2010). Esses contaminantes possuem o potencial de alterar drasticamente as características químicas e estruturais do solo, apresentando elevada complexidade de remediação devido ao caráter hidrofóbico de diversas frações de hidrocarbonetos (Rajabi e Sharifipour, 2019).

A avaliação do impacto de tais substâncias torna-se ainda mais crítica em regiões semiáridas, onde o comportamento do solo não saturado é dominante e os fatores climáticos intensos condicionam a dinâmica dos poluentes no subsolo. No Brasil, embora existam pesquisas sobre remediação, o tratamento de solos tropicais do interior do Nordeste sob o efeito de combustíveis ainda demanda estudos específicos devido à escassez de dados para essa região. Visto que a remoção completa do solo contaminado para disposição em aterros é economicamente onerosa e tecnicamente limitada, métodos sustentáveis de remediação biológica têm sido amplamente investigados (Schwarz e Krizek, 2006).

Dentre essas técnicas, a biorremediação em biopilhas destaca-se pela eficiência no tratamento de solos contaminados. Essa metodologia baseia-se na utilização de materiais estruturantes para criar uma matriz porosa que favorece a aeração e fornece nutrientes essenciais, otimizando o metabolismo da microbiota degradadora (Sathyapriya *et al*., 2023). A utilização de composto orgânico oriundo de resíduos agroindustriais como agente bioestimulante insere-se nos princípios da economia circular, ao transformar subprodutos em recursos valiosos para a recuperação ambiental. Essa abordagem não apenas dinamiza a aplicação desses materiais alternativos, mas também promove a inserção de resíduos em novos ciclos produtivos (Saviozzi *et al*., 2009).

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar a utilização de composto orgânico como material estruturante bioestimulante no tratamento de um solo areno-argiloso (classificado como SC) coletado na região de Caruaru-PE, contaminado artificialmente por óleo diesel. O foco central do estudo reside em analisar a eficácia da técnica de biopilhas na remoção de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP), buscando consolidar uma solução de baixo custo e alta eficiência para a remediação de solos em regiões de clima semiárido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado um solo de textura areno-argilosa coletado no município de Caruaru, Pernambuco, em uma região de clima semiárido. O solo foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos como SC. O combustível empregado para a contaminação artificial foi o óleo diesel comercial S10, adquirido no comércio local. Como material estruturante bioestimulante, utilizou-se um composto orgânico oriundo de um empreendimento agroindustrial situado no estado de Pernambuco.

A contaminação do solo foi realizada de forma controlada em laboratório para simular um cenário de derramamento severo. O solo, previamente seco ao ar e destorroado, foi misturado ao óleo diesel na proporção de 8% em relação à sua massa seca. A mistura foi realizada em bandejas metálicas, com a adição do contaminante em pequenas parcelas sob revolvimento constante para garantir a homogeneização. Após a incorporação do combustível, o material permaneceu em repouso por 48 horas em recipientes hermeticamente fechados para permitir a estabilização das interações físico-químicas entre o solo e o óleo diesel.

Foram montadas três configurações experimentais em duplicata para avaliar diferentes dosagens de composto orgânico em relação ao peso do solo contaminado. As misturas avaliadas incluíram o solo

contaminado (controle – Bioatenuação Natural, BAN – 0% de material estruturante) e bioestimulação com 5% e 10% de composto orgânico (BI5CO e BI10CO).

As misturas foram acondicionadas em bandejas com dimensões de 43,5 cm x 29,6 cm x 7,5 cm. O experimento teve duração total de 180 dias e foi conduzido em ambiente com controle de temperatura e umidade. A umidade das biopilhas foi monitorada e ajustada semanalmente para 70% da capacidade de campo, utilizando água destilada. Para garantir a aeração necessária à atividade microbiana aeróbica e o suprimento de oxigênio, realizou-se o revolvimento manual das pilhas uma vez por semana.

O monitoramento das biopilhas ocorreu durante 180 dias, com revolvimento manual e ajuste de umidade (70% da capacidade de campo) realizados semanalmente para garantir a aeração e a atividade microbiana aeróbica. Coletas de amostras em triplicata foram efetuadas quinzenalmente (de T0 a T180) para análise de Carbono Orgânico Total via método de Walkey-Black modificado, Nitrogênio Total pelo método de Kjeldahl (Mendonça e Matos, 2005) e o HTP conforme metodologia de Santos (2005). A atividade biológica foi monitorada pela contagem de microrganismos (BHT e FT), expressa em Unidades Formadoras de Colônias (Trindade, 2002).

A cinética de biodegradação do óleo diesel foi avaliada utilizando o modelo de decaimento de primeira ordem (Wiedemeier *et al*., 2007), conforme a Equação 1:

$$C = C_0 * e^{-kt} \quad (1)$$

Onde C é a concentração final de HTP, C_0 é a concentração inicial, k é a constante de decaimento (tempo^{-1}) e t é o tempo de análise. O uso deste modelo justifica-se pela baixa influência da volatilização em relação à biodegradação para o óleo diesel no solo (Namkonng *et al*., 2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de quantidade de hidrocarbonetos nas diferentes biopilhas durante todo o período de estudo.

Tabela 1. Concentração de hidrocarbonetos de petróleo nas diferentes biopilhas durante 180 dias de biodegradação.

Experimento	BAN (g/kg)	BI5CO (g/kg)	BI10CO (g/kg)
T0	6.308	6.308	6.308
T7	5.978	5.501	5.111
T15	5.614	5.017	4.874
T30	5.846	4.208	3.941
T45	4.749	3.814	3.654
T60	4.542	3.414	2.945
T75	4.749	3.115	2.448
T90	4.542	3.221	2.131
T105	4.601	2.685	1.746
T120	3.714	2.441	1.396
T135	3.303	1.987	996
T150	3.057	1.745	699
T165	3.010	1.346	546
T180	2.909	1.103	501
% Remoção de HTP	-53,88%	-82,51%	-92,06%

No tempo 0, foi realizado a quantificação de hidrocarbonetos as três biopilhas, mas como o solo contaminado era o mesmo em todas as biopilhas, realizou-se uma média dos valores obtidos e o gráfico das biopilhas partiram de uma concentração de 6.308 g/kg de HTP.

A primeira leitura foi realizada após 7 dias de montagem do experimento, as remoções de HTP nesse período inicial se deve fundamentalmente à volatilização do óleo diesel. Para Saviozzi *et al*. (2009), para contaminações com óleo diesel a parcela volatilizada é pequena e está relacionada com revolvimento das biopilhas para aeração.

Observa-se que as concentrações de HTP variaram de acordo com os teores de materiais estruturantes. No entanto, é importante salientar que devido à dificuldade em se obter um grau elevado de homogeneidade nas misturas "solo+contaminante+material" estruturantes nas biopilhas, justifica-se dessa forma a ocorrência por vezes de quantidade de hidrocarbonetos maiores do que nos resultados anteriores, conforme salientado por Morais (2005).

Ao avaliar os resultados de concentração de HTP das biopilhas, nota-se que o solo contaminado apresentou uma atenuação natural, resultando em uma redução de 53,88% de HTP após 180 dias de incubação. Dentre os tratamentos realizados com bioestímulo, utilizando material estruturante, observa-se que a adição de 10% de composto orgânico promoveu uma redução de 92,06% de HTP e a adição de 5% de composto orgânico promoveu uma redução de 82,51% de redução de HTP. Portanto, conclui-se que a adição do composto orgânico reduziu 1,63 vezes a mais do que a atenuação natural.

Como forma de avaliar o padrão de concentração de HTP em relação as legislações ambientais vigentes, a qualidade dos solos e das águas devido a acidentes relacionados a contaminação com combustíveis está relaciona com uma série de leis, resoluções e decretos municipais que visam mitigar os danos ambientais. Em 2009, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabeleceram a Resolução n° 420 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo em relação a presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas. Segundo a referida resolução são utilizados como padrão os valores orientadores para solos e águas subterrâneas da CETESB, que por sua vez se baseou na Lista Holandesa de valores de referência de qualidade do solo e da água subterrânea no ano de 1994. A lista Holandesa estabelece Valores de R (referência), A (Alerta) e I (Intervenção) para os HTP para um solo contendo 25% de argila e 10% de matéria orgânica, e contendo 0% de argila e 0% de matéria orgânica.

Na Tabela 2 é apresentada uma comparação dos valores de concentração de HTP após tratamento com os valores estabelecidos na lista Holandesa.

Tabela 2. Comparação da concentração de HTP com limites de referência estabelecidos na lista Holandesa.

Tipo de solo	Concentração em peso seco (mg. Kg^{-1})		
	Referência (R)	Alerta (A)	Intervenção (I)
1. 0% de argila e 0% de matéria orgânica	10	505	1000
2. 25% de argila e 10% de matéria orgânica	50	2525	5000
Tratamento	Concentração em peso seco (mg. Kg^{-1})	Classificação tipo de solo 1	Classificação tipo de solo 2
BAN	2909	**Acima do nível de intervenção**	**Acima do nível de alerta**
BI5CO	1.103	**Acima do nível de intervenção**	**Abaixo do nível de alerta**
BI10CO	501	**Abaixo do nível de alerta**	**Abaixo do nível de alerta**

É possível verificar que se considerar o tipo de solo 2, 25% de argila e 10% de matéria orgânica, os tratamentos com bioestimulação apresentam valores abaixo do nível de alerta. Por outro, caso seja o considerado o solo tipo 1, 0% de argila e 0% de matéria orgânica, apenas o tratamento com bioestimulação utilizando 10% de composto orgânico apresenta concentração abaixo do nível de alerta.

O tratamento utilizando apenas bioatenuação natural, apresentou concentração final acima do nível de intervenção do solo tipo 1 e acima do nível de alerta para o solo tipo 2. Estes resultados sugerem que apenas a bioatenuação natural, não foi suficiente para reduzir a concentração de HTP para níveis menores do que o de alerta mesmo após 180 dias de remediação, independentemente do tipo de solo presente na Lista Holandesa.

Na Figura 2 são apresentados os ajustes dos dados experimentais ao modelo matemático de cinética de primeira ordem e seus respectivos ajustes das taxas de decaimento de HTP de todas as biopilhas. As constantes de biodegradação (k) de cada biopilha são apresentadas nas equações da Figura 2.

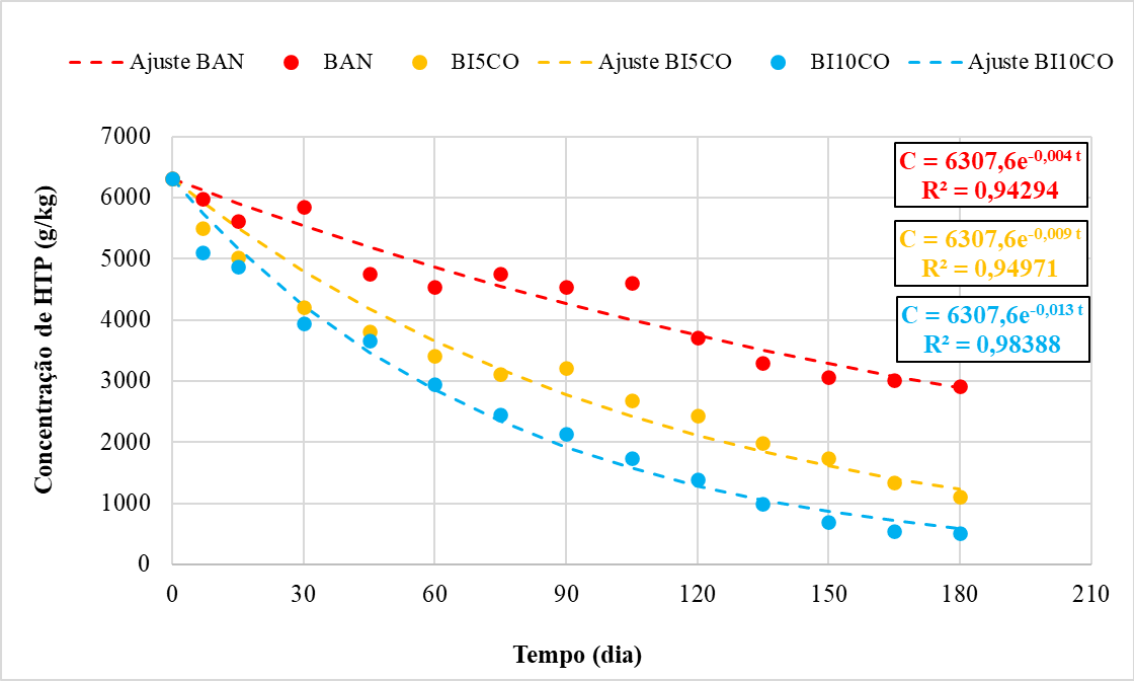


Figura 1. Ajuste da taxa de decaimento pelo modelo cinético de primeira ordem da biopilha com atenuação natural.

O cálculo da constante de biodegradação de acordo com o modelo de decaimento de primeira ordem dos experimentos possibilitou comparar a eficiência de cada biopilha. As constantes de biodegradação evidenciam que a velocidade de decaimento da concentração de HTP é diretamente proporcional com o teor de material estruturante utilizado na bioestimulação.

Outro aspecto que foi evidenciado se refere ao aumento de velocidade de decaimento da concentração de HTP de todas as biopilhas com utilização de material estruturante bioestimulante, em relação à biopilha sem material estruturante, onde aconteceu apenas a atenuação natural.

Isso sugere que houve bioestimulação da microbiota do solo contaminado pelos materiais estruturantes, aumentando não só em magnitude, como também em velocidade, a remoção de hidrocarbonetos totais oriundos do óleo diesel presente na matriz do solo. Comportamentos semelhantes foram relatados por Namkoong *et al.* (2002). De acordo com Guimarães (2018), altos teores de materiais estruturantes podem inibir a biodegradação e ocasionar a sorção do contaminante em sua matriz, reduzindo assim as constantes de decaimento de HTP. Portanto, nota-se que os teores utilizados nas biopilhas foram adequadas, tendo em vista que há uma relação diretamente proporcional entre as constantes de decaimento e o teor de material estruturante.

Na Tabela 4 é apresentado o monitoramento dos teores de carbono, nitrogênio e relação C/N das biopilhas realizados ao longo do experimento.

Os teores de carbonos aferidos representam a soma dos carbonos presentes na composição do solo natural, do óleo diesel e do material estruturante utilizado no bioestímulo das biopilhas. Nota-se pelo monitoramento realizado que em todos as biopilhas que há uma tendência de decaimento da quantidade de carbono. Essas reduções podem estar associadas à biodegradação dos HTP's.

As maiores quedas do teor de carbono são observadas nas biopilhas com a adição de materiais estruturantes em comparação a atenuação natural. O carbono orgânico é a principal fonte de energia para o

desenvolvimento dos microrganismos, portanto é um elemento necessário para realização e manutenção do processo. No entanto, para que haja sucesso na biorremediação, o óleo diesel deve ser a fonte principal de carbono do consumo energético microbiano. Conforme destacado por Namkoong *et al*. (2002), o material estruturante, quando rico em matéria orgânica, não deve ser a fonte de carbono preferencial microbiana, não pode haver a substituição da degradação dos contaminantes de interesse por qualquer outra fonte de carbono na biopilha. Nesse sentido, o composto orgânico, provavelmente não atuou como uma fonte energética, não sendo identificada competição do material estruturante com o óleo diesel, e o contaminante pode ter sido utilizado como fonte primária de energia.

Tabela 3. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N das biopilhas ao longo do experimento.

Experimento	Carbono (g/kg)			Nitrogênio (g/kg)			Relação C/N		
	BAN	BI5CO	BI10CO	BAN	BI5CO	BI10CO	BAN	BI5CO	BI10CO
T0	13,91	14,37	15,58	0,55	1,1	1,4	25,29	13,07	11,13
T7	13,75	14,09	15,43	0,55	1	1,4	25	14,09	11,02
T15	12,98	13,91	15,28	0,56	0,9	1,5	23,18	15,46	10,19
T30	12,74	13,74	15,18	0,59	0,8	1,6	21,59	17,18	9,49
T45	12,54	13,58	15,13	0,58	0,9	1,6	21,62	15,08	9,46
T60	12,37	13,57	15,13	0,58	1,1	1,5	21,33	12,34	10,09
T75	12,01	13,4	15,08	0,55	1,2	1,5	21,84	11,16	10,05
T90	11,24	13,22	14,98	0,56	1,2	1,5	20,07	11,02	9,99
T105	11,19	12,87	14,88	0,57	1,2	1,6	19,63	10,73	9,3
T120	11,9	12,73	14,83	0,58	1,3	1,7	20,52	9,79	8,72
T135	11,9	12,46	14,68	0,6	1,3	1,8	19,83	9,58	8,15
T150	11,7	12,08	14,63	0,6	1,3	1,9	19,5	9,29	7,7
T165	11,4	11,87	14,53	0,65	1,3	1,9	17,54	9,13	7,65
T180	10,72	11,45	14,38	0,65	1,3	1,9	16,49	8,81	7,57

Os teores de nitrogênio apresentaram pouca variação ao longo do tempo e uma leve tendência de crescimento. Isso sugere que houve disponibilidade de nitrogênio para os microrganismos, tendo em vista que ele é um importante nutriente para o desenvolvimento microbiano e por consequência é um elemento limitante do processo de biodegradação.

Os materiais estruturantes são os principais responsáveis pelo aporte de nitrogênio nas biopilhas de bioestimulação, pois não se verifica praticamente nenhuma alteração de nitrogênio no solo contaminado sem adição de material estruturante ao longo do experimento (bioatenuação natural). Isso evidencia que a inclusão dos materiais estruturantes regulou a manutenção e a disponibilização dos nutrientes aos microrganismos, gerando os melhores resultados de biodegradação do HTP.

No que se refere a relação C/N, de forma geral, observa-se uma tendência de redução da relação C/N até o final do experimento. Possivelmente, essas reduções estão associadas à redução do carbono e à maior disponibilidade do nitrogênio, sugerindo a ocorrência de biodegradação do óleo diesel em todas as biopilhas, sobretudo nas biopilhas com composto orgânico como elemento bioestimulante. Conforme relatado por Guimarães (2018), a fonte primária de carbono para o crescimento microbiano é o óleo, promovendo a redução de HTP ao longo do tempo. Seguindo este raciocínio, o composto orgânico utilizado nos tratamentos da presente pesquisa pode ter atuado como bioaumentadores e bioestimuladores, possibilitando crescimento dos microrganismos e promovendo uma fonte alternativa de nutrientes.

É importante destacar ainda que as maiores relações C/N, conforme observado na Tabela 6, são verificadas para o solo contaminado sem adição de material estruturante. Essa foi a biopilha que apresentou menor quantidade de HTP removido. A relação C/N está diretamente relacionada à decomposição e mineralização do carbono. Relações C/N elevadas sugerem taxas mais lentas de decomposição e menor mineralização, enquanto as relações C/N baixas sugerem taxas mais rápida de decomposição e alta mineralização. Em outras palavras, as relações C/N elevadas o resíduo permanece mais o tempo no solo e as relações C/N mais baixas há rápida conversão do resíduo em fonte de nutriente para os microrganismos do

solo, principalmente o nitrogênio orgânico. Portanto, as maiores relações C/N observadas para o solo contaminado sem adição de material estruturante corroboram com a menor constante de decaimento (k). Assim como as menores relações C/N observadas nas biopilhas com composto orgânico foram as que apresentaram maior remoção de HTP e constantes mais altas de biodegradação.

Os resultados das análises microbiológicas das biopilhas são apresentadas na Figura 2. Nota-se que houve um aumento das bactérias heterotróficas totais (BHT) (Figura 2a) e dos fungos totais (FT) (Figura 2b) com adição do material estruturante, em relação ao solo sem adição. Isso pode estar associado ao melhoramento das características do solo, promovido pela inclusão dos materiais estruturantes como, por exemplo, aumento da porosidade, aeração, umidade, disponibilidade de nutriente e matéria orgânica, textura, dentre outros. Conforme destacado por Morais (2005), esses efeitos são benéficos para a qualidade do solo e resultam no aumento de quantidade e atividade microbiana.

As BHT apresentaram inicialmente uma população de 1,5 x 10^8 UFC g^{-1} solo. Esses microrganismos foram o que apresentaram maior crescimento, sendo observado um pico em tempos diferentes para cada biopilha. Para o solo sem adição de materiais estruturantes, utilizando apenas a atenuação natural, o pico de quantidade de BHT ocorreu em 60 dias, com 1,09 x 10^9 UFC g^{-1} solo. Nesse mesmo período ocorrem as maiores remoções de HTP do solo. Para o solo com 5% e 10% de composto orgânico, os picos de quantidade de BHT ocorreram em 30 dias com, respectivamente, 1,47 x 10^{10} UFC g^{-1} e 4,09 x 10^{10} UFC g^{-1} solo. Esses resultados corroboram com as constantes de decaimento de HTP (k), onde se verifica uma constante de degradação mais alta para as biopilhas com composto orgânico.

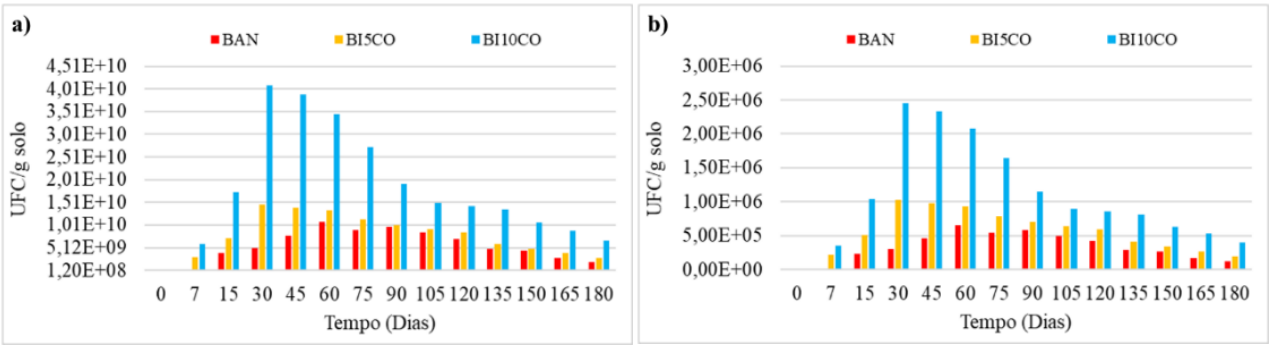


Figura 2. Quantificação de bactéricas heterotróficas totais (BHT) em a) e de fungos totais em b) das biopilhas ao longo do experimento.

O decrescimento observado nas biopilhas após os picos podem estar associados à redução dos substratos proveniente do material estruturante e do próprio óleo diesel. Esses resultados corroboram com Santos (2007), que encontrou BHT da ordem de 10^8 a 10^{10} UFC g^{-1} solo, utilizando adições de 5% e 10% de pó da casca do coco na biorremediação de um solo contaminado por petróleo. A autora relaciona os resultados à maior aeração que o material estruturante imprime ao solo, obtendo um pico de BHT após 20 dias de experimentos.

No que se refere às populações de FT, observam-se quantidade menores do que as BHT. No entanto, verifica-se um padrão de crescimento similar aos observados nas BHT em relação à utilização do material estruturante. Apesar da menor quantidade de FT, os fungos são de suma importância na biodegradação, pois atuam em conjunto com as bactérias. Os fungos por apresentarem crescimento micelial colonizam os substratos e promovem a sua digestão o que facilita a ação posterior das bactérias (Morais, 2007). Para Santos (2007), os fungos apresentaram maior eficiência do que as bactérias, em condições adversas, como limitação de nutrientes, pH extremos, redução de umidade, temperaturas extremas, dentre outras.

Para o solo sem material estruturante, os FT foram de 1,04 x 10^4 UFC g^{-1} solo até um pico de 6,49 x 10^4 UFC g^{-1} solo, ocorrendo nos primeiros 60 dias de ensaio. Para os solos com 5% e 10% de composto orgânico, os valores de pico foram, respectivamente, de 1,03 x 10^6 UFC g^{-1} solo e de 2,45 x 10^6 UFC g^{-1} solo, ocorrendo nos primeiros 30 dias. Esses resultados corroboram com Shahsavari *et al*. (2013), que avaliaram diferentes materiais estruturantes oriundos de resíduos vegetais e observaram que a maior população de FT obtida foi da ordem de 10^6 UFC g^{-1} solo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição do composto orgânico agregou propriedades às biopilhas, promovendo um ambiente favorável à biodegradação do óleo diesel presente na matriz do solo areno-argiloso. A técnica utilizada mostrou-se viável, tendo em vista que houve remoções de hidrocarbonetos totais da ordem de 92%, aproximadamente, com 180 dias de tratamento ao ser utilizado 10% de composto orgânico.

O monitoramento revelou que o material estruturante, além de melhorar as propriedades físicas das biopilhas, disponibilizou nutrientes para os microrganismos que potencializou significativamente a atividade metabólica da microbiota local, refletida no aumento das Unidades Formadoras de Colônias (UFC).

A potencialização da atividade metabólica da microbiota local refletiu não somente em uma maior quantidade de microrganismo, como também em maior velocidade de crescimento, em comparação à bioatenuação natural do solo contaminado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, J. de A., Augusto, F., & Jardim, I. C. S. F. (2010). Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*, v. 35, n. 3, p. 17-43.

Guimarães, C. C.(2018). *Estudo da utilização de composto orgânico para a remediação de solo contaminado por hidrocarboneto*. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Hagsheno, H., & Arabani, M. (2022). Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-32.

Mendonça, R., & Matos, A. T. (2005). *Manual de laboratório: resíduos sólidos e efluentes*. Editora UFV.

Mendoza, C. E. H., Ramírez, P. G., & Alegría, O. C. (2021). Geotechnical Evaluation of Diesel Contaminated Clayey Soil. *Applied Sciences*, v. 11, n. 14, p. 6451.

Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2019). Geotechnical properties of hydrocarbon contaminated soils: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, n. 5, p. 3685-3717.

Santos, M. C. (2005). *Tratamento de solos contaminados com óleo diesel por meio de biopilhas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP.

Sathyapriya, S., Sharvesh, R., & Natarajan, C. (2023). Bioremediation of oil contaminated sand. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 3.

Saviozzi, A., Cardelli, R., & Cozzolino, M. (2009). Bioremediation with compost of a diesel contaminated soil: monitoring by dehydrogenase activity and basal respiration. *Compost Science and Utilization*, v. 17, n. 1, p. 55-60.

Schwarz, L. G., & Krizek, R. J. (2006). Hydrocarbon residuals and containment in microfine cement grouted sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 2, p. 214-228.

Trindade, P. V. O. (2002). *Biorremediação de solo contaminado com hidrocarbonetos de petróleo*. Tese de Doutorado, UENF, Campos dos Goytacazes.

Wiedemeier, T. H. *et al*. (2007). *Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water*. Air Force Center for Environmental Excellence.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/124

Valoração de resíduos na geotecnia para elaboração de novos aglomerantes álcali-ativados

Auanny Alícia Alves da Silva
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB, Brasil, auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

Carina Silvani
Professora, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB, Brasil, carina.silvani@professor.ufcg.edu.br

Giovani Jordo Bruschi
Pesquisador de pós-doutorado, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, gio.bruschi@gmail.com

William Mateus Kubiaku Levandoski
Doutorando em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, Brasil, williankubi@gmail.com

Eduardo Pavan Korf
Professor, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, Brasil, eduardo.korf@uffs.edu.br

RESUMO: Obras de engenharia geotécnica demandam grandes quantidades de aglomerantes, cuja produção consome recursos naturais e emite elevadas quantidades de CO_2. Nesse contexto, uma temática que apresenta elevado potencial ambiental é voltada para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de aglomerantes sustentáveis, como os cimentos álcali-ativados. Esses materiais utilizam precursores ricos em sílica e alumina em estado amorfo, ativados por soluções alcalinas, e podem ter o desempenho otimizado pela incorporação de fontes de cálcio. Essa pesquisa realizou uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, com o objetivo de identificar materiais alternativos presentes no Nordeste do Brasil com potencial de uso como precursores e fontes de cálcio em aglomerantes álcali-ativados, além de discutir as vantagens ambientais e sociais associadas a essas soluções. Os resultados indicam que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz, a cinza de madeira de algaroba e o pó de vidro apresentam elevados teores de sílica e alumina, o que favorece sua aplicação como precursores. Cascas de ovo e conchas de mariscos constituem fontes potenciais de cálcio. Tais achados apontam incrementos de resistência mecânica que superam 1000 kPa em idades iniciais e reduções de até 80% nas emissões de gases de efeito estufa. Conclui-se que o aproveitamento desses resíduos locais viabiliza o desenvolvimento de aglomerantes de baixo carbono, alinhando eficiência mecânica e sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia sustentável, Álcali-ativação, Aglomerantes alternativos, Economia circular.

ABSTRACT: Geotechnical engineering projects require large quantities of binders, whose production consumes natural resources and emits high amounts of CO_2. Consequently, a topic with high environmental potential is the reuse of agro-industrial waste to produce sustainable binders, such as alkali-activated cements. These materials employ precursors rich in amorphous silica and alumina activated by alkaline solutions, and their performance can be enhanced by incorporation of calcium sources. This study carried out a literature review across the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases to identify agro-industrial residues available in Northeast Brazil with potential use as precursors and calcium sources in alkali-activated binders, as well as to discuss the associated environmental and social benefits. The results indicate that sugarcane bagasse ash, rice husk ash, algaroba wood ash and ground glass powder have high silica and alumina contents and are suitable as precursors. Eggshells and seashells can act as calcium sources. The reviewed findings show

mechanical strength increments exceeding 1000 kPa in early stages and up to an 80% reduction in greenhouse gas emissions. It is concluded that the utilization of these local wastes enables the development of low-carbon binders, aligning mechanical efficiency and sustainability.

KEYWORDS: Sustainable geotechnics, Alkali-activation, Alternative binders, Circular economy.

1 INTRODUÇÃO

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma problemática de alto impacto ambiental e sanitário no quesito global, especialmente em países emergentes como os membros do BRICS, onde a coleta seletiva é pouco desenvolvida e o descarte irregular é predominante (Gonçalves et al., 2018; Miranda et al., 2020). No Brasil, mesmo após a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), as taxas de reciclagem de RSU permanecem inferiores a 3% há mais de uma década. Esse cenário se torna ainda mais crítico na região Nordeste com apenas 12% de cobertura de serviços de manejo e iniciativas de valorização de resíduos (Bó; Bernardin, 2026; Brasil, 2010).

Paralelamente, a indústria da construção civil enfrenta a necessidade de reduzir suas emissões de carbono, uma vez que a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 8% das emissões globais, gerando de 0,7 a 1,1 toneladas de CO_2 por tonelada de material; comparativamente, a fabricação de cal apresenta impacto similar em sua proporção unitária, liberando cerca de 0,9 toneladas de CO_2 por tonelada produzida (Ayub; Khan, 2023; EuLA, 2022; Nie et al., 2022).

Cimentos álcali-ativados se destacam como uma alternativa sustentável para promover a descarbonização na indústria da construção civil, podendo reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 80% em comparação ao cimento Portland tradicional (Nasir et al., 2024). Entre as matérias-primas com potencial de utilização destacam-se diversos subprodutos como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz, cinzas de madeira, pó de vidro moído, cascas de ovos e conchas de marisco (Adesanya et al., 2021; Elzeadani et al., 2022; Patil; Katare, 2023). Além da redução do impacto ambiental, o uso desses resíduos promove a economia circular e contribui para a mitigação de passivos ambientais.

Diante disso, esta revisão de literatura tem como objetivo identificar resíduos sólidos disponíveis no Nordeste do Brasil com viabilidade para utilização em aglomerantes álcali-ativados, visando o desenvolvimento de soluções construtivas de baixo carbono adequadas ao contexto regional.

2 COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES ÁLCALI-ATIVADOS

2.1 Álcali-ativação

A álcali-ativação é um processo químico empregado para a produção de aglomerantes alternativos ao cimento Portland, baseado na reação entre um material precursor e um ativador alcalino. Diferentemente do ligante convencional, cuja coesão decorre da hidratação do clínquer, a resistência é obtida pela dissolução das fases amorfas do precursor e posterior formação de géis cimentantes (Wan et al., 2025).

Os precursores correspondem a materiais sólidos (naturais ou residuais) que apresentam elevados teores de sílica e alumina, preferencialmente em estado amorfo, condição esta que favorece sua reatividade. Conforme estudos recentes, cinzas, escórias e resíduos vítreos apresentam o potencial físico-químico necessário para desempenhar esse papel, fornecendo íons de silício e alumínio que serão solubilizados durante o processo de ativação (Adesanya et al., 2021; Li et al., 2025; Nasir et al., 2024).

Os ativadores alcalinos, normalmente constituídos por bases fortes ou sais alcalinos, são substâncias responsáveis por promover o ambiente químico necessário à dissolução dos constituintes do precursor, sendo a escolha do tipo e da concentração do ativador determinante para a cinética das reações e para o desempenho mecânico do material final (Elzeadani et al., 2022; Provis; Van Deventer, 2014; Wan et al., 2025).

Incorporar materiais ricos em cálcio à mistura tem se mostrado uma estratégia eficiente para otimizar o desempenho dos sistemas álcali-ativados, visto que favorece a formação de produtos cimentantes adicionais, como o gel C-A-S-H. Isso contribui para o ganho de resistência em idades iniciais e para a melhoria do comportamento mecânico global, aspecto particularmente relevante para aplicações geotécnicas (Pompermaier et al., 2024).

2.2 Precursores alternativos

2.2.1 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é um resíduo da indústria sucroalcooleira, originado da queima do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de energia, com produção mundial de 18 a 72 milhões de toneladas por ano. Devido ao elevado teor de sílica (70%), a CBCA tem sido amplamente investigada como precursor alternativo em cimentos álcali-ativados (Adesanya et al., 2021; Patil; Katare, 2023).

A reatividade da CBCA é influenciada pelas condições de queima e pelo processamento pós-combustão. A presença de material não queimado e a granulometria heterogênea podem prejudicar a atividade pozolânica e a formação de produtos cimentantes em sistemas álcali-ativados. Para mitigar esses efeitos, processos de moagem e de classificação granulométrica são frequentemente empregados para favorecer a ativação alcalina, podendo elevar o índice de atividade pozolânica de 57% para mais de 94% (Patil; Katare, 2023).

Em aplicações geotécnicas, misturas estabilizadas com 15% de aglomerante à base de CBCA e ativação com carbonato de sódio (Na_2CO_3) podem atingir resistências superiores a 1000 kPa após apenas 7 dias de cura, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa em até 25,5% quando comparado a métodos convencionais para o mesmo desempenho mecânico (Moazami et al., 2025).

Considerando o contexto agroindustrial do Nordeste do Brasil, onde a produção de cana-de-açúcar é expressiva, a CBCA representa não apenas um recurso abundante para desenvolvimento de materiais sustentáveis, mas também uma oportunidade de agregar valor econômico a um resíduo atualmente subutilizado, muitas vezes com destinação final inadequada. Nascimento et al. (2019) destacam que cinzas de biomassa produzidas na região possuem granulometrias reduzidas que favorecem a nucleação da fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

2.2.2 Cinza da casca de arroz

As cinzas da casca de arroz (CCA) são resíduos agroindustriais da indústria alimentícia, originados a partir da queima da casca para a produção de energia, com destaque por possuir o maior conteúdo de sílica (85-95%) obtível de um produto vegetal (Adesanya et al., 2021; Ferreira et al., 2023). A cada tonelada de arroz processada, são produzidos aproximadamente 200 kg de casca, resultando em cerca de 40 kg de cinza após a queima (Zareei et al., 2017). Estima-se que sejam geradas anualmente entre 70 e 80 milhões de toneladas de CCA no mundo e, no Brasil, o valor é cerca de 466 mil toneladas por ano (Elzeadani et al., 2022; Pompermaier et al., 2024).

Devido à sua composição, a CCA tem sido estudada quanto ao potencial como precursor ou adição em ligantes álcali-ativados. Estudos indicam que a substituição de apenas 15% de cimento por CCA pode elevar a resistência à compressão em até 20% aos 28 dias (Zareei et al., 2017), enquanto, em aplicações geotécnicas de pavimentação, a incorporação de 5% de CCA em misturas de resíduos de bauxita ativadas alcalinamente promoveu um aumento de mais de 10 vezes na resistência à compressão simples, indo de 106,19 kPa para 1247,78 kPa (Reddy; Hegde, 2026).

Ferreira et al. (2023) mostraram que a CCA pode ser álcali-ativada com o uso de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), sendo válido ressaltar que as resistências obtidas com KOH são mais elevadas. As reações entre a CCA e os ativadores alcalinos também são descritas por Le e Ludwig (2020). Os autores afirmam que a moagem prévia da cinza aumenta a área específica e a fração reativa, favorecendo a dissolução das fases amorfas e a formação de produtos cimentantes, gerando assim um cimento álcali-ativado de melhor qualidade.

Considerando o cultivo tradicional de arroz vermelho no Vale Piancó (PB), o aproveitamento da CCA em aglomerantes de baixo carbono pode reduzir a disposição inadequada do resíduo e insere a região no contexto da economia circular. Ao agregar valor econômico à cadeia produtiva local, surge assim uma nova fonte de renda para os agricultores, principalmente na agricultura familiar.

2.2.3 Cinza de madeira

A madeira é um dos recursos energéticos mais utilizados globalmente e sua combustão em caldeiras industriais gera um volume massivo de cinzas de biomassa. Quimicamente, essas cinzas apresentam uma composição complexa e altamente variável, dependendo da espécie vegetal e das condições de queima, sendo caracterizadas por estruturas predominantemente amorfas ricas em sílica, alumina e/ou cálcio (Balagosa et al., 2025), logo contribuem positivamente em cimentos álcali-ativados.

Acerca do reaproveitamento de cinzas de madeira, Pereira et al. (2024) verificaram que a cinza de resíduos de eucalipto, rica em sílica amorfa, pode atuar como precursor, tendo sua reatividade aumentada pela moagem. Narani et al. (2024), ao estudarem cinzas volantes provenientes de uma indústria de papel, identificaram predomínio de cálcio (47,79%), enquanto Jensen et al. (2026) observaram predominância de sílica em cinzas pesadas de madeira. Esses resultados evidenciam a elevada variabilidade composicional das cinzas de madeira, a qual depende da espécie vegetal e das condições de combustão, mas também reforçam seu potencial como precursor ou fonte complementar de cálcio.

No contexto do Nordeste do Brasil, a algaroba (*Prosopis Juliflora*) é uma árvore que foi inserida artificialmente no bioma da caatinga, onde se adaptou rapidamente ao clima semiárido, possuindo crescimento acelerado. Atualmente, a algaroba é considerada uma espécie invasora muito abundante na região, mas sua madeira possui alto potencial calorífico, o que a faz ser utilizada como fonte energética em fornos, especialmente nos setores têxtil e cerâmico (Nascimento et al., 2019).

Moura et al. (2021) e Nascimento et al. (2019) encontraram na cinza da queima da lenha de algaroba a presença predominante de compostos de cálcio (>70%) e baixos teores de sílica e alumina, podendo ser utilizada de forma similar ao calcário, favorecendo a nucleação da fase C-S-H, o que a posiciona como um componente de alto valor para a estabilização de solos na região semiárida.

2.2.4 Pó de vidro

O vidro é um material inorgânico e quimicamente estável que, embora tecnicamente 100% reciclável, enfrenta sérios gargalos quanto à circularidade na reciclagem. Globalmente, a produção anual de vidro é estimada em cerca de 130 milhões de toneladas, sendo majoritariamente composta por embalagens (48%) e vidros planos (42%). Apesar do volume produzido, a taxa global de reciclagem é de apenas 21%, caindo para 11% no caso de vidros planos, devido a dificuldades em relação ao manejo e à triagem (Baek et al., 2025).

Para a engenharia de materiais, a transformação desse passivo em pó de vidro moído (PVM) representa uma oportunidade estratégica de economia circular. Tecnicamente, o PVM destaca-se como um precursor suplementar de alta eficiência devido ao seu conteúdo de sílica (SiO_2) em estado amorfo, variando de 65% a 90% (Adesanya et al., 2021; Baldovino et al., 2021; Inazumi et al., 2025; Shahnazi et al., 2025). Diferentemente das cinzas de biomassa, que podem apresentar alta porosidade e contaminantes orgânicos, o PVM fornece uma fonte de silício mais homogênea e prontamente dissolúvel (Ayub e Khan, 2023; Baldovino et al., 2021; Patil; Katare, 2023).

Em sistemas álcali-ativados, a finura da moagem do vidro é o fator determinante para a cinética da reação: quanto menor a partícula, maior a área superficial específica disponível, o que acelera a taxa de dissolução dos íons de silicato. A reação resulta na formação de fases ligantes fundamentais, como o gel N-A-S-H (silicato de sódio e alumínio hidratado) e, na presença de fontes de cálcio, os géis C-S-H e C-A-S-H (silicato de cálcio e alumínio hidratado) (Shahnazi et al., 2025).

Em misturas de solo siltoso compactado com cal, a substituição de 5% por 30% de PVM resultou em um incremento na resistência à compressão simples de 956% aos 7 dias e 137% aos 90 dias de cura (Baldovino et al., 2021). E, em solos arenosos, a utilização de até 50% de PVM permitiu alcançar uma resistência de 14,73 MPa aos 91 dias, um valor dez vezes superior à resistência obtida aos 7 dias.

Além de elevar a resistência mecânica, a incorporação de PVM tem demonstrado eficácia na imobilização de metais pesados e na redução da expansão causada pela reação álcali-agregado (Baldovino et al., 2021; Li et al., 2025). Para a realidade da infraestrutura brasileira, o uso de teores otimizados (entre 15% e 30% de PVM) permite que misturas de solo-cal atinjam os requisitos normativos para sub-bases e bases de pavimentos (UCS > 1,2 MPa), com o benefício adicional de reduzir a porosidade da matriz em até 10%.

Sob a ótica ambiental e econômica, cada tonelada de vidro reinserida no ciclo produtivo economiza 1,2 toneladas de matérias-primas e reduz drasticamente as emissões de CO_2 inerentes à produção de cimento (Baek et al., 2025). Portanto, diante dos gargalos logísticos da reciclagem convencional no Nordeste, a utilização do PVM em sistemas álcali-ativados aplicados à estabilização de solos representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável.

2.3 Fontes alternativas de cálcio

2.3.1 Casca de ovo

A produção global de ovos atingiu 91 milhões de toneladas em 2023; consequentemente, são produzidas cerca de 8 milhões de toneladas de resíduos de casca de ovo anualmente, usualmente destinados a aterros sanitários (Omur et al., 2024). As cascas de ovos, segundo Seikh et al. (2025), são compostas por 90% de carbonato de cálcio, logo são uma fonte de cálcio com pureza maior que a maioria das rochas calcárias encontradas na natureza.

Em cimentos álcali-ativados, cascas de ovos moídas vêm sendo estudadas como fontes de cálcio em seu estado natural no formato de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e após calcinação no formato de óxido de cálcio (CaO) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Omur et al. (2024), ao avaliar um cimento álcali-ativado de metacaulim, encontraram que a adição de pó de casca de ovos sem calcinação aumentou em 22% a resistência das pastas e, ao realizar uma análise de ciclo de vida, concluíram que o uso de pó de casca de ovo diminui o impacto ambiental.

A pesquisa de Nierwinski et al. (2026) demonstrou que uma cal produzida, a partir da calcinação de cascas de ovo, apresenta maior teor de óxido de cálcio (72,9%) e, consequentemente, proporciona melhores resultados na estabilização de solo do que uma cal dolomítica comercial do Brasil. Considerando cimentos álcali-ativados, Ferreira et al. (2023) demonstraram que blocos feitos de cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo álcali-ativados, quando moldados com porosidade menor que 55%, atendem aos critérios da ASTM C90-16a para blocos estruturais (ASTM, 2016). Além disso, o pó de casca de ovo tem sido investigado em sistemas geopoliméricos de baixo carbono (Abdellatief et al., 2025), evidenciando seu potencial como fonte alternativa de cálcio para materiais cimentícios sustentáveis.

Diante do crescimento da produção avícola no Nordeste do Brasil, a integração da casca de ovo em aglomerantes de baixo carbono alinha-se aos princípios da economia circular e da engenharia sustentável. Entretanto, são necessários estudos para avaliar se resultados mais sustentáveis são obtidos com sua utilização na forma natural ou após calcinação.

2.3.2 Conchas de moluscos marinhos

A gestão de resíduos de moluscos marinhos representa um desafio ambiental de escala massiva, visto que a produção global de moluscos atingiu 18,9 milhões de toneladas em 2022 e as conchas representam entre 40% e 70% do peso total do animal. Após o consumo, o descarte tende a ser feito de forma irregular em oceanos e aterros, causando desequilíbrios ecossistêmicos e odores desagradáveis (Cescon et al., 2025).

Do ponto de vista químico, o carbonato de cálcio presente nas conchas pode ser convertido em óxido de cálcio por meio de calcinação (geralmente em temperaturas entre 700 °C e 900 °C) e o material resultante apresenta elevada reatividade, favorecendo a formação de produtos como géis do tipo C-A-S-H, especialmente quando combinado com precursores ricos em sílica e alumina (Camargo; Estupinan, 2022; Cescon et al., 2025; Monneron-Gyurits et al., 2018).

Além do uso em matrizes cimentícias, a aplicação de conchas de moluscos marinhos (CMM) em sistemas álcali-ativados tem sido explorada em estabilização de solos e imobilização de contaminantes, demonstrando melhoria do comportamento físico-químico dos materiais tratados. Esses resultados reforçam a versatilidade do resíduo como fonte de cálcio e sua adequação para aplicações em engenharia geotécnica, particularmente em contextos onde o desenvolvimento rápido de resistência e a redução do impacto ambiental são desejáveis (López et al., 2025).

A literatura revisada indica que CMM podem ser utilizadas de diferentes formas pelo seu elevado teor de carbonato de cálcio (superior a 90%), incluindo como substituto parcial do calcário, como adição mineral

rica em cálcio ou, em alguns casos, como componente do próprio sistema ativador. Estudos relatam desempenhos mecânicos comparáveis aos obtidos com ligantes convencionais, com resistências à compressão que podem atingir ou superar os valores típicos do cimento Portland, dependendo do precursor empregado, das condições de ativação e do regime de cura adotado (Cescon et al., 2025).

A disponibilidade de CMM no Nordeste do Brasil é elevada, pois somente na cidade de Conde (PB) são descartadas diariamente cerca de 11 toneladas de conchas (Camargo; Estupinan, 2022). Considerando que a atividade de mariscagem é desenvolvida por populações vulneráveis, a valoração econômica deste material ainda apresenta potencial de efeito social positivo, pois a substituição parcial do calcário natural promove a valorização de um resíduo abundante, frequentemente concentrado em regiões costeiras.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto da produção de resíduos agroindustriais no Nordeste, a cinza de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz e o pó de vidro são precursores promissores para matrizes álcali-ativadas devido aos elevados teores de sílica e alumina amorfa (de 70% a 95%). O beneficiamento por moagem prévia consolida-se como fator chave, elevando o índice de atividade pozolânica a mais de 94%. De forma complementar, cascas de ovos, conchas de mariscos e cinza de algaroba se apresentam como oportunidades para novas fontes alternativas de cálcio, com teores de carbonato de cálcio acima de 90%, favorecendo a formação de géis C-S-H e C-A-S-H essenciais para que misturas geotécnicas alcancem resistências superiores a 1000 kPa em aplicações de camadas de pavimentação.

A valorização desses passivos ambientais pode reduzir em até 80% as emissões de gases de efeito estufa em comparação ao cimento Portland, promovendo a descarbonização da construção civil. Além disso, promove a economia circular regional, mitiga o descarte inadequado e gera novas oportunidades de renda para comunidades locais vulneráveis, como as famílias ligadas à mariscagem e à agricultura familiar. Por consequência, conclui-se que o aproveitamento desses resíduos é vista como uma solução estratégica para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e o fortalecimento socioeconômico da região nordestina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdellatief, M., et al. (2025) Influence of Silicate Modulus and Eggshell Powder on the Expansion, Mechanical Properties, and Thermal Conductivity of Lightweight Geopolymer Foam Concrete. *Materials*, 18, 2088.

Adesanya, E., et al. (2021) Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125558.

ASTM International (2016) ASTM C90-16a: Standard specification for loadbearing concrete masonry units.

Ayub, F., Khan, S.A. (2023) An overview of geopolymer composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, 404, 133195.

Baek, C.R., et al. (2025) Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories. *Environmental Engineering Research*, 30, 240241.

Balagosa, J., et al. (2025) Field case study of soil columns mixed with wood pellet fly ash blended binder in weathered granite soils. *Case Studies in Construction Materials*, 22, 04378.

Baldovino, J.J.A., et al. (2021) Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, 121874.

Bó, G.C.S., Bernardin, A.M. (2026) The (de)valuation of solid waste in developing countries: The Brazilian case (2012-2022) after the national solid waste policy. *Cleaner Waste Systems*, 13, 100457.

Brasil (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Brasília.

Camargo, M., Estupinan, R.A. (2022) O renascer do marisco: um relato de experiência. *Revista Práxis: Saberes da Extensão*, 10, p. 64-75.

Cescon, A.P., et al. (2025) Urban mining of bivalve shell waste as a sustainable alternative to limestone exploitation: a review on alkali-activated cements and mortars. *Mining*, 5, 69.

Elzeadani, M., et al. (2022) One part alkali activated materials: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 57, 104871.

European Lime Association (2022) *CO_2 innovation in the lime sector 3.0.*

Ferreira, F.A., et al. (2023) Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. *Construction and Building Materials*, 364, 129931.

Gonçalves, A.T.T., et al. (2018) Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. *Revista Ambiente & Água*, 13.

Inazumi, S., et al. (2025) Development of environmentally sustainable geopolymer-based soil solidifiers using waste siding and glass powders. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100976.

Jensen, A.H., et al. (2026) Wood bottom ash as sand replacement in concrete: Mechanical properties and prediction of durability. *Construction and Building Materials*, 512, 145415.

Le, H.T., Ludwig, H.M. (2020) Alkali silica reactivity of rice husk ash in cement paste. *Construction and Building Materials*, 243, 118145.

Li, L., et al. (2025) Stability and rheological properties of grouts with waste glass powder as cement replacement: Influences of content and alkali activator. *Materials*, 18, 353.

López, L.C.S., et al. (2025) Stabilization of Clay Soils Using a Lime Derived from Seashell. *Materials*, 18, 2723.

Miranda, I.T.P., et al. (2020) The integration of recycling cooperatives in the formal management of municipal solid waste as a strategy for the circular economy: The case of Londrina, Brazil. *Sustainability*, 12, 10513.

Moazami, A., et al. (2025) Sustainable soil stabilization with sodium carbonate-activated slag, pumice, rice husk, and sugarcane bagasse ashes: A life cycle assessment approach. *Results in Engineering*, 27, 106900.

Monneron-Gyurits, M., et al. (2018) Valorization of mussel and oyster shells toward metakaolin-based alkaline activated material. *Applied Clay Science*, 162, p. 15-26.

Moura, L.S., et al. (2021) Use of calcium-rich wood biomass combustion ashes as filler in hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 23, p. 2375-2393.

Narani, S.S., et al. (2024) Wood fly ash and blast furnace slag management by alkali-activation: Trace elements solidification and composite application. *Journal of Environmental Management*, 354, 120341.

Nascimento, F., et al. (2019) Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. *Cerâmica*, 65, p. 85-91.

Nasir, M., Mahmood, A.H., Bahraq, A.A. (2024) History, recent progress, and future challenges of alkali-activated binders – An overview. *Construction and Building Materials*, 426, 136141.

Nie, S., et al. (2022) Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130270.

Nierwinski, H.P., et al. (2026) Sustainable Soil Stabilization Using Eggshell-Derived Lime: A comparative assessment against commercial lime. *Sustainability*, 18, 1442.

Omur, T., et al. (2024) Utilization of eggshell powder in one-part alkali-activated metakaolin based binder. *Construction and Building Materials*, 445, 137981.

Patil, P.P., Katare, V.D. (2023) Development of sustainable alkali-activated binder for building products using sugarcane bagasse ash: A review.

Pereira, B.C.F., et al. (2024) Wood waste ash as sole solid precursor in a novel alkali-activated material: Influence of the ash particle size. *Materials Letters*, 370, 136837.

Pompermaier, C.L., et al. (2024) Stabilization of waste foundry sand with alkali-activated binder: Mechanical behavior, microstructure and leaching. *Construction and Building Materials*, 444, 137772.

Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J. (2014) *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM*, Vol. 13.

Reddy, P.S., Hegde, A. (2026) Assessing the efficacy of alkali-activated rice husk ash amended bauxite residue composites for pavement applications. *Developments in the Built Environment*, 25, 100876.

Seikh, Z., et al. (2025) An overview of utilization of egg shell wastes: A transformation from waste to wealth. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D.*

Shahnazi, M.H., et al. (2025) Performance assessment of waste glass powder in sandy soil stabilization: Effect of alkaline activator on mechanical and microstructural properties. *Results in Engineering*, 27, 106821.

Wan, X., et al. (2025) Research on alkali-activated systems based on solid waste-derived activators: A review. *Sustainability*, 17, 254.

Zareei, S.A., et al. (2017) Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, p. 73-81.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/125

Waterfill – Aplicativo Aberto para Cálculo de Balanço Hídrico em Aterro Sanitário

Guilherme Barbosa de Santana
Graduando em Ciência da Computação, UFBA, Salvador, Brasil, gbarbosaa.021@gmail.com

Sandro Lemos Machado
Professor, DCTM-UFBA, Salvador, Brasil, smachado@ufba.br

Miriam de Fátima Carvalho
Professora, DCTM-UFBA, Salvador, Brasil, miriam.machado@ufba.br

Mehran Karimpour-Fard
Professor, IUST, Tehrãn, Irã, mehranfard@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta a implementação, em linguagem Python, do modelo proposto por São Mateus et al. (2012) para o cálculo do balanço hídrico em aterros sanitários localizados em regiões de clima tropical , bem como sua compilação para as plataformas Windows e Linux. O Waterfill é um aplicativo gratuito, de livre distribuição, disponível para download. O sistema dispõe de uma interface simples e intuitiva para inserção e visualização de dados, incorporando mecanismos de controle que reduzem a ocorrência de erros na entrada de informações e é destinado a profissionais, pesquisadores e órgãos de gestão ambiental, que frequentemente carecem de ferramentas específicas, acessíveis e confiáveis para a realização desse tipo de análise.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço hídrico, Aplicativo, Aterro sanitário.

ABSTRACT: This work presents the implementation, in Python, of the model proposed by São Mateus et al. (2012) for calculating the water balance in landfills located in tropical climate regions and developing countries, as well as its compilation for Windows and Linux platforms. Waterfill is a free application, freely distributed for non-commercial purposes, available for download. The system has a simple and intuitive interface for data entry and visualization, incorporating control mechanisms that reduce the occurrence of errors in data input. The application is intended for professionals, researchers, and environmental management agencies, who frequently lack specific, accessible, and reliable tools for carrying out this type of analysis.

KEYWORDS: Water balance, Application, Sanitary landfill.

1 INTRODUÇÃO

São Mateus et al. (2012) apresentam uma revisão abrangente sobre balanço hídrico em aterros sanitários e propõem um modelo de cálculo, validado por meio de um estudo de caso na célula 5 do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), em Salvador – Ba, com base em dados de monitoramento geotécnico. O modelo contempla as particularidades dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em regiões tropicais, geralmente caracterizados por altos teores de umidade e matéria orgânica e busca suprir lacunas frequentemente negligenciadas em métodos tradicionais de balanço hídrico, como o HELP – hydrologic evaluation of landfill performance (Schroeder et al., 1994) e o MODUELO (MODUELO, 2006), que não contemplam a expulsão de líquidos dos RSU por compressão, decorrente do peso das camadas sobrepostas e a liberação de líquidos de constituição excedentes durante a decomposição dos resíduos.

O modelo proposto por São Mateus et al (2012) utiliza informações climáticas (precipitação e temperatura), produção de biogás, volume de lixiviado coletado, volume de RSU disposto e a evolução geométrica da célula ao longo do tempo. Os fenômenos contemplados pelo modelo constam na Figura 1 e na equação 1. Como as dimensões em planta do aterro são muito superiores à espessura da massa de RSU, os fenômenos analisados podem ser representados de forma unidimensional. As variáveis de entrada do balanço hídrico atuam no topo da célula, considerando fundo e laterais impermeáveis, e incluem a precipitação (R) e a quantidade de água que entra no aterro com o RSU e com o solo de cobertura. As variáveis de saída compreendem evaporação (E), escoamento superficial (RO), consumo de água nos processos de decomposição, geração de lixiviado e a liberação de vapor d'água associada à extração de biogás. A Figura 1 ilustra dois cenários utilizados para derivar as equações do modelo, considerando ou não o uso de camadas de cobertura. Nesta figura, $I_{(soil)}$ é a infiltração de água na camada de cobertura, $I_{(MSW)}$ é a infiltração de água no RSU e L é o volume de lixiviado coletado. $\Delta\theta$ é relacionado às mudanças de volume de água armazenada no sistema e $\theta_{i(soil)}$ e $\theta_{i(MSW)}$ são os valores de umidade volumétrica iniciais do solo de cobertura e do RSU, respectivamente.

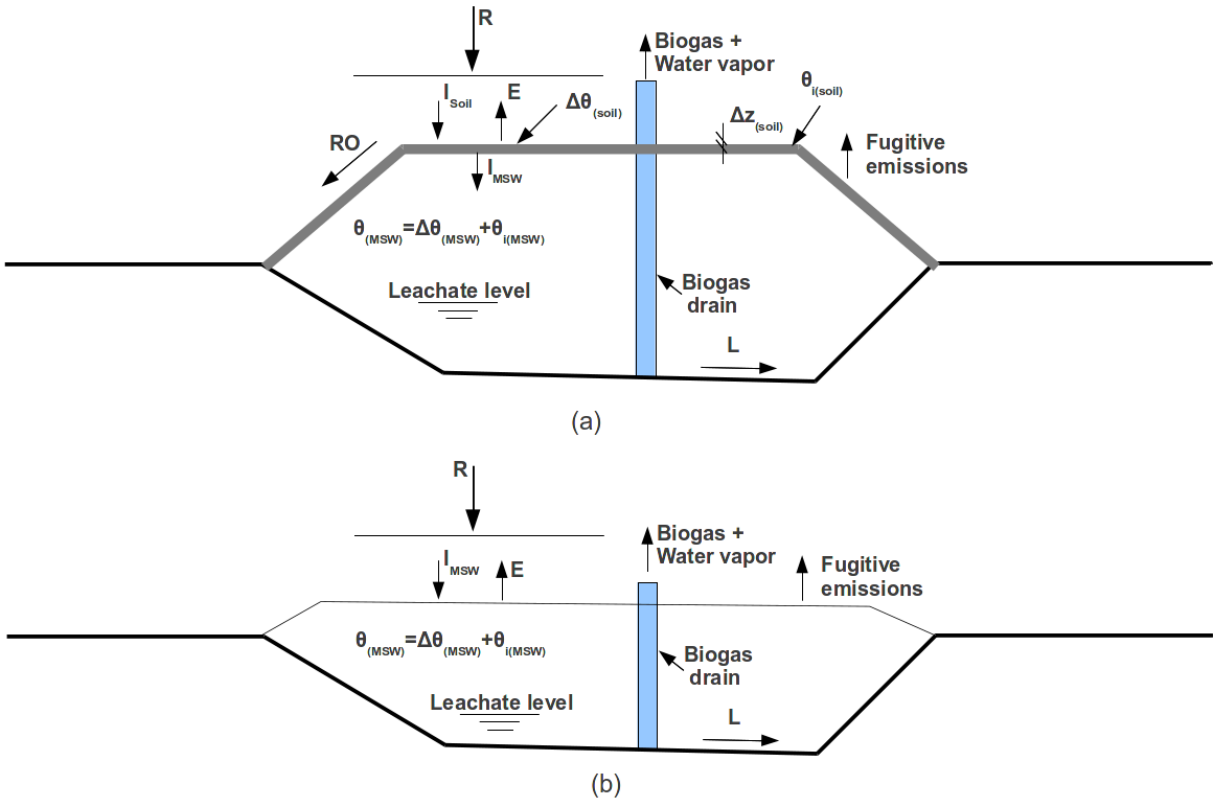


Figura 1. Modelo físico adotado para o balanço hídrico proposto: a) aterro com camada de cobertura e b) aterro sem camada de cobertura.

$$R + \theta_{i(soil)} \cdot \Delta z_{(soil)} = RO + E + \Delta\theta_{(soil)} \cdot \Delta z_{(soil)} + I_{(MSW)} \quad (1)$$

Em que $\Delta\theta_{(soil)}$ (-) representa as mudanças de umidade volumétrica na camada de solo de cobertura e $\Delta z_{(soil)}$ (L) é a espessura da camada de cobertura. R, RO, E, e $I_{(MSW)}$ são considerados em termos de coluna de água equivalente (L). No modelo proposto, o escoamento superficial é calculado como uma função da intensidade da chuva ($\partial R/\partial t$) e da capacidade de infiltração de água no solo ($\partial I_{(soil)}/\partial t$), Equação 2. O valor de $I_{(soil)}$ (L), é calculado com o uso da Equação 03.

$$\frac{\partial RO}{\partial t} = \frac{\partial R}{\partial t} - \frac{\partial I_{(soil)}}{\partial t} \quad (2)$$

$$I_{(soil)}\ (t) = S.t^{1/2} + A.t \quad (3)$$

Em que t é o tempo decorrido (T), A (L/T) é a permeabilidade ajustada do solo $0{,}5\ k_{sat} \leq A \leq 2/3\ k_{sat}$, onde k_{sat} é a permeabilidade do solo saturado e a capacidade de absorção de água do solo é representada por S ($L \cdot T^{-1/2}$), a qual é função de sua umidade inicial (ver Equação 4).

$$S^2 = 2k_{sat}\,[h_{surf} - h_o]\,[\theta_f - \theta_o] \quad (4)$$

Em que h_{surf} (L) representa a coluna de água sobre a superfície do solo, considerada como zero neste trabalho; h_o (L) representa a carga de sucção do solo da camada de cobertura para a uma condição de umidade inicial (θ_o) e θ_f é a umidade final do solo após a infiltração.

2 COMO USAR O APLICATIVO DE BALANÇO HÍDRICO, ENTRADA E VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO PROGRAMA, E SUGESTÕES DE PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.

A Figura 2 apresenta a tela principal do programa, que reúne os botões de acesso aos módulos de entrada e visualização de dados, além do manual do usuário, disponível em português, inglês e Farsi. Ao selecionar o botão *Project ID*, é exibida a interface ilustrada na Figura 3, na qual o usuário deve inicialmente definir o diretório de trabalho. Em seguida, o programa realiza a busca por arquivos de entrada; caso não sejam encontrados, é sugerida a criação de um novo arquivo. Quando há arquivos disponíveis, estes são listados para seleção, permitindo a importação dos dados para edição ou visualização. Ao carregar um arquivo preexistente, o período de análise previamente definido é automaticamente recuperado, podendo ser ajustado, por exemplo, para a ampliação do intervalo de análise do balanço hídrico. Na criação de um novo arquivo, o usuário deve informar obrigatoriamente o período de análise, etapa essencial para o correto funcionamento das telas subsequentes, conforme ilustrado na Figura 4.

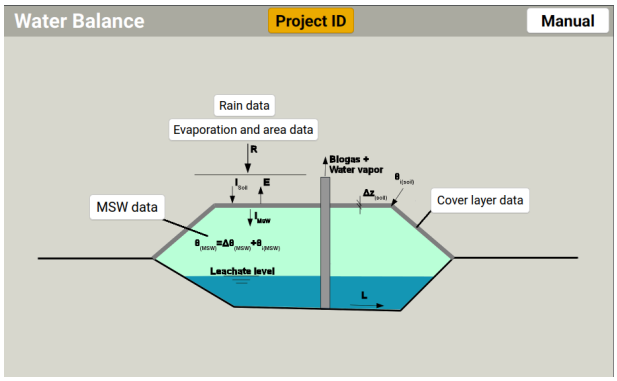


Figura 2. Tela principal do programa.

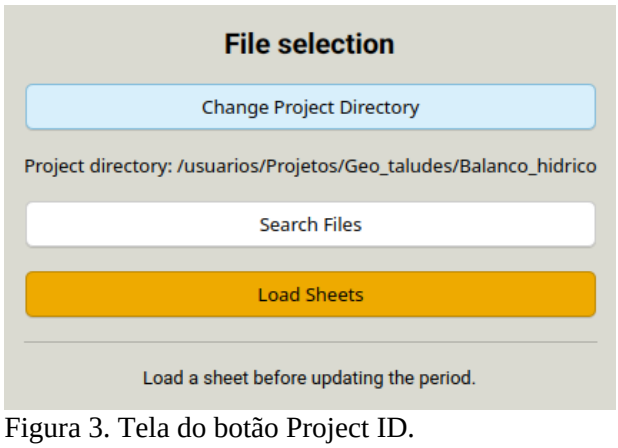


Figura 3. Tela do botão Project ID.

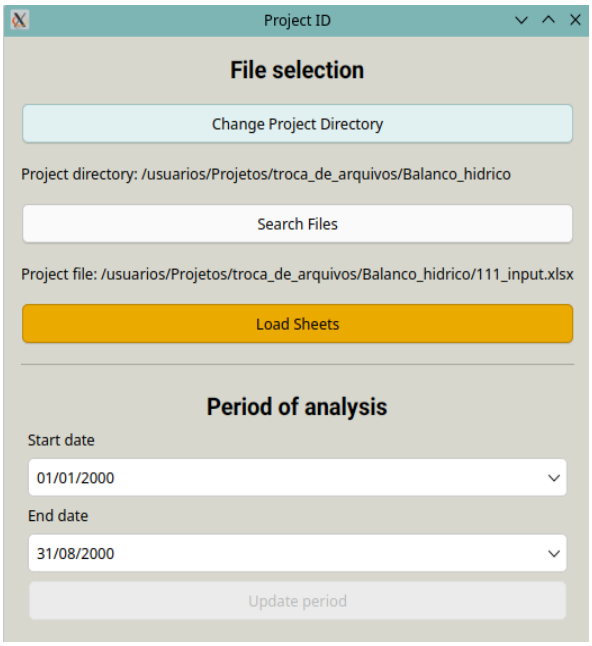


Figura 4. Tela para escolha do período de análise.

Para a inserção dos dados de precipitação, após a definição do período de análise, o usuário deve acessar o botão *Rain Data*, que abre uma tabela com 24 colunas correspondentes às horas de cada dia do período de simulação do balanço hídrico. Os dados podem ser inseridos diretamente nas planilhas geradas pelo programa ou por meio de operações de copiar e colar nos menus de entrada.

O cálculo da coluna de água que infiltra no solo é realizado com base na Equação 2, conforme ilustrado na Figura 5. O escoamento superficial ocorre somente quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração do solo. A área sob a curva de infiltrabilidade (em vermelho) representa a coluna de água infiltrante, enquanto a área em verde corresponde à parcela convertida em escoamento superficial. A determinação dessas componentes requer a definição de parâmetros hidráulicos do solo, como coeficiente médio de permeabilidade da camada de cobertura (k) e a curva média de retenção de água.

Os valores de k devem ser preferencialmente obtidos por meio de ensaios de permeabilidade em campo, como o permeâmetro de Guelph e os ensaios de infiltração em cavas. Estes últimos avaliam um volume maior de solo, permitindo representar de forma mais realista descontinuidades e heterogeneidades do meio, como trincas e fissuras associadas à retração ou ao recalque diferencial. Orientações para a execução desses ensaios são apresentadas por Azevedo e Albuquerque Filho (2013). Ressalta-se contudo, que estes ensaios não conseguem atingir um alto grau de controle na sua execução como no caso do uso do permeâmetro Guelph (Reynolds e Elrick, 1985 e Reynolds et al. 1983).

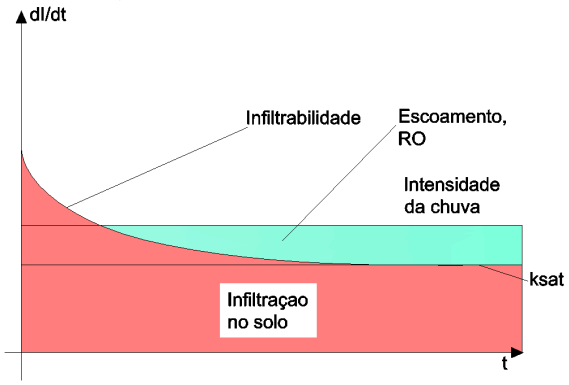


Figura 5. Cálculo da coluna de água infiltrante e do escoamento superficial.

A inserção do valor médio de permeabilidade e das demais propriedades da camada de cobertura é realizada por meio do botão *Cover Layer Data*, que abre a interface apresentada na Figura 6. Nessa tela, além do valor de k_{sat}, são informados os parâmetros da curva de retenção de água do solo, que relaciona a carga hidráulica à umidade, como h_0 e θ_0 na Equação 4, bem como os dados necessários ao ajuste da função E/Ep, que razão entre a evaporação do solo (E) e a evaporação da água livre (Ep). A curva de retenção é ajustada pela Equação 5, proposta por Van Genuchten (1980), sendo os ajustes das funções de retenção e E/Ep realizados automaticamente pelo programa. Os gráficos gerados podem ser visualizados e exportados por meio dos comandos disponíveis na interface.

$$\theta_{soil} = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{\left[1 + \left|-\alpha h_o\right|^n\right]^m} \tag{5}$$

Em que , θ_r (-) e θ_{sat} (-) são as umidades volumétricas residual e saturada, receptivamente, e α (L^{-1}), m (-) e n (-) são parâmetros de ajuste da equação. Existem diferentes técnicas para a determinação da curva de retenção de água no solo, cada uma aplicável a faixas específicas de sucção. Para solos argilosos compactados, destacam-se a câmara de Richards, pela técnica de translação de eixos, e métodos baseados em potenciômetros de ponto de orvalho ou papel-filtro, podendo-se adotar o procedimento de Machado e Dourado (2001) para acelerar os ensaios.

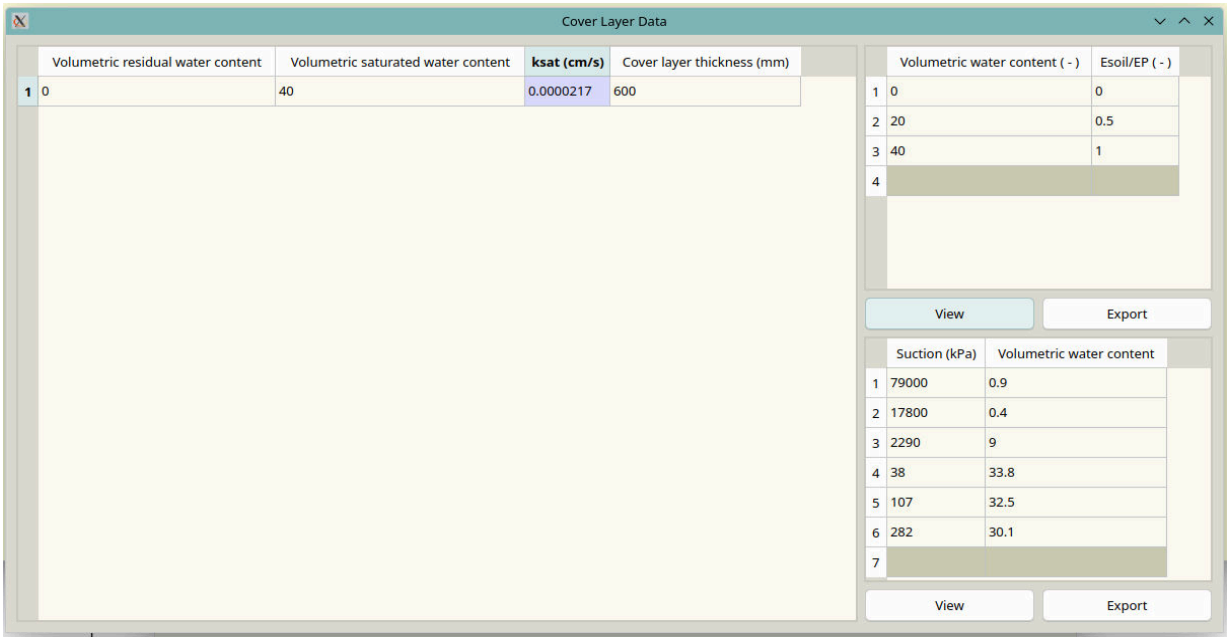


Figura 6. Tela de entrada de dados da camada de cobertura.

A taxa de evaporação pode ser determinada experimentalmente como descrito por São Mateus (2008), a partir de ensaios com dois recipientes cilíndricos submetidos às mesmas condições atmosféricas: um contendo água e outro contendo solo da camada de cobertura inicialmente saturado. As variações diárias de massa permitem determinar a razão entre a evaporação do solo (E) e a evaporação da água livre (Ep), a qual diminui ao longo do processo de secagem em função do aumento da sucção do solo. A evaporação de campo é então estimada multiplicando-se a razão E/Ep pelos valores de evaporação potencial, obtidos por estação meteorológica ou estimados mensalmente com base em dados climáticos locais. Os dados experimentais de E/Ep são inseridos no menu da Figura 6, que são automaticamente ajustados por regressão linear (Figura 7), enquanto os valores de evaporação potencial e os parâmetros geométricos do aterro referentes a área total e descoberta de RSU são informados na caixa acessada pelo botão *Evaporation and Area Data* (Figura 8).

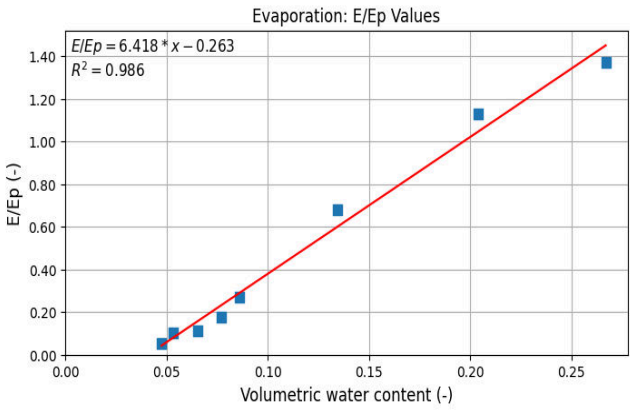


Figura 7 - Ajuste dos dados da razão E/EP versus umidade volumétrica.

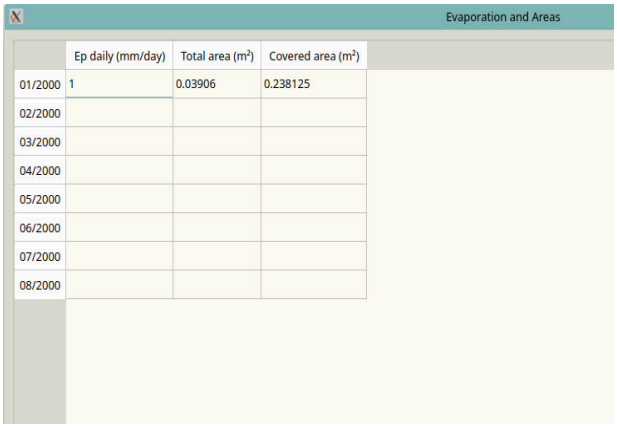


Figura 8 - Entrada de dados de EP, área total e área descoberta.

Uma vez determinados $I_{(soil)}$ e a razão E/Ep, a Equação 6 é empregada para estimar as variações do teor de água na camada de cobertura. Os valores de teor de água obtidos por essa equação são limitados pela capacidade de campo da camada de cobertura, θ_{cc}. Quando $[\theta_{(soil)}+\Delta\theta_{(soil)}]<\theta_{cc}$, toda a infiltração é retida na camada de cobertura. Caso contrário, a parcela excedente é considerada infiltração no RSU, sendo $I_{(MSW)}$ calculado pela Equação 7.

$$\Delta\theta_{(soil)} = (I_{(soil)}-E)/\Delta z_{(soil)} \quad (6)$$

$$I_{(MSW)} = I_{(soil)}-E-(\theta_{(soil)}-\theta_{cc})\cdot\Delta z_{(soil)} \quad (7)$$

Conhecido $I_{(MSW)}$ a Equação 8 é aplicada para o cálculo do balanço hídrico do RSU. Nessa etapa, a quantidade de líquido armazenada na célula ($\theta_{(MSW)}.z_{(MSW)}$) é determinada em função de $I_{(MSW)}$, da quantidade de água incorporada ao RSU durante o período de análise ($\sum\theta_{i(MSW)}\cdot\Delta z_{(MSW)}$), do lixiviado coletado ($L/A_{(MSW)}$), da saída de vapor de água associada ao biogás ($V_{wvapor}/A_{(MSW)}$) e da água consumida nos processos de biodegradação ($V_{wbiodeg}/A_{(MSW)}$).

$$\theta_{(MSW)}.z_{(MSW)} = I_{(MSW)} + \Sigma\theta_{i(MSW)}.\Delta z_{(MSW)} - L/A_{(MSW)} - V_{w\ biodeg}/A_{(MSW)} - V_{w\ vapor}/A_{(MSW)} \quad (8)$$

Em que $\theta_{(MSW)}$ (-) é a umidade volumétrica do RSU; $V_{w\ biodeg}$ (L^3) é o volume de água consumido pelos processos de biodegradação; $V_{w\ vapor}$ (L^3) é a quantidade de água extraída do aterro com o biogás, que segundo São Mateus et al., (2012) e outros autores citados na literatura é pouco significativa nos cálculos; L (L^3) é o volume de lixiviado coletado/tratado; $A_{(MSW)}$ (L^2) representa a área transversal das células do aterro; $\Delta z_{(MSW)}$ (L) é a espessura de cada camada de RSU disposta nas células do aterro; $z_{(MSW)}$ (L) é a espessura total do maciço de RSU (L).

A perda de massa do RSU, o consumo de água na decomposição e a liberação da água de constituição excedente é calculada conforme descrito em Machado *et al*. (2009) a partir da geração de gás estimada para o aterro, com o uso do parâmetro C_m (ver Tabela 1, com valores típicos de C_m e de consumo de água na decomposição), que representa a geração de metano por massa de RSU seca decomposta, obtida com o uso de equações estequiométricas. Para fins de simplificação, um valor de C_m = 480 m^3 CH_4/Mg RSU seco degradado é adotado pelo programa, assim como um consumo de água médio de 0,20 Mg H_2O/Mg RSU seco degradado.

Tabela 1. Valores de C_m e de consumo de água por decomposição do RSU (adaptado de MACHADO et al., 2009)

Componentes degradáveis do RSU	Consumo de água (média) (Mg H_2O/Mg RSU seco degradado)	Cm (médio) (m^3 CH_4/Mg RSU seco degradado)
Comida/ lixo jardim	0,27	493,36
Papel/papelão	0,18	428,61
Madeira	0,24	484,94

Para a estimativa da produção de biogás do aterro, devem ser informados os valores do potencial de geração de metano (Lo) e da constante de decaimento (k), empregados no modelo de decaimento de primeira ordem. Esses parâmetros são inseridos na janela acessada pelo botão *MSW data* (Figura 9). Para o cálculo do balanço hídrico do maciço de RSU, também são necessários informar os volumes de lixiviado coletado no aterro (L) e de água expulsa por compressão em função dos alteamentos das camadas de resíduos. Esses dados devem ser informados mensalmente, por meio dos menus apresentados nas Figuras 8 e 9.

A estimativa do volume de lixiviado expulso do RSU por compressão, conforme São Mateus et al. (2012), é realizada por meio de ensaios de compressão confinada em consolidômetro de grandes dimensões (Figura 10), utilizando amostras coletadas na frente de serviço do aterro. A partir da relação entre a pressão vertical aplicada e a quantidade de água expulsa, juntamente com o teor de umidade inicial do resíduo, constrói-se o gráfico $\Delta\sigma_z$ x Δw, o qual permite quantificar a parcela de líquidos expulsa por compressão no balanço hídrico do RSU. O teor de umidade inicial é determinado a partir de amostras quarteadas de RSU, com massa mínima de 15 kg, coletadas na frente de serviço e secas em estufa a 70 °C até constância de massa.

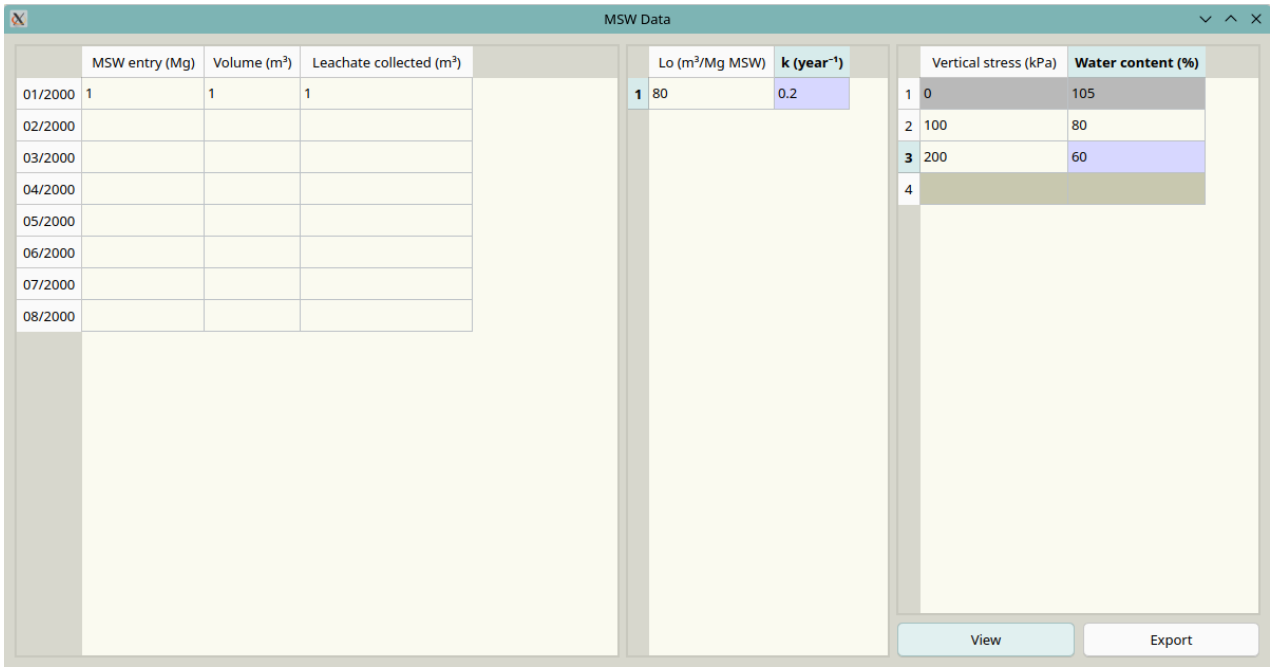


Figura 9. Entrada de dados relativos ao RSU no programa.



Figura 10. Equipamento típico utilizado para a realização do ensaio de compressão confinada de grandes dimensões.

No caso ilustrado na Figura 1b, que representa a condição na frente de serviço (sem camada de cobertura) assume-se que toda a precipitação se converte em infiltração na massa de RSU. Nessa situação, a evaporação é considerada igual à evaporação potencial da água livre. O balanço hídrico correspondente é descrito pela Equação 9.

$$R + \Sigma \theta_{i(MSW)} \cdot \Delta z_{(MSW)} = E + L / A_{(MSW)} + \theta_{(MSW)} \cdot z_{(MSW)} + V_{w\ biogás} / A_{(MSW)} + V_{w\ vapor} / A_{(MSW)} \quad (9)$$

Os dados de água consumida no processo de decomposição em conjunto com os dados de água expulsa do RSU por compressão são utilizados para separar a quantidade de água que permanece junto às partículas daquela que vai se juntar aos valores de $I_{(MSW)}$ para formar o nível de lixiviado no aterro, o qual pode ser acompanhado pela instalação de piezômetros no local, conforme descrito em São Mateus et al., (2012). Ao se pressionar o botão *View Results* o programa apresenta as tabelas e gráficos resultantes do cálculo do balanço hídrico para o período de análise, possibilitando a exportação dos mesmos para uso externo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o aplicativo Waterfill, desenvolvido em linguagem Python com base no modelo de São Mateus et al. (2012), para o cálculo do balanço hídrico em aterros sanitários de regiões tropicais. A ferramenta incorpora mecanismos frequentemente negligenciados, como a expulsão de líquidos dos RSU por compressão e durante a decomposição, além de uma representação simplificada das trocas de umidade com a atmosfera. Com interface intuitiva, mecanismos de controle e distribuição gratuita, o Waterfill constitui uma ferramenta potencialmente útil para apoio técnico, científico e à gestão ambiental

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, A. A., Albuquerque Filho, J. L. (2013). Ensaio de Permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo. 4 ed. São paulo: ABGE, 75p.

Machado, S. L., Dourado, K. A. (2001). Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. Anais *4° Simpósio de Brasileiro de Solos Não Saturados.* Porto Alegre, v. 1.

Machado, S.L., Carvalho, M.F., Gourc, J.P., Vilar, O.M., Nascimento, J.C.F (2009). Methane generation rates in tropical landfills: simplified methods and field results. *J. Waste Management*, 29 (1), p.153-161 doi:10.1016/journal.wasman.2008.02.017.

Moduelo – MT. (2006). Manual Técnico del usuário de la versión 3. Grupo de ingeniería Ambiental. Departamento de ciências y Técnicas del Agua y del Médio Ambiente, Universidad de Cantabria, España.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E. (1985). In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140 (4), p.292-302.

Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Topp, G.C. (1983). A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hidraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.* 136 (4), p.250- 268.

São Mateus, M.S.C. (2008). *Proposta de modelo para avaliação do balanço hídrico de aterros de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador.* Tese Doutorado – UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro – RJ, Brazil, 312p.

São Mateus, M.S.C., Machado, S.L., Barbosa, M.C. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. *Waste Management (Elmsford)*, 32, p.471-481.

Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M., Zappi, P.A., (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3, EPA/600/R-94/168a, US Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

Van Genuchten, M.T.H., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Proc. *Soil Sci.* Soc. Am. 44 (5), p.892–898.



contato@editoraomnisscientia.com.br
https://editoraomnisscientia.com.br/
@editora_omnis_scientia
https://www.facebook.com/omnis.scientia.9
+55 87 99920-5762



contato@editoraomnisscientia.com.br
https://editoraomnisscientia.com.br/
@editora_omnis_scientia
https://www.facebook.com/omnis.scientia.9
+55 87 99920-5762