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.

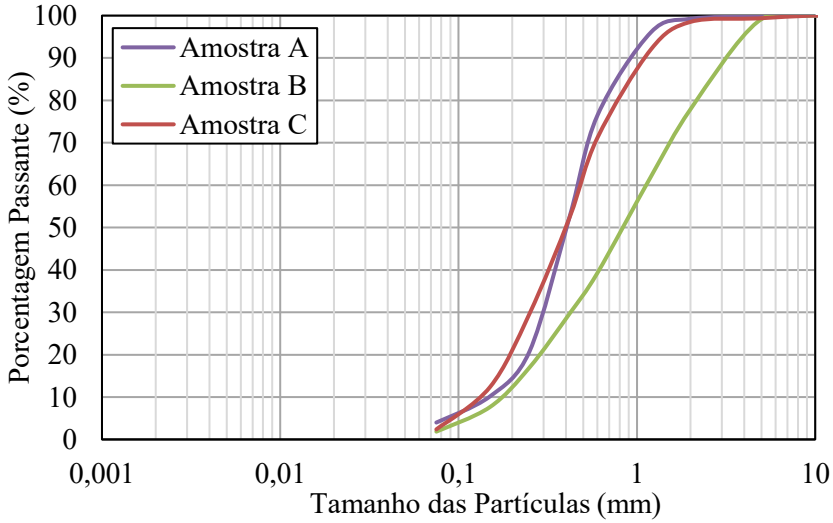


Figura 2. Amostras de ALR – Análise Granulométrica - Peneiramento.

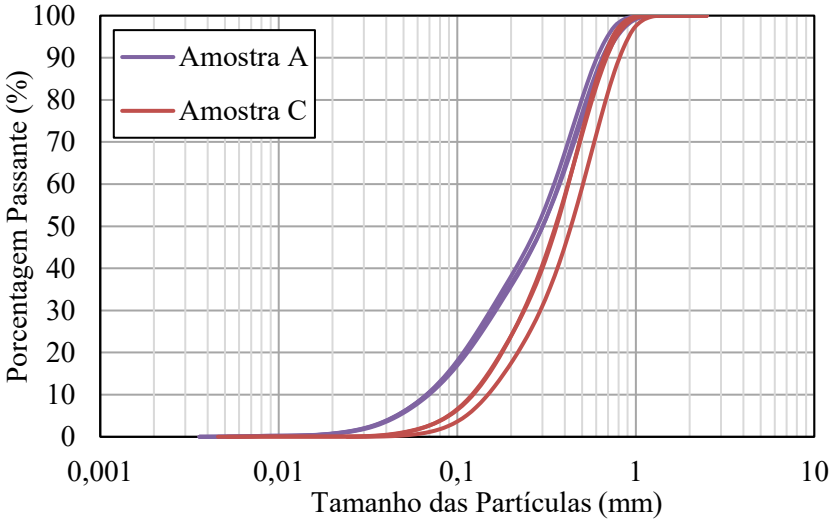


Figura 3. Amostras de ALR – Análise Granulometria à Laser.

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

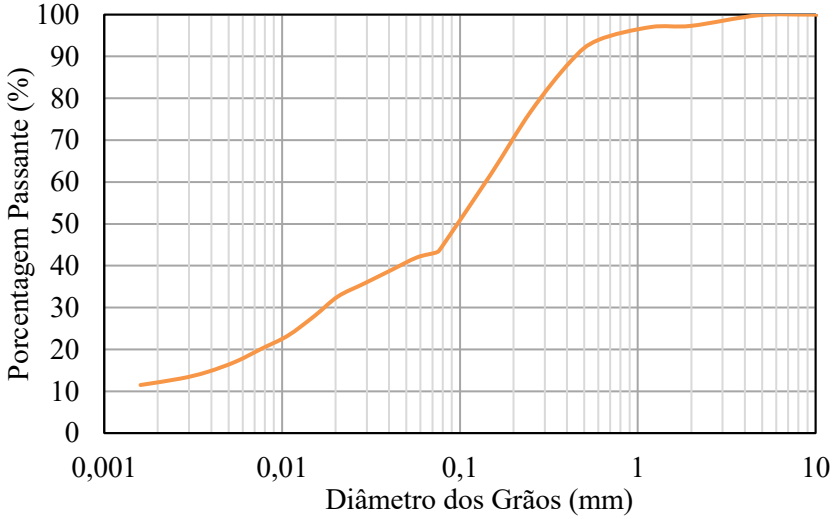


Figura 5. Amostra de solo – Análise Granulométrica.

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.

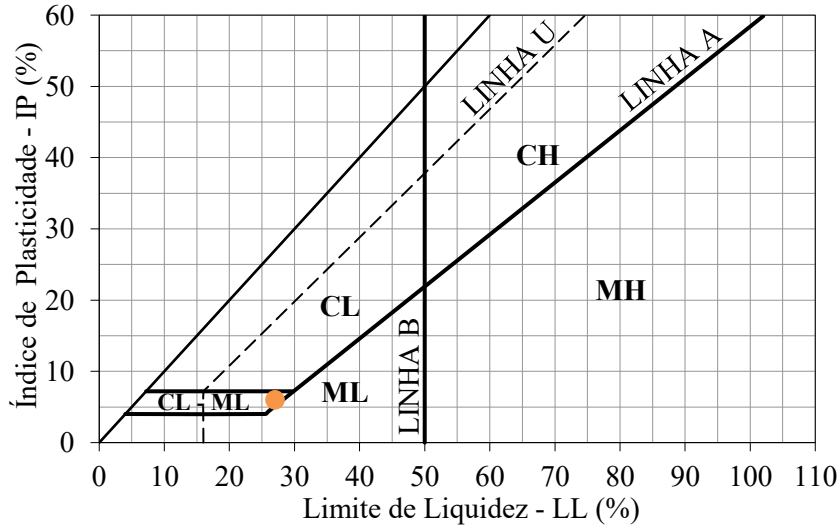


Figura 6. Classificação do solo - Carta de Plasticidade de Casagrande.

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.

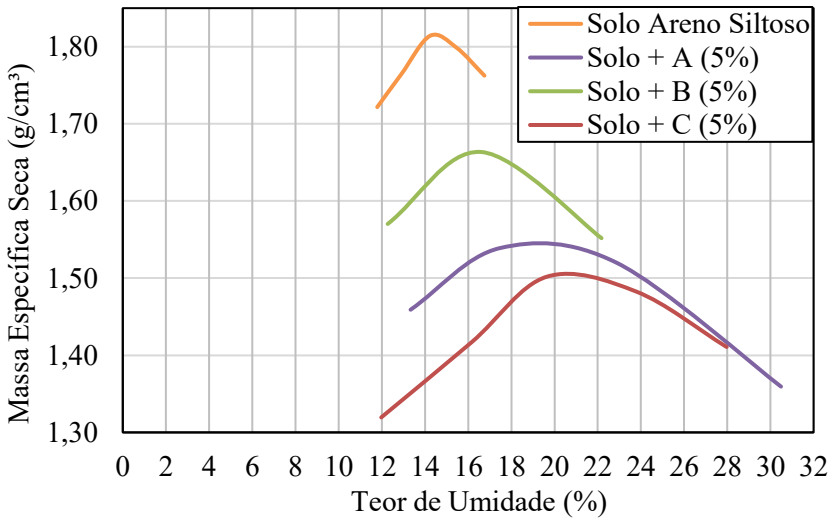


Figura 7. Compósitos Solo-ALR – Curvas de Compactação.

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.