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).

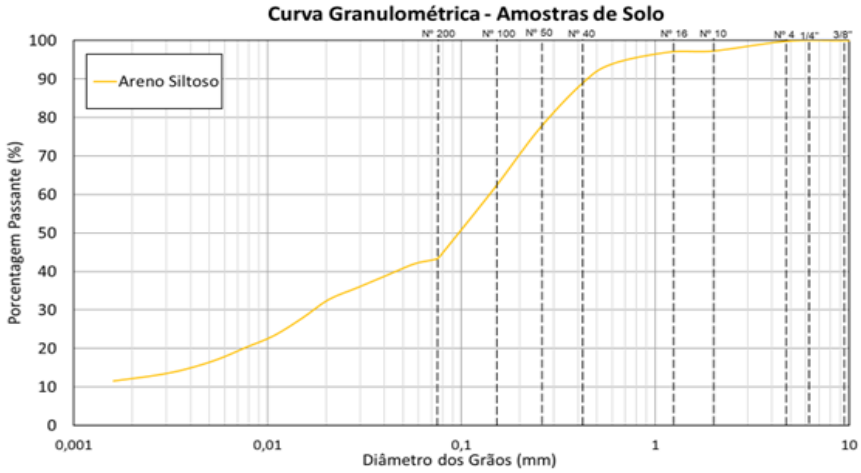


Figura 3. Análise Granulométrica - Granulometria do solo por Peneiramento e Sedimentação.

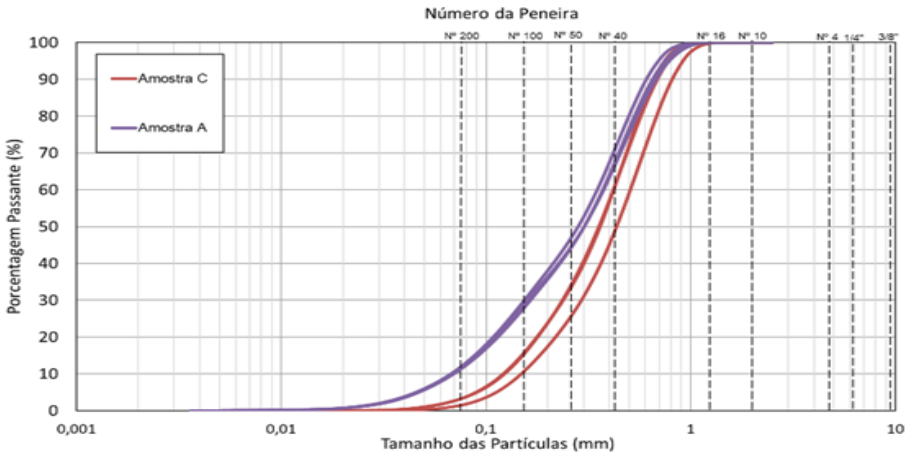


Figura 4. Análise Granulométrica – Granulometria à laser das Serragens.

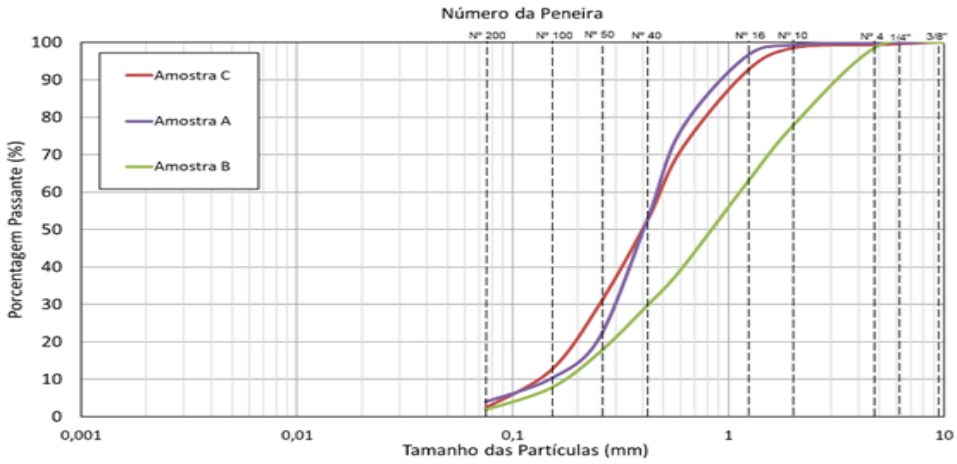


Figura 5. Análise Granulométrica – Granulometria por Peneiramento das Serragens.

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.

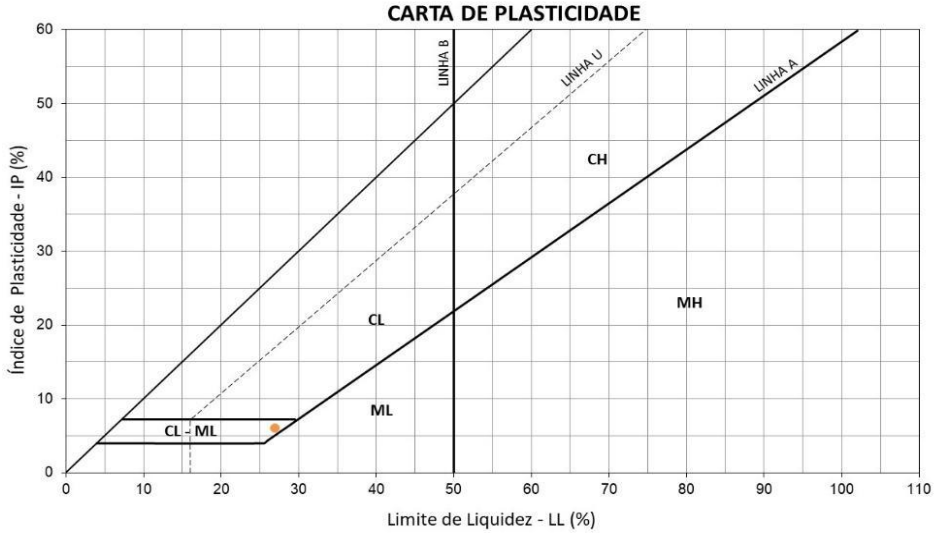
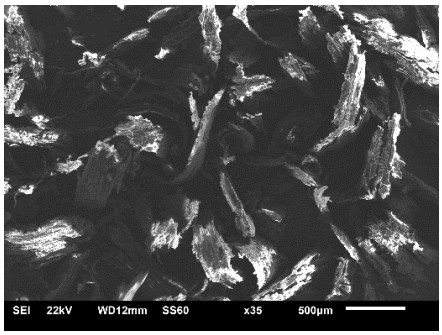


Figura 6: Areia Siltosa – Carta de Plasticidade de Casagrande.

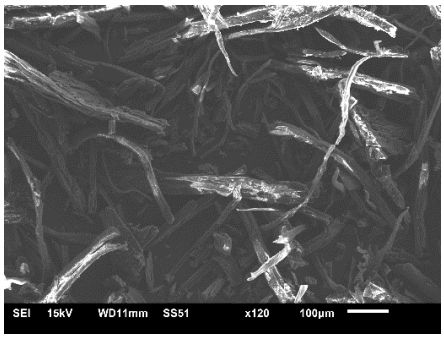
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Microscópia Eletrônica de Varredura - MEV

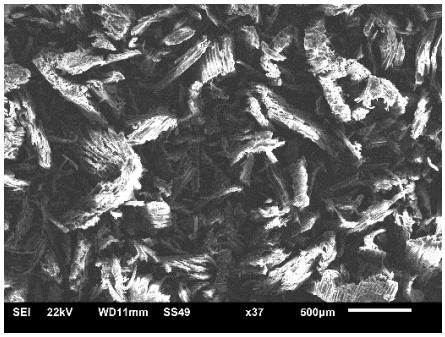
A análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu observar a morfologia e a superfície das partículas de serragem em diferentes ampliações. As imagens, que podem ser observadas nas Figuras 7a, 7b e 7c, de origem das amostras do Tipo A, B e C respectivamente, evidenciam 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

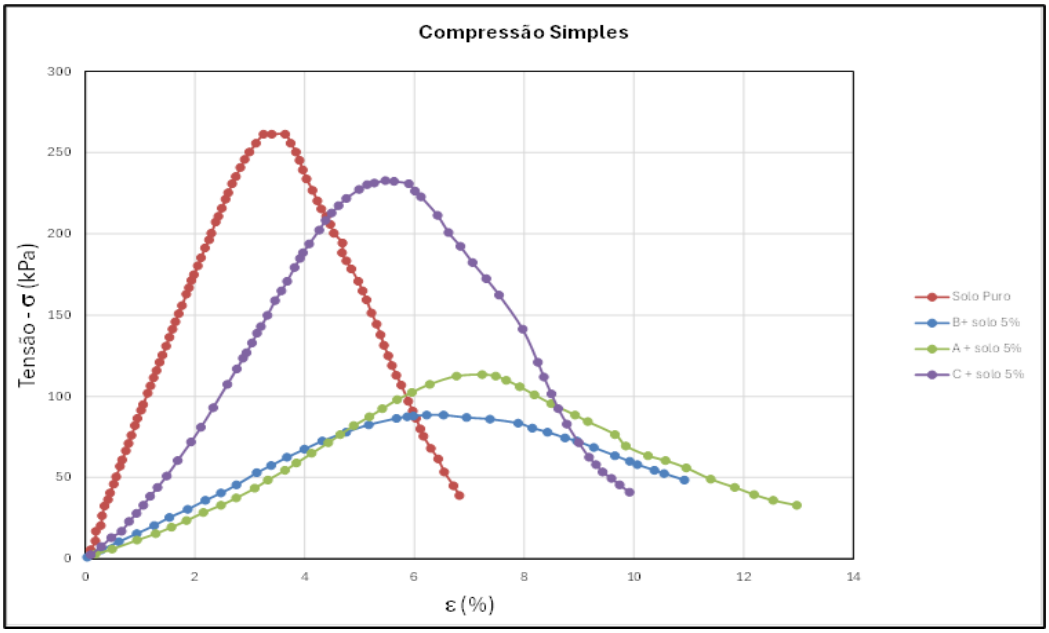


Figura 8: Ensaio de Compressão Simples com solo arenoso siltoso + 5% de aditivo.

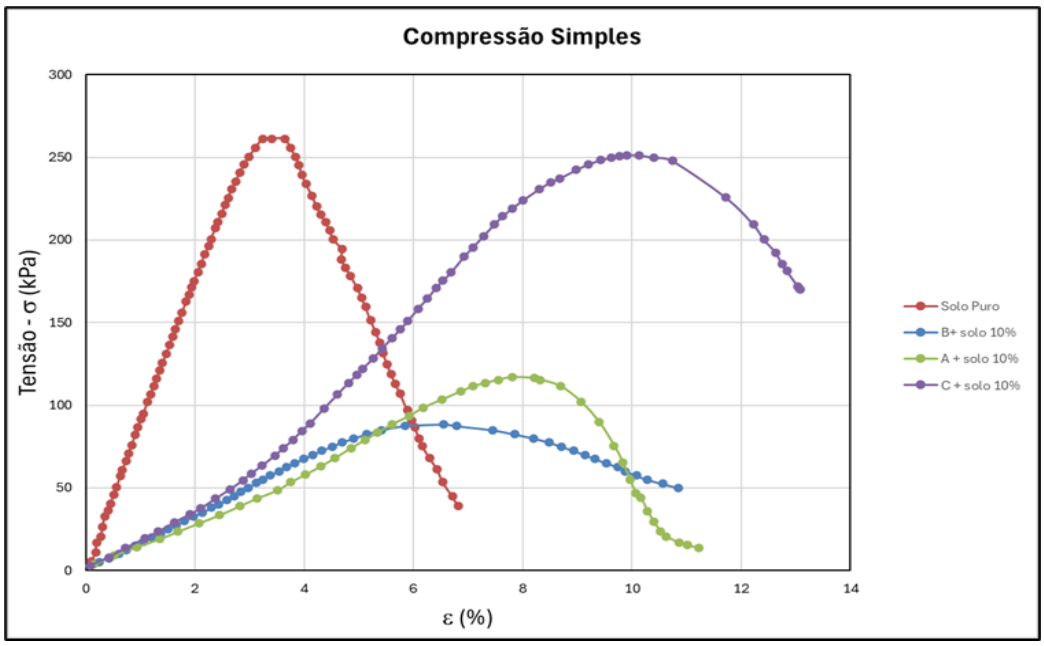


Figura 9: Ensaio de Compressão Simples: Solo areno siltoso + 10% de aditivo

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.