

REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE MADEIRA NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Auanny Alícia Alves da Silva¹;

¹Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/6656009178198385>

Vitor Braga de Azevedo²;

²Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/9370085591851452>

Luana Dantas de Medeiros³;

³Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3470183910336431>

Brenda Maria Barreto de Souza⁴;

⁴Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3914917823761276>

Thiago Lucena Dias⁵;

⁵Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/0874483648113887>

Ranykelly Kevelly Florentino de Oliveira⁶;

⁶Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/6898892371295906>

Renan Camilo de Lima Paulo⁷;

⁷Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/2927689646852208>

Ana Maria Gonçalves Duarte⁸;

⁸Universidade de Pernambuco, Nazaré da Mata, PE.

<http://lattes.cnpq.br/7613871386733779>

Diego José Araújo Viegas⁹;

⁹Universidade de Pernambuco, Recife, PE.

<http://lattes.cnpq.br/6572037012477821>

Edmilson Dantas da Silva Filho¹⁰.

¹⁰Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Campina Grande, PB.

<http://lattes.cnpq.br/3559366120005724>

RESUMO: A utilização de resíduos agroindustriais na engenharia geotécnica tem se destacado como alternativa sustentável para redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos e ao consumo de ligantes convencionais. Nesse contexto, o presente estudo objetivou sistematizar o conhecimento científico acerca da aplicação de cinzas de resíduos de madeira (CRM) na estabilização de solos expansivos e finos. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica qualitativa, descritiva e exploratória, desenvolvida a partir da análise de estudos publicados entre 2020 e 2025 na base de dados Scopus. Os resultados evidenciaram que as CRM apresentam elevados teores de óxido de cálcio, sílica e alumina, favorecendo reações pozolânicas e cimentantes secundárias. Observou-se redução da plasticidade e da expansividade dos solos tratados, além de ganhos expressivos de resistência mecânica, especialmente em parâmetros como Resistência à Compressão Simples e Índice de Suporte Califórnia. As análises microestruturais também confirmaram a formação de compostos cimentantes responsáveis pela melhoria da matriz estabilizada. Conclui-se que as CRM representam uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora para aplicações geotécnicas sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Economia circular. Solos expansivos. Sustentabilidade ambiental.

REUSE OF WOOD ASH IN GEOTECHNICAL ENGINEERING: A LITERATURE REVIEW

ABSTRACT: The use of agro-industrial residues in geotechnical engineering has emerged as a sustainable alternative to reduce environmental impacts associated with inadequate waste disposal and the consumption of conventional binders. In this context, the present study aimed to systematize the scientific knowledge regarding the application of wood residue ash (WRA) in the stabilization of expansive and fine-grained soils. The research is characterized as a qualitative, descriptive, and exploratory literature review based on studies published between 2020 and 2025 in the Scopus database. The results demonstrated that WRA presents high contents of calcium oxide, silica, and alumina, favoring pozzolanic and secondary cementitious reactions. Reductions in plasticity and soil expansibility were observed, as well as significant improvements in mechanical resistance parameters, especially Unconfined Compressive Strength and California Bearing Ratio. Microstructural analyses also confirmed the formation of cementitious compounds responsible for improving the stabilized matrix. Therefore, WRA is considered a technically feasible and environmentally promising alternative for sustainable geotechnical applications.

KEY-WORDS: Circular economy. Expansive soils. Environmental sustainability.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta desafios significativos devido ao seu elevado consumo de recursos e impacto ambiental, sendo a fabricação de cimento responsável por 5% a 8% das emissões globais de dióxido de carbono (Blayi et al., 2024; Martínez-García et al., 2022). Diante da crise climática, a busca por materiais alternativos e *eco-friendly* tornou-se uma nova fronteira científica para reduzir a pegada de carbono do setor (Balagosa et al., 2023).

Além disso, a gestão de resíduos sólidos gera preocupações crescentes ao redor do mundo, com a produção global de cinzas de madeira atingindo pelo menos 20 milhões de toneladas anuais, das quais cerca de 70% acabam descartadas em aterros sanitários (Wang; Haller, 2022). Conforme Wang e Haller (2022), esse descarte massivo é caro, insustentável e ocupa terras valiosas, além de representar riscos de contaminação ambiental e de águas subterrâneas.

Nesse cenário, a cinza de resíduo de madeira (CRM) — ou *Wood Waste Ash* (WWA) — surge como um material promissor para a estabilização de solos, aproveitando suas propriedades pozolânicas e seu efeito filler para substituir ligantes tradicionais. A CRM é um subproduto da queima de biomassa para geração de calor e energia, sendo composta majoritariamente por sílica, alumina e óxido de cálcio (Pendyala; Jagarapu, 2025; Saleh et al., 2024). Estudos de Martínez-García et al. (2022) e Blayi et al. (2024) indicam que o uso dessas cinzas pode não apenas reduzir os custos de construção, mas também capturar e mineralizar dióxido de carbono durante as reações de hidratação, contribuindo para o modelo de economia circular.

A aplicação desses estabilizantes é particularmente crítica em solos expansivos, que, por sua vez, são exemplificados por solos ricos em minerais como a montmorilonita. Este tipo de material sofre mudanças dramáticas de volume com a variação da umidade, resultando em recalques diferenciais, rachaduras e falhas estruturais em fundações e pavimentos (Pendyala; Jagarapu, 2025). A estabilização química, por meio da adição de cinzas e cal, permite mitigar essa expansividade ao promover a floculação das partículas de argila e a formação de matrizes cimentícias que aumentam a rigidez e a resistência do solo (Pendyala; Jagarapu, 2025; Saleh et al., 2024).

Apesar do crescimento das pesquisas envolvendo cinzas de madeira na estabilização geotécnica, os resultados encontram-se dispersos na literatura, especialmente quanto aos mecanismos físico-químicos responsáveis pela melhoria mecânica dos solos tratados.

OBJETIVO

Diante da lacuna entre o descarte massivo de resíduos e a necessidade de infraestruturas resilientes, este capítulo objetiva sistematizar o potencial das cinzas de madeira como um vetor de estabilização sustentável. A meta é analisar os mecanismos fundamentais que permitem a transição deste subproduto de um problema de gestão de aterros para uma solução de alto desempenho na correção de solos expansivos.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, descritiva e exploratória, desenvolvida com o objetivo de analisar o potencial da CRM como material alternativo. O estudo concentrou-se na identificação dos principais mecanismos físico-químicos associados ao desempenho mecânico e à durabilidade de misturas solo-cinza descritas na literatura científica recente. Desse modo, o levantamento bibliográfico foi realizado a partir de artigos científicos, revisões sistemáticas e estudos experimentais publicados entre 2020 e 2025, obtidos na base de dados Scopus.

Partindo da seleção com base em aderência temática, relevância e disponibilidade de dados relacionados ao desempenho físico, mecânico e microestrutural de misturas solo-cinza, foram priorizados trabalhos relacionados ao reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos na engenharia civil, especialmente pesquisas voltadas à estabilização de solos argilosos e expansivos por meio da utilização de cinzas de biomassa com ou sem adição de cálcio.

Os estudos selecionados foram analisados de forma comparativa, considerando parâmetros relacionados à composição química e mineralógica das cinzas, bem como alterações promovidas nas propriedades geotécnicas dos solos tratados.

A interpretação dos dados foi conduzida com base na correlação entre os resultados apresentados pelos diferentes autores, buscando identificar tendências de comportamento, mecanismos de estabilização e limitações técnicas associadas ao uso da CRM. Além disso, foram consideradas as implicações ambientais relacionadas ao reaproveitamento de resíduos industriais e à redução da utilização de ligantes convencionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos analisados demonstram que o desempenho das CRM na estabilização de solos está diretamente relacionado à composição química, à granulometria e às condições de cura empregadas. De maneira geral, verificou-se que a utilização da CRM promove alterações significativas nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos solos tratados, indicando potencial para aplicações geotécnicas sustentáveis.

A Tabela 1 fornece uma visão panorâmica da origem e do tipo de material utilizado por cada autor.

Tabela 1: Identificação da tipologia das cinzas de madeira por autor.

Autor correspondente	Tipo de cinza	Espécie de madeira	Origem
Balagosa et al. (2023)	Cinza volante de pellets	Resíduos de processamento de serrarias	Usina termelétrica
Blayi et al. (2024)	Cinza de madeira	Mistura de árvores locais e móveis descartados ¹	Restaurante
Martínez-García et al. (2022) ²	Cinza de resíduo de madeira	Bétula, pinho, carvalho, faia e acácia	Resíduos florestais e municipais
Pendyala & Jagarapu (2025)	Cinza de madeira	Resíduos industriais	Serraria local
Rolka et al. (2025)	Cinza de biomassa lenhosa	Predominantemente pinho	Usina térmica
Saleh et al. (2024)	Cinza de madeira	Madeira genérica para queima	Canteiro de obras
Tobi et al. (2022)	Cinza de biochar ² para carvão vegetal	Toras de madeira (espécie não especificada)	Queima aerada local
Wang & Haller (2022) ¹	Cinzas de madeira variadas	Alder, faia, bétula, pinho, carvalho, álamo, eucalipto, abeto e salgueiro	Diversas fontes
¹ Madeira processada, advinda de mobiliário (cadeiras) que podem conter traços de tratamento químico.			
² Dados médios extraídos da compilação de estudos prévios apresentada na revisão.			

Fonte: Os autores (2026).

Embora todos os referidos usem o termo “cinza de madeira”, a variabilidade da fonte influencia diretamente a composição química e, conseqüentemente, os resultados de estabilização. Do ponto de vista químico, as cinzas apresentaram elevados teores de óxido de cálcio (CaO), além da presença de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), componentes fundamentais para o desenvolvimento de reações pozolânicas (Tabela 2).

Tabela 2: Composição química das cinzas.

Autor correspondente	Teor (%)		
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Balagosa et al. (2023)	27,80	23,25	6,60
Blayi et al. (2024)	25,10	2,70	14,60
Martínez-García et al. (2022) ¹	12,80	30,40	26,50
Pendyala & Jagarapu (2025)	35,54	19,25	10,31
Rolka et al. (2025)	26,93	-	-
Saleh et al. (2024) ²	10,53	9,32	28,00
Tobi et al. (2022)	N.A.*	N.A.*	N.A.*
Wang & Haller (2022) ¹	43,03	22,22	5,09

N.A.: Dados quantitativos de óxidos não detalhados nos recortes fornecidos.

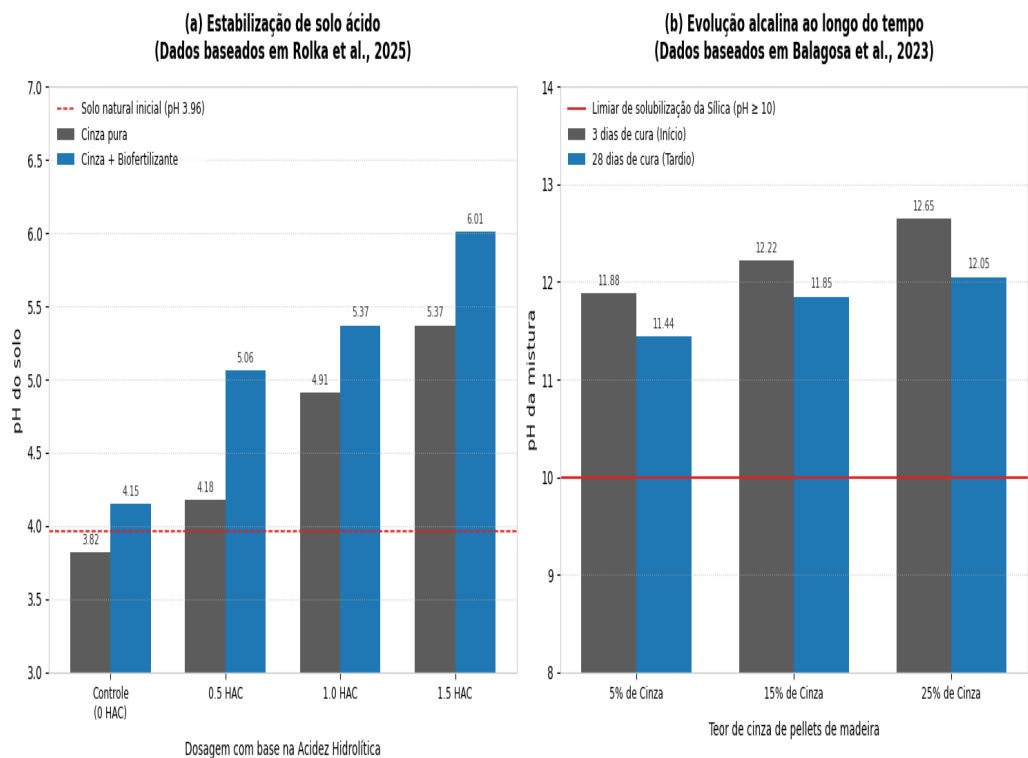
¹ Dados médios extraídos da compilação de estudos prévios apresentada na revisão.

² Dados citados por Saleh et al. para cinza de madeira padrão para comparações.

Fonte: Os autores (2026).

Conforme demonstrado na Figura 1, a incorporação da CRM promove uma alteração imediata na assinatura química do solo.

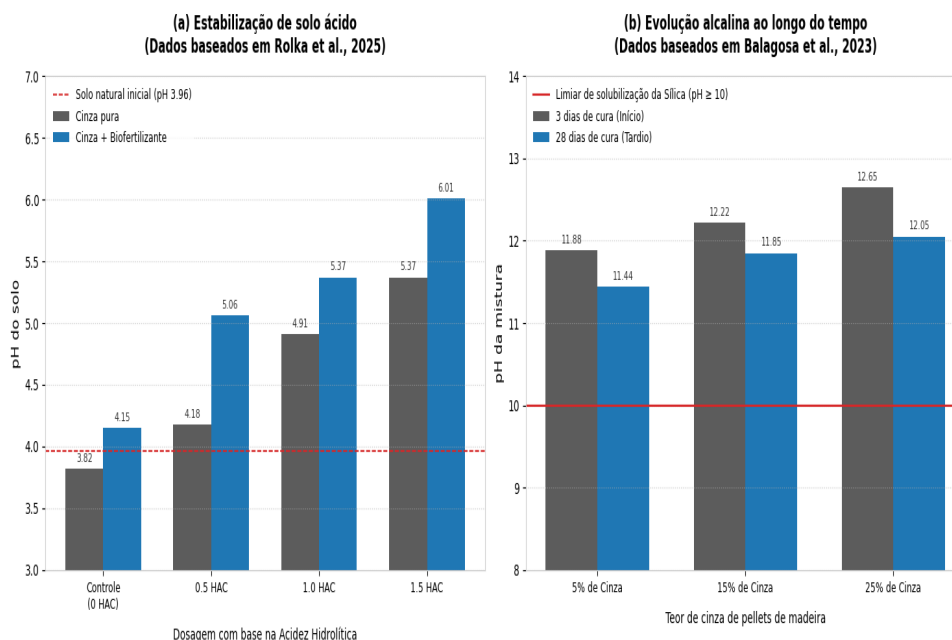
Figura 1: Influência do pH na estabilização de solo ácido (Dados baseados em Rolka et al., 2025).



Fonte: Os autores (2026).

Segundo Rolka et al. (2025), o uso de cinzas é capaz de elevar o pH em até 1,83 unidades, neutralizando a acidez hidrolítica inicial. Esse incremento é fundamental para que o sistema atinja níveis de alcalinidade elevados, frequentemente superiores ao pH 10 (Figura 2), patamar em que ocorre a solubilização de compostos silicosos e aluminatos da matriz argilosa. Sob essas condições alcalinas, Balagosa et al. (2023) confirmam a precipitação de novos minerais cimentantes.

Figura 2: Influência do pH na evolução alcalina ao longo do tempo (Dados baseados em Balagosa et al., 2023).



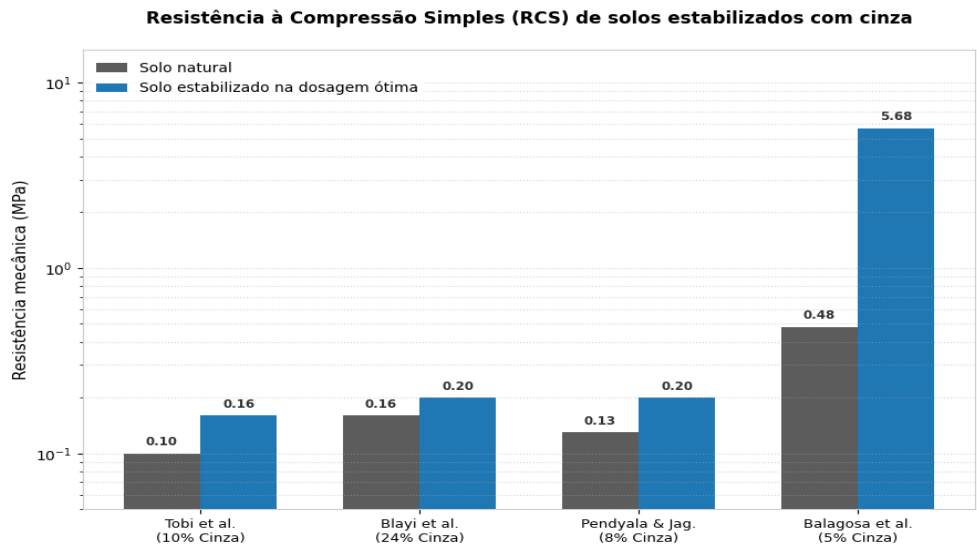
Fonte: Os autores (2026).

Em relação às propriedades de consistência, observou-se tendência de redução do Índice de Plasticidade (IP) e da expansividade dos solos tratados. Blayi et al. (2024) registraram redução de aproximadamente 41,3% no IP e de 63,4% na contração linear em misturas contendo 32% de cinza. Tal comportamento está associado aos mecanismos de troca catiônica e floculação das partículas argilosas, promovidos pelos compostos alcalinos presentes na CRM.

Os ensaios de compactação evidenciaram comportamento recorrente na literatura, caracterizado pela redução da densidade seca máxima e aumento da umidade ótima das misturas. Tal fenômeno ocorre devido ao menor peso específico das cinzas em comparação ao solo natural e à maior demanda hídrica necessária para o desenvolvimento das reações de hidratação e cimentação. Além disso, partículas finas da CRM atuam como material de preenchimento (filler), alterando o arranjo estrutural da matriz compactada.

Quanto ao desempenho mecânico, assim como pode ser visto na Figura 3, os resultados demonstraram ganhos expressivos de resistência à compressão simples (RCS).

Figura 3: Comparação da RCS de solos naturais e estabilizados com cinza de madeira.

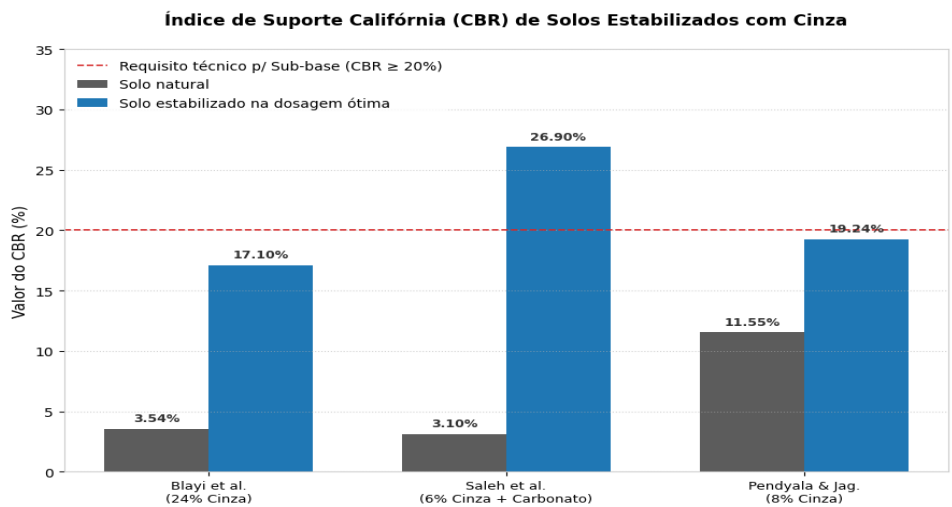


Fonte: Os autores (2026).

Tobi et al. (2022) identificaram melhor desempenho mecânico em misturas contendo 10% de cinza, enquanto Blayi et al. (2024) observaram resultados ótimos com 24% de CRM. Em estudos conduzidos por Balagosa et al. (2023), verificou-se aumento de até quinze vezes na resistência mecânica após 28 dias de cura em misturas estabilizadas com ligantes contendo cinzas.

De maneira semelhante, Saleh et al. (2024) reportaram valores de Índice de Suporte Califórnia (CBR) de até 26,9%, atendendo aos requisitos técnicos para utilização em subleitos rodoviários (Figura 4).

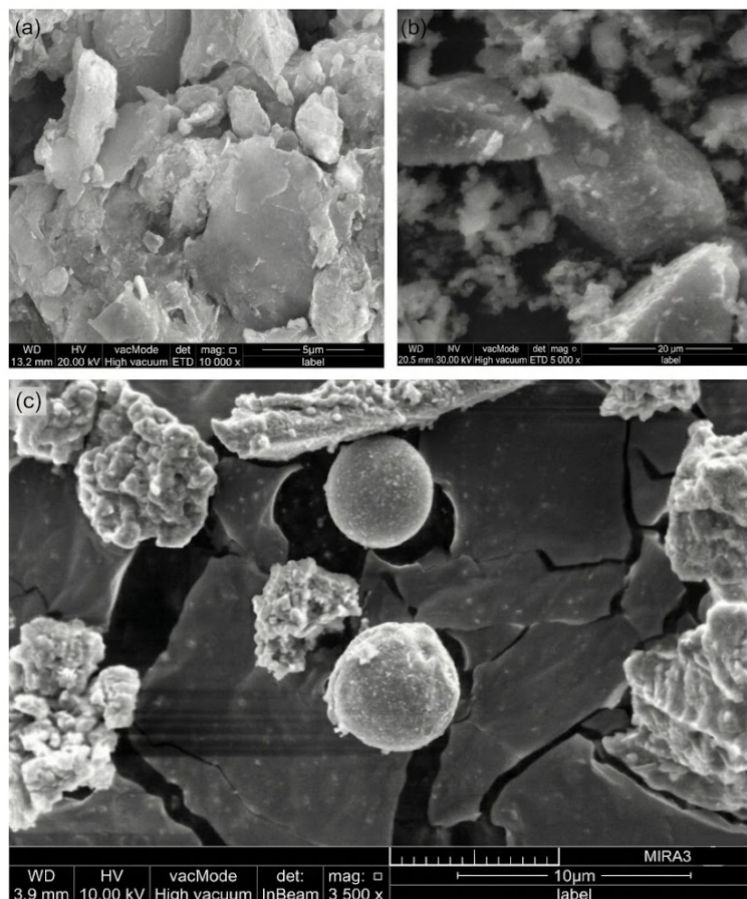
Figura 4: CBR de solos naturais e estabilizados com cinza de madeira.



Fonte: Os autores (2026).

As análises microestruturais realizadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) confirmaram os mecanismos responsáveis pela estabilização, conforme visto na Figura 5.

Figura 5: Mosaico de micrografias eletrônicas de varredura (MEV) das cinzas de madeira e matrizes de solo: (a) Balagosa et al. (2023); (b) Blayi et al. (2024); (c) Martínez-García et al. (2022).



Fonte: Os autores (2026).

As imagens obtidas revelaram a formação de produtos cimentantes como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), silicato de cálcio e alumínio hidratado (C-A-S-H) e cristais de etringita, além da redução da porosidade interna das misturas. A presença desses compostos evidencia que a CRM atua simultaneamente por mecanismos químicos e físicos, contribuindo tanto para o preenchimento de vazios quanto para a cimentação entre partículas do solo.

Por fim, sob a perspectiva ambiental, a literatura aponta que a substituição parcial de ligantes convencionais por cinzas de madeira pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas à estabilização de solos, favorecendo estratégias de economia circular e reaproveitamento de resíduos industriais. Entretanto, alguns autores destacam que dosagens elevadas podem ocasionar aumento da condutividade elétrica e potencial

salinização do solo, indicando a necessidade de controle adequado das proporções empregadas em aplicações geotécnicas.

De forma geral, os resultados evidenciam que a utilização da CRM representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora para melhoria das propriedades geotécnicas de solos expansivos e finos, sobretudo quando associada a critérios adequados de granulometria, dosagem e tempo de cura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da literatura científica permitiu verificar que as cinzas de madeira apresentam elevado potencial para aplicação em processos de estabilização de solos, sobretudo no caso de solos expansivos e finos. Os estudos revisados demonstraram que a composição química rica em óxidos de cálcio, sílica e alumina favorece o desenvolvimento de reações pozolânicas e cimentantes, responsáveis pela melhoria das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das misturas solo-cinza.

De maneira geral, observou-se redução da plasticidade e da expansividade dos solos tratados, bem como aumento dos parâmetros de resistência mecânica, especialmente da Resistência à Compressão Simples (RCS) e do Índice de Suporte Califórnia (CBR). Além disso, as análises microestruturais evidenciaram a formação de compostos cimentantes secundários, como C-S-H, C-A-S-H e etringita, associados à redução da porosidade e ao aumento da rigidez da matriz estabilizada.

Os resultados também indicam que o desempenho da CRM depende diretamente de fatores como tipologia da madeira, composição mineralógica, pH, teor incorporado e tempo de cura, evidenciando a necessidade de controle adequado das condições de aplicação em campo. Embora os benefícios técnicos e ambientais sejam expressivos, o estudo de Rolka et al. (2025) aponta possíveis limitações relacionadas ao aumento da condutividade elétrica e à salinização em dosagens elevadas, reforçando a importância de analisar previamente as características do solo em questão.

No quesito de sustentabilidade, a reutilização de cinzas representa uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular, permitindo transformar resíduos industriais em insumos de valor agregado para a engenharia civil. Por consequência, conclui-se que a CRM constitui uma alternativa promissora para redução da dependência de ligantes convencionais e mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos e às emissões de CO₂ da indústria cimenteira.

REFERÊNCIAS

BALAGOSA, J. et al. Experimental Validation of the Cementation Mechanism of Wood Pellet Fly Ash Blended Binder in Weathered Granite Soil. **Materials**, v. 16, n. 19, e6543, 3 out.

2023.

BLAYI, R. A. et al. Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 18, e100726, fev. 2024.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. et al. The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review. **Materials**, v. 15, n. 15, e5349, 1 jan. 2022.

PENDYALA, M. N. S. K.; JAGARAPU, D. C. K. Experimental evaluation of clayey soil stabilisation using wood ash and lime additives. **ARP Journal of Engineering and Applied Sciences**, p. 977–986, 15 out. 2025.

ROLKA, E. et al. Wood Biomass Ash (WBA) Used in Conjunction with Post-Fermentation Mass (PFM) as a Way to Stabilize Soil Properties. **Materials**, v. 18, n. 22, p. 5176, 14 nov. 2025.

SALEH, S. et al. Calcium Carbide and Wood Ash as Environmentally Friendly Soil Stabilizers for Enhanced Subgrade Performance. **Archives of Advanced Engineering Science**, v. 3, n. 1, p. 22–28, 15 jan. 2025.

TOBI, A. et al. Effects of wood ash on geotechnical properties of lateritic soils. **International journal of engineering technologies and management research**, v. 9, n. 6, p. 78–87, 1 jul. 2022.

WANG, R.; HALLER, P. Applications of wood ash as a construction material in civil engineering: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, e27341, 1 dez. 2022.