

USO DE CINZA DE MADEIRA DE ALGAROBA NO MELHORAMENTO DE SOLO: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DOSAGEM

Vitor Braga de Azevedo¹;

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Luana Dantas de Medeiros²;

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Auanny Alícia Alves da Silva³;

³Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Brenda Maria Barreto de Souza⁴;

⁴Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Thiago Lucena Dias⁵;

⁵Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Ranykelly Kevelly Florentino de Oliveira⁶;

⁶Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Renan Camilo de Lima Paulo⁷;

⁷Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB.

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

Ana Maria Gonçalves Duarte⁸;

⁸Universidade de Pernambuco (UPE), Nazaré da Mata, PE.

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

Diego José Araújo Viegas⁹;

⁹Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, PE.

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

Edmilson Dantas da Silva Filho¹⁰.

¹⁰Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campina Grande, PB.

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

RESUMO: A busca por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o aproveitamento de resíduos como materiais alternativos na estabilização de solos, reduzindo impactos ambientais e o consumo de ligantes convencionais (cal e cimento). O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da cinza de madeira de algaroba, resíduo abundante no Agreste pernambucano, como aditivo sustentável para melhorar o desempenho mecânico de um solo coletado em Agrestina, Pernambuco, Brasil. A metodologia compreendeu a análise de misturas solo–cinza nos teores de 4%, 6%, 8% e 10% (em massa seca), moldadas na energia normal para tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias. Foram realizados ensaios de caracterização física e mineralógica, além de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. Os resultados demonstram que a adição da cinza aumentou o desempenho mecânico do solo e, portanto, é uma alternativa viável para a substituição de ligantes tradicionais. Conclui-se que o uso deste resíduo, além de mitigar o passivo ambiental de milhares de toneladas descartadas mensalmente na região, reforça os preceitos da educação ambiental ao transformar um problema local em uma solução de baixo custo e alta eficiência para a engenharia civil regional.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de solos. Cinza de biomassa. Resistência.

APPLICATION OF ALGAROPA WOOD ASH FOR SOIL STABILISATION: MECHANICAL BEHAVIOUR AND DOSAGE

ABSTRACT: The demand for sustainable solutions in geotechnical engineering has driven the incorporation of waste by-products as alternative materials for soil stabilisation, thereby mitigating environmental impacts and reducing the reliance on conventional binders (such as lime and cement). The present study aims to evaluate the potential of algaroba wood ash, an abundant waste residue in the Agreste region of Pernambuco, as a sustainable additive to enhance the mechanical behaviour of a soil sourced from Agrestina, Pernambuco, Brazil. The experimental programme comprised the analysis of soil–ash mixtures at contents of 4%, 6%, 8%, and 10% (by dry mass), compacted using standard Proctor energy and subjected to curing periods of 0, 7, 14, and 28 days. Physical and mineralogical characterisation tests were performed, alongside unconfined compressive strength and split tensile strength evaluations. The findings reveal that the ash inclusion significantly improved the soil's mechanical performance, establishing it as a viable substitute for traditional binders. Ultimately, repurposing this waste not only mitigates the environmental liability associated with

the thousands of tonnes discarded monthly in the region but also reinforces environmental education principles by translating a local ecological challenge into a cost-effective, high-efficiency solution for regional civil engineering.

KEY-WORDS: Soil stabilisation. Biomass ash. Strength.

INTRODUÇÃO

A estabilização de solos, visando melhorar suas propriedades mecânicas (resistência, durabilidade e deformabilidade), recorre frequentemente a aditivos clássicos de cimentação, como a cal e o cimento Portland. Porém, a utilização desses estabilizantes tradicionais eleva os custos das obras geotécnicas e apresenta um alto impacto ambiental associado. Esse passivo ambiental decorre do consumo de matérias-primas não renováveis (principalmente o calcário), da alta demanda energética e da expressiva liberação de CO₂ como subproduto de reações químicas inerentes à sua fabricação (Saldanha et al., 2021).

Visando promover maior sustentabilidade para a estabilização de solos, diversos resíduos agrícolas e industriais vêm sendo analisados e validados para aplicação como estabilizantes alternativos, reduzindo a demanda pelos ligantes tradicionais. Nesse contexto, destaca-se a cinza do sabugo do milho, a cinza volante, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cinza da casca de arroz (Nierwinski et al., 2026; Silvani et al., 2024; Owino, Hossain, 2023; Yifru et al., 2022).

Paralelamente, a cinza residual da queima da madeira de algaroba se destaca como um resíduo gerado em abundância no Nordeste brasileiro. Diversas instalações industriais da região utilizam essa lenha como matriz energética, no estado de Pernambuco, por exemplo, os setores têxtil e de lavanderias destacam-se por esse consumo (Melo, 2012). Atualmente, a cinza de algaroba é subutilizada, sendo majoritariamente destinada à aterros sanitários, o que implica em custos operacionais e eleva a demanda por esses espaços de disposição final.

Estudos anteriores apontam a presença de uma concentração significativa de compostos cálcicos na cinza de algaroba, sugerindo um potencial para sua aplicação na estabilização de solos (Bezerra et al., 2023; Nascimento et al., 2019). Porém, ainda são escassos na literatura os estudos que abordam a sua aplicação direta visando o melhoramento mecânico de solos.

Nesse contexto, para viabilizar o uso amplo desse resíduo, é necessário não apenas validar o seu desempenho, mas também estabelecer equações de dosagem, as quais permitem ajustar com precisão o teor de cinza de algaroba a ser adicionado para atingir a resistência mecânica de projeto.

OBJETIVO

O presente trabalho objetiva avaliar a eficiência da cinza de algaroba no melhoramento de um solo, investigando seu comportamento mecânico e propondo equações para a dosagem.

METODOLOGIA

Materiais

O solo utilizado nesta pesquisa é proveniente do município de Agrestina, Pernambuco, Brasil, tendo sido extraído da camada superficial por meio de uma única campanha para a coleta de amostras deformadas. Os parâmetros geotécnicos do solo, juntamente com as normas técnicas de referência adotadas, encontram-se sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do solo e da cinza de algaroba.

Parâmetro	Solo	Cinza	Norma
Peso específico dos grãos	26,8 kN/m ³	24,3 kN/m ³	NBR 6458 (ABNT, 2017)
Areia grossa	0,2%	4,0%	NBR 7181 (NBR, 2018)
Areia média	11,3%	8,0%	
Areia fina	35,1%	26,7%	
Silte	30,0%	50,2%	
Argila	23,3%	11,1%	
Limite de liquidez	28%	NP	NBR 6459 (ABNT, 2017)
Limite de plasticidade	20%	NP	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Índice de plasticidade	8%	-	
Peso específico seco máximo	18,4 kN/m ³	13,1 kN/m ³	NBR 7182 (ABNT, 2016)
Umidade ótima	14,3%	30,3%	
Classificação SUCS	CL	-	

Fonte: Os autores (2026).

A análise granulométrica revelou uma curva bem graduada, destacando-se o alto teor da fração fina (silte e argila), correspondente a 53,3%. O Índice de Plasticidade (IP) obtido foi de 8%, valor considerado baixo, o qual corrobora a maior quantidade de partículas de silte na matriz fina do solo. A análise por difração de raios X mostrou a presença dos minerais quartzo, caulinita, periclásio e goethita no solo.

A cinza de algaroba empregada na estabilização do solo foi fornecida por uma lavanderia industrial localizada no município de Caruaru, Pernambuco, Brasil. O material consiste em cinza pesada, recolhida diretamente do fundo das fornalhas, gerada a uma

temperatura média de combustão de 200 °C. Os parâmetros de caracterização física e as respectivas normas técnicas de referência encontram-se sumarizados na Tabela 1.

Em termos de consistência, a cinza revelou-se não plástica, comportamento que corrobora o reduzido percentual de fração argila (11,1%) identificado na análise granulométrica. A análise por difração de raios X da cinza de algaroba revelou a presença de calcita, mineral amplamente empregado como *filler* calcário, e de portlandita, que constitui o composto majoritário da cal hidratada.

Planejamento experimental

Com o intuito de avaliar o comportamento mecânico do solo estabilizado com cinza de algaroba, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD).

O programa experimental adotou diferentes teores (em massa) de adição de cinza (4%, 6%, 8% e 10%) e períodos de cura (0, 7, 14 e 28 dias). Os teores de cinza foram definidos com base na experiência de trabalhos anteriores com cinzas residuais (Blayi et al., 2024; Krishnan; Ravichandran, 2022).

Adicionalmente, todos os corpos de prova foram moldados nas condições de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, parâmetros estabelecidos nos ensaios de compactação e indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de compactação utilizados na moldagem das amostras.

Teor de Cinza	Umidade ótima (%)	Peso específico seco máximo (kN/m3)
4%	15,10	18,06
6%	15,15	17,93
8%	15,50	17,88
10%	17,00	17,58

Fonte: Os autores (2026).

Preparação de amostras

A moldagem dos corpos de prova (CPs) para os ensaios de RCS e RTCD seguiu as diretrizes da norma NBR 12024 (ABNT, 2012). Previamente à preparação dos CPs, o solo foi seco ao ar livre, destorroado e passado na peneira de malha nº 4 (abertura de 4,8 mm).

A cinza de algaroba, por sua vez, foi seca ao ar e peneirada na malha nº 200 (abertura de 0,075 mm) com o intuito de remover partículas de queima incompleta, otimizando, assim, o seu potencial reativo e a sua atuação como material de preenchimento de vazios (*efeito filler*). Em seguida, procedeu-se à mistura a seco do solo e da cinza conforme as dosagens estipuladas no planejamento experimental, até que se alcançasse a completa

homogeneização dos materiais.

Os CPs destinados aos ensaios de RCS e RTCD foram moldados com dimensões cilíndricas de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, utilizando-se um molde metálico tripartido. A compactação ocorreu de forma estática, sendo executada em três camadas sucessivas para assegurar a homogeneidade da massa específica ao longo da amostra. Após a moldagem, os CPs foram hermeticamente envolvidos em plástico filme e acondicionados em câmara úmida durante os períodos de cura estabelecidos no programa experimental. Ademais, os CPs de RCS e RTCD foram moldados em triplicata, visando assegurar a representatividade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

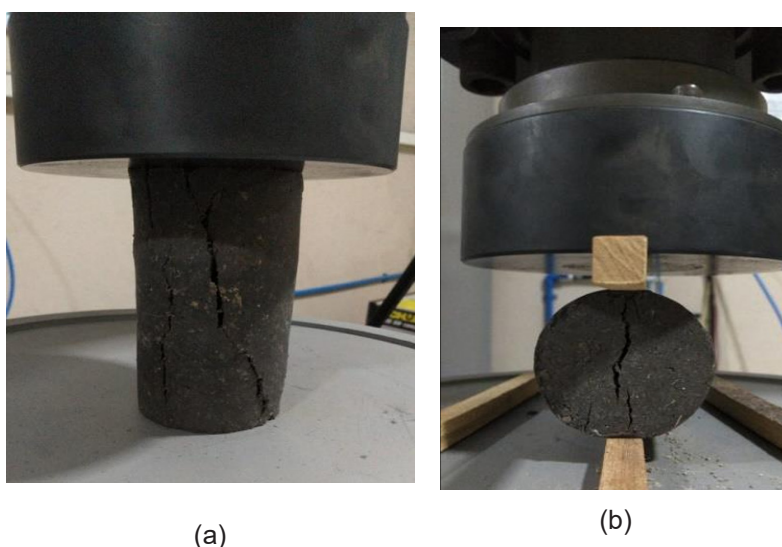
Ressalta-se que, para todos os ensaios, as amostras referentes ao tempo de cura de 0 dias foram ensaiadas no mesmo dia de sua confecção.

Ensaio mecânicos

Os ensaios RCS foram conduzidos em conformidade com as diretrizes da norma NBR 12025 (ABNT, 2012). O rompimento dos CPs (Figura 1a) foi executado em uma prensa hidráulica universal da marca Shimadzu, operando sob uma taxa de deslocamento controlada de 1,0 mm/min (1%/min), registrando-se a tensão axial máxima suportada pelo material.

Os ensaios de RTCD seguiram a norma NBR 7222 (ABNT, 2010), método por meio do qual a resistência à tração da amostra é determinada de forma indireta, a partir da aplicação de uma carga compressiva ao longo do diâmetro do CP (Figura 1b).

Figura 1: Ensaios mecânicos realizados: (a) RCS e (b) RTCD.



Fonte: Os autores (2026).

Parâmetro de dosagem η/B_{iv}

O parâmetro porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}) proposto por Consoli et al. (2007) foi empregado para o estabelecimento das equações de dosagem da cinza de algaroba incorporada ao solo em estudo. A porosidade (η) dos corpos de prova foi determinada por meio da Equação 1, enquanto o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}) foi calculado a partir da Equação 2, em que V_{vazios} representa o volume de vazios teórico do CP, V_{cp} corresponde ao volume total do corpo de prova e V_{cinza} é o volume de cinza presente no CP.

$$\eta = \frac{V_{vazios}}{V_{cp}} \quad (1)$$

$$B_{iv} = \frac{V_{cinza}}{V_{cp}} \quad (2)$$

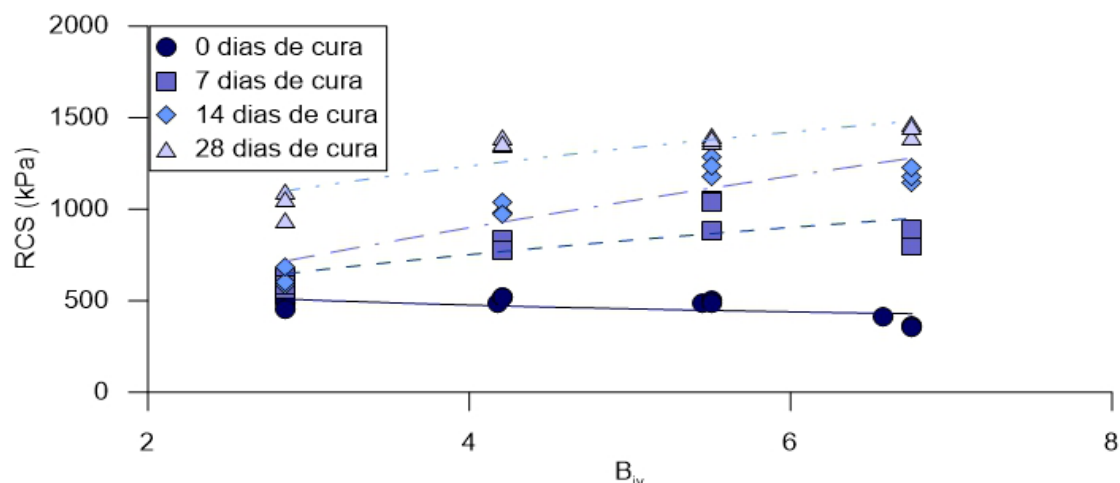
RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, a variação da RCS e da RTCD em função do índice B_{iv} . Visualiza-se uma tendência de incremento da resistência mecânica à medida que se eleva o teor de cinza adicionado.

A exceção ocorre nas amostras avaliadas aos 0 dias de cura, as quais não dispuseram de tempo hábil para o desenvolvimento de reações solo-cinza. Nota-se, ainda, uma tendência de estabilização ou até mesmo de leve decréscimo da resistência mecânica nos teores mais elevados de adição. Esse comportamento sugere a aproximação do teor ótimo de estabilização com a cinza.

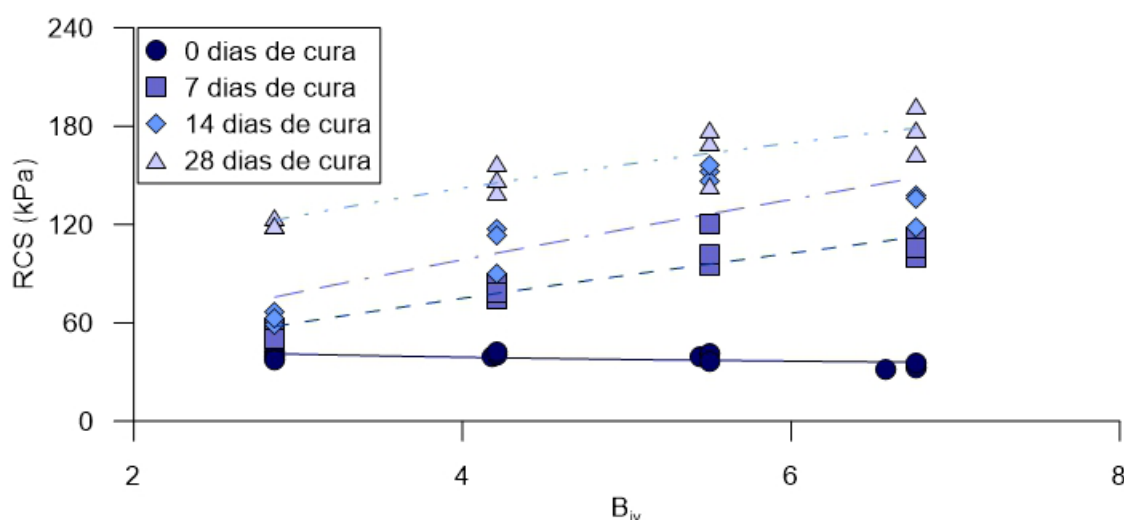
O efeito do tempo de cura no desempenho mecânico também pode ser constatado nas Figuras 2 e 3, nas quais se observa um aumento da resistência à medida que o período de cura avança. Esse comportamento foi sistematicamente verificado para todos os teores de cinza avaliados. Nota-se, ainda, que mesmo no maior tempo de cura adotado (28 dias), as misturas continuaram a exibir ganhos de resistência, não apresentando indícios de estagnação.

Figura 2: Relação entre B_{iv} e RCS nas amostras estabilizadas com cinza de algaroba



Fonte: Os autores (2026).

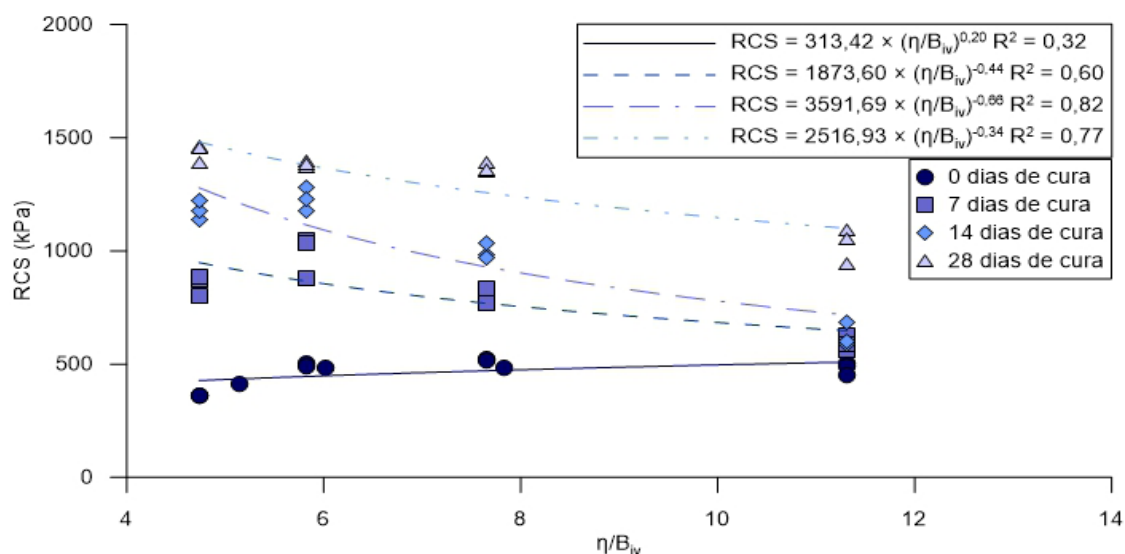
Figura 3: Relação entre B_{iv} e RTCD nas amostras estabilizadas com cinza de algaroba.



Fonte: Os autores (2026).

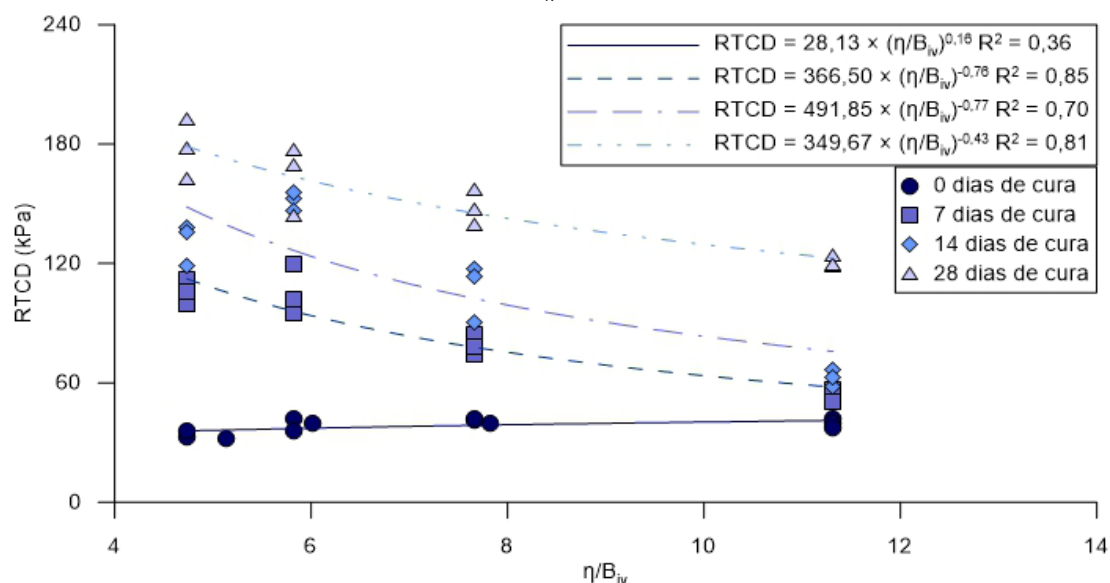
As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as relações da RCS e da RTCD com o parâmetro η/B_{iv} para as amostras de solo estabilizado com cinza de algaroba. As curvas de dosagem estabelecidas para as amostras submetidas à cura resultaram em coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,60 a 0,84, indicando um ajuste estatístico moderado a satisfatório dos modelos empíricos propostos.

Figura 4: Dosagem de RCS pelo parâmetro η/B_{iv} das amostras estabilizadas com cinza de algaroba



Fonte: Os autores (2026).

Figura 5: Dosagem de RTCD pelo parâmetro η/B_{iv} das amostras estabilizadas com cinza de algaroba



Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que menores valores da relação η/B_{iv} resultam em maiores resistências mecânicas, enquanto valores mais elevados acarretam a redução do desempenho da mistura solo-cinza. Ademais, constata-se a necessidade de adotar uma curva de dosagem para cada tempo de cura. Essas observações corroboram com as observações de Silvani et al. (2019) e Consoli et al. (2019).

Contudo, evidenciou-se uma limitação na aplicabilidade do parâmetro η/B_{iv} para as amostras com 0 dias de cura, o qual não conseguiu capturar de forma satisfatória o comportamento mecânico imediato (apresentando R^2 de 0,25 e 0,27). Esse baixo ajuste pode ser devido ao pouco tempo disponível para a ocorrência de interações entre o solo e

a cinza.

A partir das equações empíricas estabelecidas, torna-se possível determinar o índice η/B_{iv} necessário para atender a uma resistência de projeto preestabelecida. Com esse parâmetro definido, o projetista pode ponderar entre o controle do nível de compactação (porosidade da matriz) e a quantidade de cinza de algaroba a ser adicionada.

Consequentemente, a dosagem em campo torna-se mais flexível, permitindo optar pela aplicação de uma maior energia de compactação ou pela elevação do teor do agente estabilizante para atingir a capacidade de suporte desejada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização física da cinza de madeira de algaroba indicou um elevado teor de finos, com predominância de partículas de dimensão equivalente à fração silte. Adicionalmente, a análise mineralógica evidenciou a presença de calcita e portlandita. Ambos consistem em minerais ricos em cálcio, sendo o primeiro frequentemente associado ao efeito filler (preenchimento físico de vazios) e o segundo, o componente majoritário e reativo da cal hidratada.

A estabilização do solo com a cinza de algaroba promoveu incrementos expressivos na resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, comprovando seu efeito positivo no comportamento mecânico dentro dos teores estudados (até 10%). A adoção do parâmetro η/B_{iv} para a dosagem das misturas mostrou-se satisfatória, com exceção das amostras ensaiadas sem período de cura. Como vantagem, a utilização desse índice confere flexibilidade prática, permitindo optar pelo aumento da energia de compactação ou pela elevação do teor de cinza para atingir a resistência exigida.

Por fim, a aplicação da cinza de algaroba na geotecnia revela-se promissora, despontando como uma alternativa sustentável para a valorização deste resíduo, o qual é gerado em larga escala e usualmente onera aterros sanitários para sua disposição final adequada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024**. Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**. Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**. Solos - Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção

de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**. Solos - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**. Solos - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**. Solos - Ensaio de compactação. 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.

BEZERRA, G. G. et al. Reuso de cinza de lenha de algaroba como fíler calcário alternativo no desenvolvimento de cimento LC3. **Cerâmica**, v. 69, n. 391, p. 224-232, 2023.

BLAYI, R. A. et al. Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 18, p. 100726, 2024.

CONSOLI, N. C. et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N.C. et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428-1439, 2019.

KRISHNAN, K. D.; RAVICHANDRAN, P. T. Engineering characteristics of wood ash modified clay soils. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, p. 348-352, 2022.

MELO, M. S. C. Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de Algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano. 2012. 120p Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

NASCIMENTO, J. E. F. et al. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 85-91, 2019.

NIERWINSKI, H. P. et al. Sustainable Soil Stabilization Using Eggshell-Derived Lime: A Comparative Assessment Against Commercial Lime. **Sustainability**, v. 18, n. 3, p. 1442, 2026.

OWINO, A. O.; HOSSAIN, Z. Correlation between one-dimensional consolidation coefficients and different basalt fiber lengths and RHA-cement contents in fiber-reinforced stabilized expansive soils. **Soils and Foundations**, v. 63, n. 4, p. 101351, 2023.

SALDANHA, R. B. et al. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123648, 2021.

SILVANI, C.; BENETTI, M.; CONSOLI, N. C. Maximum tensile strength of sand-coal fly ash-lime blends for varying curing period and temperature. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 1, p. 83-89, 2019.

SILVANI, C.; SILVA, J. C.; GUEDES, J. P. C. Sugarcane bagasse ash as a green stabilizer for swelling soil. **Geotechnical and geological engineering**, v. 42, n. 2, p. 1459-1470, 2024.

YIFRU, W. et al. Effects of corn cob ash as partial replacement of cement for stabilization of an expansive clay. **Advances in Civil Engineering**, v. 2022, n. 1, p. 6788120, 2022.