ISSN: 2358-8829

ABORDAGEM SUSTENTÁVEL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS: INFLUÊNCIA DA CINZA DE LENHA DE ALGAROBA NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Luana Dantas de Medeiros [1]
Auanny Alícia Alves da Silva [2]
Lídia Pereira Amaro [3]
Diego José Araújo Viégas [4]
Ana Beatriz Silva de Araújo [5]
Ana Maria Gonçalves Duarte [6]

RESUMO

Devido à grande quantidade de resíduos industriais gerados, buscam-se soluções alternativas para reutilizá-los e, consequentemente, diminuir o impacto ambiental, ocasionado principalmente pelo descarte inadequado. Portanto, este artigo busca investigar a utilização da cinza de lenha de algaroba (CLA) nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. As misturas utilizadas no estudo foram de solo com 0, 4, 6, 8 e 10% de CLA, compactadas à energia normal e ensaiadas em cisalhamento direto (ASTM D3080) sob tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, para tempos de cura de 0, 14 e 28 dias, obtendo-se coesão e o ângulo de atrito de pico e residuais. A CLA, rica em CaO e contendo calcita e portlandita, atua como material cimentante, promovendo ligações entre grãos e o aumento na coesão. Em comparação ao solo natural ($c \approx 18{,}9$ kPa, $\varphi \approx 28°$), as misturas exibiram curvas tensão cisalhante x deslocamento do tipo A, com picos bem definidos e significativos aumentos de tensão de ruptura; para 200 kPa e 28 dias, a tensão de cisalhamento passou de 150,60 kPa (4% CLA) para 288,05 kPa (10% CLA). De modo geral, a coesão cresce com o teor de CLA e o tempo de cura, enquanto o ângulo de atrito varia entre cerca de 23° e 49° sem tendência única, mas com boa linearidade das envoltórias ($R^2 > 0{,}93$). Nos estados residuais, o ângulo de atrito manteve-se praticamente constante, com média de 35,71°, conferindo previsibilidade ao comportamento de longo prazo. Conclui-se que a CLA melhora substancialmente a resistência ao cisalhamento de solos compactados, permitindo reduzir o uso de ligantes industriais e reaproveitar um resíduo gerado em grandes quantidades, contribuindo para soluções geotécnicas mais sustentáveis na região semiárida.

Palavras-chave: Cisalhamento Direto, Coesão, Ângulo de Atrito, Cinza de Lenha de Algaroba, Reaproveitamento de Resíduos.

[1] Doutoranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, luanadantas.engenheira@gmail.com;
[2] Mestranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br;
[3] Doutoranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, lidia_amaro@hotmail.com;
[4] Doutorando do Curso de Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco - UPE, diegoaraujoviegas@hotmail.com;
[5] Graduanda em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, ana.silva.araujo@aluno.uepb.edu.br;
[6] Doutora do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br.

INTRODUÇÃO

A estabilização de solos é uma prática importante na engenharia geotécnica, pois permite melhorar o comportamento de materiais que apresentam limitações para uso em obras de infraestrutura, pavimentação e fundações, como baixa capacidade de suporte, elevada plasticidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento insuficiente. Entre as técnicas disponíveis, a estabilização química se destaca pela incorporação de materiais capazes de modificar as propriedades do solo e contribuir para o aumento de sua resistência e rigidez (Banyhussan et al., 2025; Rosales et al.,2020).

Nos últimos anos, o uso de resíduos industriais, agrícolas e de biomassa na estabilização de solos tem despertado interesse, principalmente pela possibilidade de reduzir o consumo de ligantes convencionais e encontrar alternativas para a destinação desses materiais. Pesquisas com diferentes tipos de cinzas e subprodutos indicam que esses resíduos podem contribuir para melhorar determinadas propriedades geotécnicas, como a resistência mecânica, a plasticidade e o comportamento expansivo dos solos. Além disso, seu aproveitamento pode favorecer a economia circular e reduzir os impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Balbi et al., 2026; Nangulama et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Os efeitos da adição desses materiais estão relacionados tanto a alterações físicas quanto a processos químicos. Do ponto de vista físico, as partículas podem preencher os vazios e modificar o arranjo dos grãos, favorecendo o empacotamento e o intertravamento da mistura. Já os efeitos químicos dependem da composição do resíduo e das características do solo. Em materiais que apresentam constituintes reativos, determinadas condições podem favorecer trocas iônicas e reações pozolânicas, com a formação de compostos cimentantes, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Essas transformações podem contribuir para o aumento da coesão e, em algumas situações, do ângulo de atrito interno. Entretanto, os resultados variam conforme o tipo de solo, o teor de resíduo incorporado, as condições de umidade e o período de cura (Yang et al., 2025; Zaini et al., 2024).

Entre os fatores que influenciam o desempenho de solos estabilizados, o tempo de cura merece atenção, pois permite o desenvolvimento progressivo das reações químicas e das alterações microestruturais responsáveis por parte dos ganhos de resistência. Apesar disso, o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento não segue

necessariamente uma tendência crescente ao longo do tempo. Em determinadas misturas, o aumento da coesão pode ser mais expressivo do que a variação do ângulo de atrito interno, enquanto teores excessivos de resíduo podem comprometer o desempenho do material. Essas particularidades demonstram a importância de avaliar experimentalmente cada combinação de solo e aditivo, considerando diferentes proporções e períodos de cura (Espinosa et al., 2023).

Nesse cenário, a cinza de lenha de algaroba (CLA) constitui uma alternativa a ser investigada para a estabilização de solos. Seu aproveitamento pode contribuir para a valorização de um resíduo da combustão de biomassa, mas sua aplicação geotécnica depende da compreensão de seus efeitos sobre as propriedades do material tratado. Assim, é necessário verificar se a incorporação da cinza promove alterações nos parâmetros de resistência e se essas mudanças variam de acordo com o teor adicionado e o tempo de cura.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência de diferentes teores de cinza de lenha de algaroba e de distintos tempos de cura sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo compactado. Para tanto, serão realizados ensaios de cisalhamento direto, cujos resultados serão utilizados na determinação e interpretação das envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, com ênfase na análise da coesão e do ângulo de atrito interno. A partir desses resultados, busca-se compreender o comportamento mecânico das misturas estudadas e discutir o potencial de aproveitamento da CLA na estabilização de solos para aplicações geotécnicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O solo utilizado para realização desta pesquisa, foi proveniente do município de Agrestina-PE, foi extraído amostras indeformadas com um total de 250 kg. Já a Cinza de Lenha de Algabora (CLA), foi fornecida pela LGN Lavanderia, que está localizada no Sítio Cachoeira Seca, Caruaru-PE, gerada a uma temperatura média de 200°C. Os parâmetros de caracterização física dos materias e suas respectivas novas estão apresentados na Tabela 1.

A caracterização química dos matérias foi realizado através do ensaio de espectrometria de raios-X (FRX), para obtenção da composição química do solo e da CLA. No solo os teores mais relevantes foram a Sílica (60,17%), óxido de alumínio

(17,56%) e óxido de ferro (5,30%), já na CLA, a maior predominância é o óxido de cálcio com 57.17%, seguido do potássio com 7,22%.

Tabela 1: Caracterização do solo e da Cinza de Algaroba

Parâmetro	Solo	Cinza	Norma
Peso específico dos grãos	26,8 kN/m³	24,3 kN/m³	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%	13,1 kN/m³	NBR 7182 (ABNT, 2016)
Umidade ótima	14,3%	-	
Classificação SUSC	CL		

Fonte: Autores (2026)

Com a intenção de verificar o comportamento mecânico do solo estabilizado com a cinza de lenha de algaroba, foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento. Para a realização dos ensaios adotou diferentes teores de CLA, 4%, 6%, 8% e 10% em relação a massa seca de solo e períodos de cura de 0, 14 e 28 dias. A escolha dos teores de cinza foi definida com base em outros trabalhos realizados anteriormente (Blayi et al., 2024; Krishnan; Ravichandran, 2022; Lacerda, 2019).

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a umidade ótima e peso específico aparente seco, parâmetros obtidos através do ensaio de compactação com a energia normal, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2:Parâmetros de compactação das misturas

Teores	0%	4%	6%	8%	10%
Peso específico aparente seco (kN/m³)	18,35	18,06	17,93	17,88	17,58
Umidade ótima	14,30	15,10	15,15	15,50	17,00

Fonte: Autores (2026)

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado na malha de n° 4 (abertura de 4.8mm) e a CLA foi seca ao ar e peneirada na malha nº 200 (abertura de 0,075 mm), com a intenção de retirar vestígios deixado pelo processo da queima. Posteriormente, realizou-se à

mistura a seco do solo e da cinza de acordo com as dosagens pré-estabelecidas no programa experimental.

Para a modelagem dos corpos de prova (CPs) foi executada a compactação do solo e solo com cinza, com energia normal, para isso, utilizou-se um cilindro tripartido com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, em seguida, aparou-se amostra com 60 mm de largura, 60 mm de comprimento e 20 mm de espessura (Figura 1). Os corpos de prova foram embalados em plástico filme e papel alumínio, e armazenados em câmera úmida, até o momento do ensaio, para evitar a perda de umidade.

Figura 1: Modelagem dos corpos de prova



Fonte: Autores (2026)

Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram executados seguindo a norma ASTM D3080 (2011), para a determinação dos parâmetros de resistência do solo através da envoltória de Mor-Coulomb, para realização dos ensaios foi utilizado o equipamento de cisalhamento da SOLOTEST. Os corpos de prova foram posicionados dentro da caixa tripartida, inundados por 24 horas, submetidos a uma velocidade constante de 0,5mm/min, o critério de ruptura do ensaio escolhido foi de 10% de deformação de sua largura, ou seja, de 6mm e as três tensões empregadas no ensaio foi de 50kPa, 100kPa e 200 kPa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb para o solo natural e para as misturas contendo diferentes teores de Cinza de Lenha de Algaroba (CLA) nos tempos de cura de 0, 14 e 28 dias. Os parâmetros de resistência coesão (c) e

ângulo de atrito interno (ϕ), bem como os coeficientes de determinação (R^2), obtidos a partir das regressões lineares das envoltórias, encontram-se sintetizados na Tabela 3. Observa-se que todos os ajustes apresentaram elevadas correlações ($0{,}932 \leq R^2 \leq 1{,}000$), confirmando a aderência dos dados ao modelo de ruptura de Mohr-Coulomb, o qual é amplamente utilizado para representar a resistência ao cisalhamento de solos naturais e estabilizados (Peng et al., 2026; Wang et al., 2024).

A análise gráfica das envoltórias evidencia o deslocamento progressivo das retas para patamares superiores de tensão de cisalhamento (τ) com o aumento do teor de CLA e da idade de cura. Esse ganho inicial é coerente com a ação imediata de mecanismos de troca catiônica, floculação/aglomeração e rearranjo das partículas, que ocorrem nas primeiras horas após a mistura e promovem uma estrutura mais agregada e estável (Parihar; Gupta, 2021; Zaini et al., 2024).

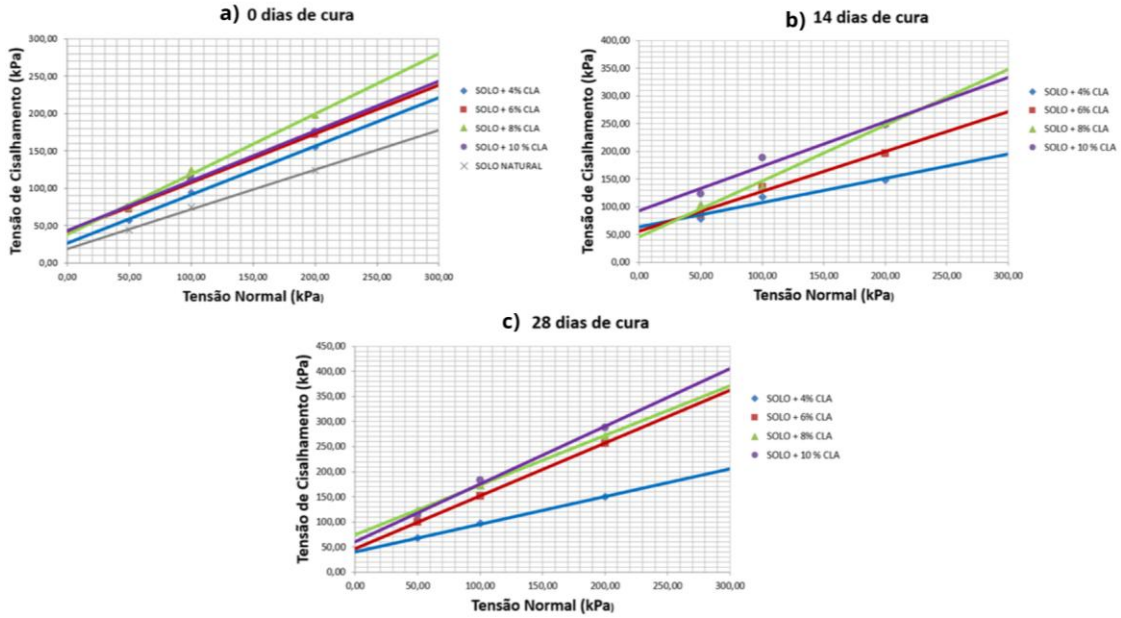
Sem tempo de cura (0 dias), a adição imediata de CLA atua como um elemento estruturante na matriz do solo. As retas sofrem uma elevação no intercepto coesivo (passando de 18,85 kPa no solo puro para até 43,59 kPa com 10% de CLA) e um aumento na sua inclinação, com o ângulo de atrito aumentando de 27,92° para 38,85° no teor de 8% de CLA (Figura 2a). Esse ganho instantâneo é atribuído ao efeito físico do preenchimento de vazios e ao incremento do atrito intergranular entre as partículas. A literatura atribui esse comportamento ao melhor empacotamento das partículas finas do estabilizante, ao preenchimento de vazios e ao aumento do intertravamento mecânico entre os grãos do solo (Nyirenda et al., 2026; Peng et al., 2026).

Com a evolução da cura para 14 dias (Figura 2b), nota-se uma transição marcante nas envoltórias, impulsionada pelo ganho expressivo na coesão. Graficamente, observa-se que a envoltória correspondente a 10% de CLA é deslocada verticalmente para cima, registrando o maior intercepto coesivo do estudo ($c = 93{,}32$ kPa), esse aumento expressivo está associado às reações de troca catiônica e formação de compostos cimentícios, favorecidos pela presença de CaO livre e da portlandita na composição da CLA, que reagem com a fração argilosa do solo (Wang et al., 2024; Zaini et al., 2024).

Aos 28 dias de cura (Figura 2c), as envoltórias assumem maior inclinação, consolidando os maiores ângulos de atrito do estudo. A inclinação da reta atinge o pico na mistura com 10% de CLA ($\phi = 48{,}96^{o}$), com coesão de 60,77 kPa. Em termos práticos, sob uma tensão normal (σ) de 200 kPa, a tensão de cisalhamento limite evolui de 123,90 kPa no solo puro para 288,05 kPa no tratamento com 10% de CLA aos 28 dias. O aumento

contínuo da inclinação das envoltórias ao longo do tempo sugere que a maturação dos produtos cimentícios, além de promover a união entre os agregados, resulta em uma matriz de solo mais rígida e rugosa, favorecendo a resistência por atrito e o travamento mecânico entre as partículas (Espinosa et al., 2023; Zhou et al., 2024).

Figura 2: Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA



Fonte: Autores (2026)

Tabela 3: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Tempo de cura	Teor de CLA	Tensão Normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de Atrito (ϕ°)	R^2
		50	100	200			
0 dias	0 %	43,51	74,58	123,90	18,85	27,92	0,996
	4%	56,43	94,81	154,98	26,35	32,99	0,996
	6%	71,28	113,61	171,01	42,57	33,11	0,989
	8%	74,50	125,05	197,38	38,34	38,85	0,992
	10%	74,83	113,33	175,81	43,59	33,68	0,997
14 dias	4%	78,77	117,61	147,56	63,75	23,58	0,932
	6%	85,97	135,97	196,54	55,69	35,69	0,982
	8%	103,83	135,65	251,31	46,00	45,23	0,984
	10%	123,15	188,53	248,19	93,32	38,65	0,954
28 dias	4%	67,60	97,02	150,60	40,81	28,85	0,999
	6%	99,00	150,89	256,73	46,08	46,47	1
	8%	123,52	172,76	271,81	74,00	44,68	1
	10%	113,24	183,10	288,05	60,77	48,96	0,994

Fonte: Autores (2026)

ISSN: 2358-8829

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto permitiu avaliar a influência da adição de cinza de lenha de algaroba (CLA) e do tempo de cura na resistência ao cisalhamento do solo compactado. De modo geral, os resultados indicaram diferenças no comportamento mecânico das misturas em relação ao solo natural, destacando a importância de considerar tanto o teor de cinza quanto o período de cura na avaliação do material.

A adição de CLA proporcionou alterações nos parâmetros de resistência desde a condição sem cura, indicando que os efeitos da incorporação do resíduo podem ocorrer antes do desenvolvimento de possíveis reações químicas ao longo do tempo. Essas alterações podem estar relacionadas a mudanças no arranjo das partículas e no contato entre os grãos. Entretanto, a confirmação desses mecanismos exige análises complementares da composição e da microestrutura das misturas.

Aos 14 dias de cura, a mistura com 10% de CLA apresentou o maior valor de coesão, de 93,32 kPa, evidenciando o desempenho dessa composição para o parâmetro analisado. Já aos 28 dias, a mesma proporção de cinza alcançou o maior ângulo de atrito interno, de 48,96°, e a maior tensão de cisalhamento na ruptura, de 288,05 kPa, para uma tensão normal de 200 kPa. Esses resultados indicam que o teor de 10% de CLA apresentou desempenho expressivo nas condições experimentais avaliadas, embora a escolha da composição mais adequada deva considerar conjuntamente os parâmetros de resistência e as condições de aplicação pretendidas.

De maneira geral, os resultados apontam para o potencial de aproveitamento da cinza de lenha de algaroba na estabilização de solos, contribuindo para a valorização de um resíduo e para a busca de alternativas aos materiais tradicionalmente empregados na engenharia geotécnica. Contudo, a confirmação de sua viabilidade técnica e ambiental depende de investigações complementares, especialmente quanto à durabilidade, à expansibilidade, à compressibilidade e ao comportamento do material sob diferentes condições de exposição e carregamento. Recomenda-se, ainda, avaliar seu desempenho em aplicações específicas, como camadas de pavimentos e obras de terra, antes de propor sua utilização em escala de campo.

REFERÊNCIAS

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 3080**. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, p. 1–9, 2011.

BALBI, E. P., et al. Mechanical and microstructural investigation on clayey subgrade soil stabilised with wood biomass ash: mix design optimisation and curing effects. **Road Materials and Pavement Design**, 2026.

BANYHUSSAN, Q. S., et al. Stabilization of Clay Subgrade Soil by Using Waste Foundry Sand with a Geogrid. **CivilEng**, 2025.

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

ESPINOSA, A. B., et al. Strength performance of low-bearing-capacity clayey soils stabilized with ladle furnace slag. **Environmental Science and Pollution Research International**, vol. 30, 2023, pp. 101317 – 101342.

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

LACERDA, L. S. S. DO N. DE. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira., 2019.

NANGULAMA, H. K., and SIYA P. R. Effectiveness of Bagasse Ash Incorporating Limestone Calcined Clay Cement (LC3) in Improving Shear Strength and Durability Properties of Black Cotton Soils. **Advances in Civil Engineering**, 2024,

NYIRENDA, D., et al. Triaxial Shear Strength of an Expansive Black Cotton Soil Stabilised with Nano-Silica, Lime and Fly Ash. **Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology**, 2026.

PARIHAR, N., and A. GUPTA. Effect of Curing on Compressive and Shear Strength Parameters of Liming Waste Ash Stabilized Expansive Soil. **Lecture Notes in Civil Engineering**, 2021.

PENG, De-Xing, et al. Shear behavior and predictive modeling of loess stabilized with rice husk ash. **Scientific Reports**, vol. 16, 2026, https://doi.org/10.1038/s41598-026-35717-w.

ROSALES, J. et al. Use of nanomaterials in the stabilization of expansive soils into a road real-scale application. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 1–25, 2020.

WANG, Chwen-Huan, et al. Evaluating the strength characteristics of mixtures of municipal solid waste incineration bottom ash and reddish laterite clay for sustainable construction. **Heliyon,** vol. 10, 2024.

YANG, Huohai, et al. Mechanical properties of silty clay stabilized by cement and municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) under low-temperature curing condition. **Case Studies in Construction Materials,** 2025.

ZAINI, M. S. I., et al. Experimental investigations on physico-mechanical properties of kaolinite clay soil stabilized at optimum silica fume content using clamshell ash and lime. **Scientific Reports**, vol. 14, 2024.

ZHANG, Qi-Yong, et al. Utilisation of biomass ash after high-temperature treatment for strengthening purple soil under various curing conditions. **Construction and Building Materials**, 2024.

ZHOU, Yongxiang, et al. Strength development and solidification mechanism of soils with different properties stabilized by cement-slag-based materials. **Case Studies in Construction Materials**, 2024.