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/COBRAMSEG2026.6/124

Valoração de resíduos na geotecnia para elaboração de novos aglomerantes álcali-ativados

Auanny Alícia Alves da Silva
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB, Brasil, auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

Carina Silvani
Professora, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB, Brasil, carina.silvani@professor.ufcg.edu.br

Giovani Jordo Bruschi
Pesquisador de pós-doutorado, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, gio.bruschi@gmail.com

William Mateus Kubiaku Levandoski
Doutorando em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, Brasil, williankubi@gmail.com

Eduardo Pavan Korf
Professor, Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Erechim/RS, Brasil, eduardo.korf@uffs.edu.br

RESUMO: Obras de engenharia geotécnica demandam grandes quantidades de aglomerantes, cuja produção consome recursos naturais e emite elevadas quantidades de CO_2. Nesse contexto, uma temática que apresenta elevado potencial ambiental é voltada para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de aglomerantes sustentáveis, como os cimentos álcali-ativados. Esses materiais utilizam precursores ricos em sílica e alumina em estado amorfo, ativados por soluções alcalinas, e podem ter o desempenho otimizado pela incorporação de fontes de cálcio. Essa pesquisa realizou uma revisão sistemática da literatura nas bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, com o objetivo de identificar materiais alternativos presentes no Nordeste do Brasil com potencial de uso como precursores e fontes de cálcio em aglomerantes álcali-ativados, além de discutir as vantagens ambientais e sociais associadas a essas soluções. Os resultados indicam que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz, a cinza de madeira de algaroba e o pó de vidro apresentam elevados teores de sílica e alumina, o que favorece sua aplicação como precursores. Cascas de ovo e conchas de mariscos constituem fontes potenciais de cálcio. Tais achados apontam incrementos de resistência mecânica que superam 1000 kPa em idades iniciais e reduções de até 80% nas emissões de gases de efeito estufa. Conclui-se que o aproveitamento desses resíduos locais viabiliza o desenvolvimento de aglomerantes de baixo carbono, alinhando eficiência mecânica e sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia sustentável, Álcali-ativação, Aglomerantes alternativos, Economia circular.

ABSTRACT: Geotechnical engineering projects require large quantities of binders, whose production consumes natural resources and emits high amounts of CO_2. Consequently, a topic with high environmental potential is the reuse of agro-industrial waste to produce sustainable binders, such as alkali-activated cements. These materials employ precursors rich in amorphous silica and alumina activated by alkaline solutions, and their performance can be enhanced by incorporation of calcium sources. This study carried out a literature review across the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases to identify agro-industrial residues available in Northeast Brazil with potential use as precursors and calcium sources in alkali-activated binders, as well as to discuss the associated environmental and social benefits. The results indicate that sugarcane bagasse ash, rice husk ash, algaroba wood ash and ground glass powder have high silica and alumina contents and are suitable as precursors. Eggshells and seashells can act as calcium sources. The reviewed findings show

mechanical strength increments exceeding 1000 kPa in early stages and up to an 80% reduction in greenhouse gas emissions. It is concluded that the utilization of these local wastes enables the development of low-carbon binders, aligning mechanical efficiency and sustainability.

KEYWORDS: Sustainable geotechnics, Alkali-activation, Alternative binders, Circular economy.

1 INTRODUÇÃO

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma problemática de alto impacto ambiental e sanitário no quesito global, especialmente em países emergentes como os membros do BRICS, onde a coleta seletiva é pouco desenvolvida e o descarte irregular é predominante (Gonçalves et al., 2018; Miranda et al., 2020). No Brasil, mesmo após a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), as taxas de reciclagem de RSU permanecem inferiores a 3% há mais de uma década. Esse cenário se torna ainda mais crítico na região Nordeste com apenas 12% de cobertura de serviços de manejo e iniciativas de valorização de resíduos (Bó; Bernardin, 2026; Brasil, 2010).

Paralelamente, a indústria da construção civil enfrenta a necessidade de reduzir suas emissões de carbono, uma vez que a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 8% das emissões globais, gerando de 0,7 a 1,1 toneladas de CO_2 por tonelada de material; comparativamente, a fabricação de cal apresenta impacto similar em sua proporção unitária, liberando cerca de 0,9 toneladas de CO_2 por tonelada produzida (Ayub; Khan, 2023; EuLA, 2022; Nie et al., 2022).

Cimentos álcali-ativados se destacam como uma alternativa sustentável para promover a descarbonização na indústria da construção civil, podendo reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 80% em comparação ao cimento Portland tradicional (Nasir et al., 2024). Entre as matérias-primas com potencial de utilização destacam-se diversos subprodutos como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz, cinzas de madeira, pó de vidro moído, cascas de ovos e conchas de marisco (Adesanya et al., 2021; Elzeadani et al., 2022; Patil; Katare, 2023). Além da redução do impacto ambiental, o uso desses resíduos promove a economia circular e contribui para a mitigação de passivos ambientais.

Diante disso, esta revisão de literatura tem como objetivo identificar resíduos sólidos disponíveis no Nordeste do Brasil com viabilidade para utilização em aglomerantes álcali-ativados, visando o desenvolvimento de soluções construtivas de baixo carbono adequadas ao contexto regional.

2 COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES ÁLCALI-ATIVADOS

2.1 Álcali-ativação

A álcali-ativação é um processo químico empregado para a produção de aglomerantes alternativos ao cimento Portland, baseado na reação entre um material precursor e um ativador alcalino. Diferentemente do ligante convencional, cuja coesão decorre da hidratação do clínquer, a resistência é obtida pela dissolução das fases amorfas do precursor e posterior formação de géis cimentantes (Wan et al., 2025).

Os precursores correspondem a materiais sólidos (naturais ou residuais) que apresentam elevados teores de sílica e alumina, preferencialmente em estado amorfo, condição esta que favorece sua reatividade. Conforme estudos recentes, cinzas, escórias e resíduos vítreos apresentam o potencial físico-químico necessário para desempenhar esse papel, fornecendo íons de silício e alumínio que serão solubilizados durante o processo de ativação (Adesanya et al., 2021; Li et al., 2025; Nasir et al., 2024).

Os ativadores alcalinos, normalmente constituídos por bases fortes ou sais alcalinos, são substâncias responsáveis por promover o ambiente químico necessário à dissolução dos constituintes do precursor, sendo a escolha do tipo e da concentração do ativador determinante para a cinética das reações e para o desempenho mecânico do material final (Elzeadani et al., 2022; Provis; Van Deventer, 2014; Wan et al., 2025).

Incorporar materiais ricos em cálcio à mistura tem se mostrado uma estratégia eficiente para otimizar o desempenho dos sistemas álcali-ativados, visto que favorece a formação de produtos cimentantes adicionais, como o gel C-A-S-H. Isso contribui para o ganho de resistência em idades iniciais e para a melhoria do comportamento mecânico global, aspecto particularmente relevante para aplicações geotécnicas (Pompermaier et al., 2024).

2.2 Precursores alternativos

2.2.1 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é um resíduo da indústria sucroalcooleira, originado da queima do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de energia, com produção mundial de 18 a 72 milhões de toneladas por ano. Devido ao elevado teor de sílica (70%), a CBCA tem sido amplamente investigada como precursor alternativo em cimentos álcali-ativados (Adesanya et al., 2021; Patil; Katare, 2023).

A reatividade da CBCA é influenciada pelas condições de queima e pelo processamento pós-combustão. A presença de material não queimado e a granulometria heterogênea podem prejudicar a atividade pozolânica e a formação de produtos cimentantes em sistemas álcali-ativados. Para mitigar esses efeitos, processos de moagem e de classificação granulométrica são frequentemente empregados para favorecer a ativação alcalina, podendo elevar o índice de atividade pozolânica de 57% para mais de 94% (Patil; Katare, 2023).

Em aplicações geotécnicas, misturas estabilizadas com 15% de aglomerante à base de CBCA e ativação com carbonato de sódio (Na_2CO_3) podem atingir resistências superiores a 1000 kPa após apenas 7 dias de cura, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa em até 25,5% quando comparado a métodos convencionais para o mesmo desempenho mecânico (Moazami et al., 2025).

Considerando o contexto agroindustrial do Nordeste do Brasil, onde a produção de cana-de-açúcar é expressiva, a CBCA representa não apenas um recurso abundante para desenvolvimento de materiais sustentáveis, mas também uma oportunidade de agregar valor econômico a um resíduo atualmente subutilizado, muitas vezes com destinação final inadequada. Nascimento et al. (2019) destacam que cinzas de biomassa produzidas na região possuem granulometrias reduzidas que favorecem a nucleação da fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

2.2.2 Cinza da casca de arroz

As cinzas da casca de arroz (CCA) são resíduos agroindustriais da indústria alimentícia, originados a partir da queima da casca para a produção de energia, com destaque por possuir o maior conteúdo de sílica (85-95%) obtível de um produto vegetal (Adesanya et al., 2021; Ferreira et al., 2023). A cada tonelada de arroz processada, são produzidos aproximadamente 200 kg de casca, resultando em cerca de 40 kg de cinza após a queima (Zareei et al., 2017). Estima-se que sejam geradas anualmente entre 70 e 80 milhões de toneladas de CCA no mundo e, no Brasil, o valor é cerca de 466 mil toneladas por ano (Elzeadani et al., 2022; Pompermaier et al., 2024).

Devido à sua composição, a CCA tem sido estudada quanto ao potencial como precursor ou adição em ligantes álcali-ativados. Estudos indicam que a substituição de apenas 15% de cimento por CCA pode elevar a resistência à compressão em até 20% aos 28 dias (Zareei et al., 2017), enquanto, em aplicações geotécnicas de pavimentação, a incorporação de 5% de CCA em misturas de resíduos de bauxita ativadas alcalinamente promoveu um aumento de mais de 10 vezes na resistência à compressão simples, indo de 106,19 kPa para 1247,78 kPa (Reddy; Hegde, 2026).

Ferreira et al. (2023) mostraram que a CCA pode ser álcali-ativada com o uso de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), sendo válido ressaltar que as resistências obtidas com KOH são mais elevadas. As reações entre a CCA e os ativadores alcalinos também são descritas por Le e Ludwig (2020). Os autores afirmam que a moagem prévia da cinza aumenta a área específica e a fração reativa, favorecendo a dissolução das fases amorfas e a formação de produtos cimentantes, gerando assim um cimento álcali-ativado de melhor qualidade.

Considerando o cultivo tradicional de arroz vermelho no Vale Piancó (PB), o aproveitamento da CCA em aglomerantes de baixo carbono pode reduzir a disposição inadequada do resíduo e insere a região no contexto da economia circular. Ao agregar valor econômico à cadeia produtiva local, surge assim uma nova fonte de renda para os agricultores, principalmente na agricultura familiar.

2.2.3 Cinza de madeira

A madeira é um dos recursos energéticos mais utilizados globalmente e sua combustão em caldeiras industriais gera um volume massivo de cinzas de biomassa. Quimicamente, essas cinzas apresentam uma composição complexa e altamente variável, dependendo da espécie vegetal e das condições de queima, sendo caracterizadas por estruturas predominantemente amorfas ricas em sílica, alumina e/ou cálcio (Balagosa et al., 2025), logo contribuem positivamente em cimentos álcali-ativados.

Acerca do reaproveitamento de cinzas de madeira, Pereira et al. (2024) verificaram que a cinza de resíduos de eucalipto, rica em sílica amorfa, pode atuar como precursor, tendo sua reatividade aumentada pela moagem. Narani et al. (2024), ao estudarem cinzas volantes provenientes de uma indústria de papel, identificaram predomínio de cálcio (47,79%), enquanto Jensen et al. (2026) observaram predominância de sílica em cinzas pesadas de madeira. Esses resultados evidenciam a elevada variabilidade composicional das cinzas de madeira, a qual depende da espécie vegetal e das condições de combustão, mas também reforçam seu potencial como precursor ou fonte complementar de cálcio.

No contexto do Nordeste do Brasil, a algaroba (*Prosopis Juliflora*) é uma árvore que foi inserida artificialmente no bioma da caatinga, onde se adaptou rapidamente ao clima semiárido, possuindo crescimento acelerado. Atualmente, a algaroba é considerada uma espécie invasora muito abundante na região, mas sua madeira possui alto potencial calorífico, o que a faz ser utilizada como fonte energética em fornos, especialmente nos setores têxtil e cerâmico (Nascimento et al., 2019).

Moura et al. (2021) e Nascimento et al. (2019) encontraram na cinza da queima da lenha de algaroba a presença predominante de compostos de cálcio (>70%) e baixos teores de sílica e alumina, podendo ser utilizada de forma similar ao calcário, favorecendo a nucleação da fase C-S-H, o que a posiciona como um componente de alto valor para a estabilização de solos na região semiárida.

2.2.4 Pó de vidro

O vidro é um material inorgânico e quimicamente estável que, embora tecnicamente 100% reciclável, enfrenta sérios gargalos quanto à circularidade na reciclagem. Globalmente, a produção anual de vidro é estimada em cerca de 130 milhões de toneladas, sendo majoritariamente composta por embalagens (48%) e vidros planos (42%). Apesar do volume produzido, a taxa global de reciclagem é de apenas 21%, caindo para 11% no caso de vidros planos, devido a dificuldades em relação ao manejo e à triagem (Baek et al., 2025).

Para a engenharia de materiais, a transformação desse passivo em pó de vidro moído (PVM) representa uma oportunidade estratégica de economia circular. Tecnicamente, o PVM destaca-se como um precursor suplementar de alta eficiência devido ao seu conteúdo de sílica (SiO_2) em estado amorfo, variando de 65% a 90% (Adesanya et al., 2021; Baldovino et al., 2021; Inazumi et al., 2025; Shahnazi et al., 2025). Diferentemente das cinzas de biomassa, que podem apresentar alta porosidade e contaminantes orgânicos, o PVM fornece uma fonte de silício mais homogênea e prontamente dissolúvel (Ayub e Khan, 2023; Baldovino et al., 2021; Patil; Katare, 2023).

Em sistemas álcali-ativados, a finura da moagem do vidro é o fator determinante para a cinética da reação: quanto menor a partícula, maior a área superficial específica disponível, o que acelera a taxa de dissolução dos íons de silicato. A reação resulta na formação de fases ligantes fundamentais, como o gel N-A-S-H (silicato de sódio e alumínio hidratado) e, na presença de fontes de cálcio, os géis C-S-H e C-A-S-H (silicato de cálcio e alumínio hidratado) (Shahnazi et al., 2025).

Em misturas de solo siltoso compactado com cal, a substituição de 5% por 30% de PVM resultou em um incremento na resistência à compressão simples de 956% aos 7 dias e 137% aos 90 dias de cura (Baldovino et al., 2021). E, em solos arenosos, a utilização de até 50% de PVM permitiu alcançar uma resistência de 14,73 MPa aos 91 dias, um valor dez vezes superior à resistência obtida aos 7 dias.

Além de elevar a resistência mecânica, a incorporação de PVM tem demonstrado eficácia na imobilização de metais pesados e na redução da expansão causada pela reação álcali-agregado (Baldovino et al., 2021; Li et al., 2025). Para a realidade da infraestrutura brasileira, o uso de teores otimizados (entre 15% e 30% de PVM) permite que misturas de solo-cal atinjam os requisitos normativos para sub-bases e bases de pavimentos (UCS > 1,2 MPa), com o benefício adicional de reduzir a porosidade da matriz em até 10%.

Sob a ótica ambiental e econômica, cada tonelada de vidro reinserida no ciclo produtivo economiza 1,2 toneladas de matérias-primas e reduz drasticamente as emissões de CO_2 inerentes à produção de cimento (Baek et al., 2025). Portanto, diante dos gargalos logísticos da reciclagem convencional no Nordeste, a utilização do PVM em sistemas álcali-ativados aplicados à estabilização de solos representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável.

2.3 Fontes alternativas de cálcio

2.3.1 Casca de ovo

A produção global de ovos atingiu 91 milhões de toneladas em 2023; consequentemente, são produzidas cerca de 8 milhões de toneladas de resíduos de casca de ovo anualmente, usualmente destinados a aterros sanitários (Omur et al., 2024). As cascas de ovos, segundo Seikh et al. (2025), são compostas por 90% de carbonato de cálcio, logo são uma fonte de cálcio com pureza maior que a maioria das rochas calcárias encontradas na natureza.

Em cimentos álcali-ativados, cascas de ovos moídas vêm sendo estudadas como fontes de cálcio em seu estado natural no formato de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e após calcinação no formato de óxido de cálcio (CaO) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Omur et al. (2024), ao avaliar um cimento álcali-ativado de metacaulim, encontraram que a adição de pó de casca de ovos sem calcinação aumentou em 22% a resistência das pastas e, ao realizar uma análise de ciclo de vida, concluíram que o uso de pó de casca de ovo diminui o impacto ambiental.

A pesquisa de Nierwinski et al. (2026) demonstrou que uma cal produzida, a partir da calcinação de cascas de ovo, apresenta maior teor de óxido de cálcio (72,9%) e, consequentemente, proporciona melhores resultados na estabilização de solo do que uma cal dolomítica comercial do Brasil. Considerando cimentos álcali-ativados, Ferreira et al. (2023) demonstraram que blocos feitos de cinza de casca de arroz e cal de casca de ovo álcali-ativados, quando moldados com porosidade menor que 55%, atendem aos critérios da ASTM C90-16a para blocos estruturais (ASTM, 2016). Além disso, o pó de casca de ovo tem sido investigado em sistemas geopoliméricos de baixo carbono (Abdellatief et al., 2025), evidenciando seu potencial como fonte alternativa de cálcio para materiais cimentícios sustentáveis.

Diante do crescimento da produção avícola no Nordeste do Brasil, a integração da casca de ovo em aglomerantes de baixo carbono alinha-se aos princípios da economia circular e da engenharia sustentável. Entretanto, são necessários estudos para avaliar se resultados mais sustentáveis são obtidos com sua utilização na forma natural ou após calcinação.

2.3.2 Conchas de moluscos marinhos

A gestão de resíduos de moluscos marinhos representa um desafio ambiental de escala massiva, visto que a produção global de moluscos atingiu 18,9 milhões de toneladas em 2022 e as conchas representam entre 40% e 70% do peso total do animal. Após o consumo, o descarte tende a ser feito de forma irregular em oceanos e aterros, causando desequilíbrios ecossistêmicos e odores desagradáveis (Cescon et al., 2025).

Do ponto de vista químico, o carbonato de cálcio presente nas conchas pode ser convertido em óxido de cálcio por meio de calcinação (geralmente em temperaturas entre 700 °C e 900 °C) e o material resultante apresenta elevada reatividade, favorecendo a formação de produtos como géis do tipo C-A-S-H, especialmente quando combinado com precursores ricos em sílica e alumina (Camargo; Estupinan, 2022; Cescon et al., 2025; Monneron-Gyurits et al., 2018).

Além do uso em matrizes cimentícias, a aplicação de conchas de moluscos marinhos (CMM) em sistemas álcali-ativados tem sido explorada em estabilização de solos e imobilização de contaminantes, demonstrando melhoria do comportamento físico-químico dos materiais tratados. Esses resultados reforçam a versatilidade do resíduo como fonte de cálcio e sua adequação para aplicações em engenharia geotécnica, particularmente em contextos onde o desenvolvimento rápido de resistência e a redução do impacto ambiental são desejáveis (López et al., 2025).

A literatura revisada indica que CMM podem ser utilizadas de diferentes formas pelo seu elevado teor de carbonato de cálcio (superior a 90%), incluindo como substituto parcial do calcário, como adição mineral

rica em cálcio ou, em alguns casos, como componente do próprio sistema ativador. Estudos relatam desempenhos mecânicos comparáveis aos obtidos com ligantes convencionais, com resistências à compressão que podem atingir ou superar os valores típicos do cimento Portland, dependendo do precursor empregado, das condições de ativação e do regime de cura adotado (Cescon et al., 2025).

A disponibilidade de CMM no Nordeste do Brasil é elevada, pois somente na cidade de Conde (PB) são descartadas diariamente cerca de 11 toneladas de conchas (Camargo; Estupinan, 2022). Considerando que a atividade de mariscagem é desenvolvida por populações vulneráveis, a valoração econômica deste material ainda apresenta potencial de efeito social positivo, pois a substituição parcial do calcário natural promove a valorização de um resíduo abundante, frequentemente concentrado em regiões costeiras.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto da produção de resíduos agroindustriais no Nordeste, a cinza de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz e o pó de vidro são precursores promissores para matrizes álcali-ativadas devido aos elevados teores de sílica e alumina amorfa (de 70% a 95%). O beneficiamento por moagem prévia consolida-se como fator chave, elevando o índice de atividade pozolânica a mais de 94%. De forma complementar, cascas de ovos, conchas de mariscos e cinza de algaroba se apresentam como oportunidades para novas fontes alternativas de cálcio, com teores de carbonato de cálcio acima de 90%, favorecendo a formação de géis C-S-H e C-A-S-H essenciais para que misturas geotécnicas alcancem resistências superiores a 1000 kPa em aplicações de camadas de pavimentação.

A valorização desses passivos ambientais pode reduzir em até 80% as emissões de gases de efeito estufa em comparação ao cimento Portland, promovendo a descarbonização da construção civil. Além disso, promove a economia circular regional, mitiga o descarte inadequado e gera novas oportunidades de renda para comunidades locais vulneráveis, como as famílias ligadas à mariscagem e à agricultura familiar. Por consequência, conclui-se que o aproveitamento desses resíduos é vista como uma solução estratégica para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e o fortalecimento socioeconômico da região nordestina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdellatief, M., et al. (2025) Influence of Silicate Modulus and Eggshell Powder on the Expansion, Mechanical Properties, and Thermal Conductivity of Lightweight Geopolymer Foam Concrete. *Materials*, 18, 2088.

Adesanya, E., et al. (2021) Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125558.

ASTM International (2016) ASTM C90-16a: Standard specification for loadbearing concrete masonry units.

Ayub, F., Khan, S.A. (2023) An overview of geopolymer composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, 404, 133195.

Baek, C.R., et al. (2025) Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories. *Environmental Engineering Research*, 30, 240241.

Balagosa, J., et al. (2025) Field case study of soil columns mixed with wood pellet fly ash blended binder in weathered granite soils. *Case Studies in Construction Materials*, 22, 04378.

Baldovino, J.J.A., et al. (2021) Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, 121874.

Bó, G.C.S., Bernardin, A.M. (2026) The (de)valuation of solid waste in developing countries: The Brazilian case (2012-2022) after the national solid waste policy. *Cleaner Waste Systems*, 13, 100457.

Brasil (2010) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Brasília.

Camargo, M., Estupinan, R.A. (2022) O renascer do marisco: um relato de experiência. *Revista Práxis: Saberes da Extensão*, 10, p. 64-75.

Cescon, A.P., et al. (2025) Urban mining of bivalve shell waste as a sustainable alternative to limestone exploitation: a review on alkali-activated cements and mortars. *Mining*, 5, 69.

Elzeadani, M., et al. (2022) One part alkali activated materials: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 57, 104871.

European Lime Association (2022) *CO_2 innovation in the lime sector 3.0.*

Ferreira, F.A., et al. (2023) Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. *Construction and Building Materials*, 364, 129931.

Gonçalves, A.T.T., et al. (2018) Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. *Revista Ambiente & Água*, 13.

Inazumi, S., et al. (2025) Development of environmentally sustainable geopolymer-based soil solidifiers using waste siding and glass powders. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100976.

Jensen, A.H., et al. (2026) Wood bottom ash as sand replacement in concrete: Mechanical properties and prediction of durability. *Construction and Building Materials*, 512, 145415.

Le, H.T., Ludwig, H.M. (2020) Alkali silica reactivity of rice husk ash in cement paste. *Construction and Building Materials*, 243, 118145.

Li, L., et al. (2025) Stability and rheological properties of grouts with waste glass powder as cement replacement: Influences of content and alkali activator. *Materials*, 18, 353.

López, L.C.S., et al. (2025) Stabilization of Clay Soils Using a Lime Derived from Seashell. *Materials*, 18, 2723.

Miranda, I.T.P., et al. (2020) The integration of recycling cooperatives in the formal management of municipal solid waste as a strategy for the circular economy: The case of Londrina, Brazil. *Sustainability*, 12, 10513.

Moazami, A., et al. (2025) Sustainable soil stabilization with sodium carbonate-activated slag, pumice, rice husk, and sugarcane bagasse ashes: A life cycle assessment approach. *Results in Engineering*, 27, 106900.

Monneron-Gyurits, M., et al. (2018) Valorization of mussel and oyster shells toward metakaolin-based alkaline activated material. *Applied Clay Science*, 162, p. 15-26.

Moura, L.S., et al. (2021) Use of calcium-rich wood biomass combustion ashes as filler in hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 23, p. 2375-2393.

Narani, S.S., et al. (2024) Wood fly ash and blast furnace slag management by alkali-activation: Trace elements solidification and composite application. *Journal of Environmental Management*, 354, 120341.

Nascimento, F., et al. (2019) Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. *Cerâmica*, 65, p. 85-91.

Nasir, M., Mahmood, A.H., Bahraq, A.A. (2024) History, recent progress, and future challenges of alkali-activated binders – An overview. *Construction and Building Materials*, 426, 136141.

Nie, S., et al. (2022) Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130270.

Nierwinski, H.P., et al. (2026) Sustainable Soil Stabilization Using Eggshell-Derived Lime: A comparative assessment against commercial lime. *Sustainability*, 18, 1442.

Omur, T., et al. (2024) Utilization of eggshell powder in one-part alkali-activated metakaolin based binder. *Construction and Building Materials*, 445, 137981.

Patil, P.P., Katare, V.D. (2023) Development of sustainable alkali-activated binder for building products using sugarcane bagasse ash: A review.

Pereira, B.C.F., et al. (2024) Wood waste ash as sole solid precursor in a novel alkali-activated material: Influence of the ash particle size. *Materials Letters*, 370, 136837.

Pompermaier, C.L., et al. (2024) Stabilization of waste foundry sand with alkali-activated binder: Mechanical behavior, microstructure and leaching. *Construction and Building Materials*, 444, 137772.

Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J. (2014) *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM*, Vol. 13.

Reddy, P.S., Hegde, A. (2026) Assessing the efficacy of alkali-activated rice husk ash amended bauxite residue composites for pavement applications. *Developments in the Built Environment*, 25, 100876.

Seikh, Z., et al. (2025) An overview of utilization of egg shell wastes: A transformation from waste to wealth. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D.*

Shahnazi, M.H., et al. (2025) Performance assessment of waste glass powder in sandy soil stabilization: Effect of alkaline activator on mechanical and microstructural properties. *Results in Engineering*, 27, 106821.

Wan, X., et al. (2025) Research on alkali-activated systems based on solid waste-derived activators: A review. *Sustainability*, 17, 254.

Zareei, S.A., et al. (2017) Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, p. 73-81.