

RECICLAGEM E APROVEITAMENTO DE CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS: REVISÃO DE LITERATURA

RECYCLING AND UTILIZATION OF COAL FLY ASH IN MORTAR PRODUCTION: A COMPREHENSIVE LITERATURE REVIEW

RECICLAJE Y APROVECHAMIENTO DE CENIZA VOLANTE DE CARBÓN MINERAL EN LA PRODUCCIÓN DE MORTEROS: REVISIÓN DE LITERATURA

Breno do Carmo Alexandrino¹, Elzelis Muller da Silva², Fábio Moreira da Costa Júnior³, Thiago Nicolau Magalhães de Souza Conte⁴, Vitória Nazaré Costa Seixas⁵, Patrícia Danielle Lima de Lima⁶, Rosemary Maria Pimentel Coutinho⁷

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.6221

Recibido: 19/07/2026 | Aceptado: 20/07/2026 | Publicación en línea: 03/08/2026.

RESUMO

A construção civil enfrenta desafios relacionados às elevadas emissões de CO₂ decorrentes da produção de cimento Portland, tornando necessária a adoção de materiais cimentícios suplementares mais sustentáveis. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas sobre a utilização da cinza volante de carvão mineral como substituição parcial do cimento Portland na produção de argamassas. Trata-se de uma revisão narrativa, qualitativa e descritiva, realizada por meio de pesquisas nas bases Google Acadêmico, SciELO e literatura técnica especializada. O referencial teórico evidenciou que a cinza volante apresenta elevada atividade pozolânica, promovendo melhorias na trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade das argamassas, além de reduzir a permeabilidade e a absorção de água. Sob o enfoque ambiental, seu aproveitamento favorece a economia circular ao reutilizar resíduos industriais e reduzir o consumo de clínquer e as emissões de CO₂. Conclui-se que a cinza volante constitui alternativa técnica e ambientalmente viável para o desenvolvimento de argamassas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Economia Circular. Durabilidade. Resistência Mecânica. Sustentabilidade.

¹ Graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: engbreno99@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-7580-9128>

² Doutora em Engenharia de Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: elzelis@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6778-520X>

³ Graduado em Engenharia Civil, Universidade da Amazônia (UNAMA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: fjrmoreira05@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-1222-3179>

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: thiagonconte@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1288-366X>

⁵ Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: vitoria.seixas@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0716-3876>

⁶ Doutora em Genética e Biologia Molecular, Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: patricia.lima@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1068-2813>

⁷ Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto Federal do Pará (IFPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: rosemary.coutinho@ifpa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3444-1248>

ABSTRACT

The construction industry faces significant challenges associated with the high CO₂ emissions resulting from Portland cement production, making the adoption of more sustainable supplementary cementitious materials essential. In this context, this study aimed to analyze the scientific evidence regarding the use of coal fly ash as a partial replacement for Portland cement in mortar production. This is a qualitative and descriptive narrative review conducted through searches in Google Scholar, SciELO, and specialized technical literature. The theoretical evidence demonstrated that fly ash exhibits high pozzolanic activity, improving the workability, mechanical strength, and durability of mortars, while also reducing permeability and water absorption. From an environmental perspective, its use promotes the principles of the circular economy by recycling industrial waste, reducing clinker consumption, and lowering CO₂ emissions. It is concluded that fly ash represents a technically feasible and environmentally sustainable alternative for the development of more sustainable mortars.

Keywords: Circular Economy. Durability. Mechanical Strength. Sustainability.

RESUMEN

La industria de la construcción enfrenta importantes desafíos relacionados con las elevadas emisiones de CO₂ derivadas de la producción de cemento Portland, lo que hace necesaria la adopción de materiales cementantes suplementarios más sostenibles. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar las evidencias científicas sobre el uso de la ceniza volante de carbón mineral como sustitución parcial del cemento Portland en la producción de morteros. Se trata de una revisión narrativa, de enfoque cualitativo y descriptivo, realizada mediante búsquedas en Google Académico, SciELO y literatura técnica especializada. La evidencia científica demostró que la ceniza volante presenta una elevada actividad puzolánica, favoreciendo mejoras en la trabajabilidad, la resistencia mecánica y la durabilidad de los morteros, además de reducir la permeabilidad y la absorción de agua. Desde la perspectiva ambiental, su aprovechamiento promueve los principios de la economía circular al reutilizar residuos industriales, disminuir el consumo de clínker y reducir las emisiones de CO₂. Se concluye que la ceniza volante constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable para el desarrollo de morteros más sostenibles.

Palabras clave: Economía Circular. Durabilidad. Resistencia Mecánica. Sostenibilidad.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é reconhecido como um dos maiores consumidores de recursos naturais e responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, especialmente devido à produção de cimento Portland. Estudos recentes destacam que a fabricação desse insumo continua sendo

uma das principais fontes de dióxido de carbono (CO₂), contribuindo significativamente para o aquecimento global e para a degradação ambiental (Freitas, 2025).

A busca por alternativas sustentáveis tem impulsionado pesquisas voltadas ao reaproveitamento de resíduos industriais como insumos na produção de materiais cimentícios. Entre esses resíduos, a cinza volante proveniente da combustão do carvão mineral em usinas termoeletricas tem se mostrado promissora, pois além de reduzir a necessidade de clínquer, contribui para a destinação adequada de subprodutos industriais e para a diminuição da poluição atmosférica (Roque *et al.*, 2025).

A cinza volante apresenta atividade pozzolânica, ou seja, capacidade de reagir com hidróxido de cálcio em presença de água, formando compostos com propriedades aglomerantes. Essa característica permite que seja utilizada como substituto parcial do cimento Portland, conferindo às argamassas e concretos propriedades mecânicas e de durabilidade satisfatórias (Brasil, 2021). Além disso, pesquisas recentes demonstram que a substituição parcial do cimento por cinza volante pode melhorar a resistência à compressão e reduzir a absorção de água, desde que sejam respeitados parâmetros de proporção e qualidade do material (Roque *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante é o impacto positivo na gestão de resíduos. A utilização da cinza volante em composições cimentícias contribui para a economia circular, reduzindo a necessidade de aterros industriais e promovendo a valorização de subprodutos antes considerados passivos ambientais. Essa prática está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que se refere à produção e consumo responsáveis e à ação contra a mudança climática (Freitas, 2025).

Dessa forma, o reaproveitamento da cinza volante como substituto parcial do cimento Portland representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente adequada. Além de reduzir a exploração de recursos naturais, promove ganhos de desempenho nas propriedades das argamassas e concretos, consolidando-se como uma estratégia sustentável para o setor da construção civil (Freitas, 2025; Roque *et al.*, 2025; Brasil, 2021).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de natureza qualitativa e descritiva, desenvolvida com o objetivo de analisar as evidências científicas acerca da utilização da cinza volante proveniente da combustão do carvão mineral como substituição

parcial do cimento Portland na fabricação de argamassas.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em bases de dados de acesso aberto, incluindo Google Scholar (Google Acadêmico), Scientific Electronic Library Online (SciELO) e outras fontes científicas pertinentes à temática. Foram utilizados descritores relacionados ao tema, tais como: *cinza volante*, *carvão mineral*, *cimento Portland*, *argamassa*, *materiais cimentícios*, *atividade pozolânica* e *sustentabilidade na construção civil*, empregados de forma isolada e combinada por meio de operadores booleanos.

Foram considerados artigos científicos, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso e normas técnicas que abordassem a aplicação da cinza volante em matrizes cimentícias, com ênfase na substituição parcial do cimento Portland e na avaliação das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade das argamassas produzidas. Como critérios de inclusão, selecionaram-se estudos publicados em português e inglês, que apresentassem resultados experimentais ou revisões relevantes sobre o tema. Foram excluídos trabalhos duplicados, estudos que não abordavam diretamente a aplicação da cinza volante em argamassas e publicações com informações insuficientes para a análise proposta.

Após a seleção dos estudos, realizou-se a leitura integral dos documentos e a extração das informações de interesse, contemplando aspectos relacionados à composição química da cinza volante, atividade pozolânica, teores de substituição do cimento Portland, propriedades mecânicas, trabalhabilidade, absorção de água, durabilidade e benefícios ambientais decorrentes da utilização desse resíduo industrial.

Os dados obtidos foram organizados, comparados e discutidos de forma qualitativa, permitindo identificar as principais contribuições, limitações e tendências observadas na literatura científica sobre o emprego da cinza volante como material cimentício suplementar. A análise fundamentou-se na interpretação crítica das evidências disponíveis, buscando demonstrar o potencial técnico e ambiental desse resíduo como alternativa sustentável para a redução do consumo de cimento Portland e para a valorização de resíduos provenientes de usinas termoeletricas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Construção Civil, Sustentabilidade e Emissões de CO₂

A construção civil é considerada um dos setores mais poluentes do mundo, estima-se que a indústria cimenteira seja responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO₂, sendo que essas emissões decorrem tanto da combustão de combustíveis fósseis utilizados nos fornos quanto da decomposição térmica do calcário durante o processo de calcinação (Mehta; Monteiro, 2022).

A principal fonte dessas emissões é a produção de clínquer, componente essencial do cimento Portland. Segundo a UFSM (2025, p. 12), a produção de uma tonelada de clínquer pode emitir até 800 kg de CO₂, representando um dos maiores desafios ambientais da atualidade. Esse dado evidencia a necessidade de alternativas que reduzam a pegada de carbono do setor.

Estudos internacionais reforçam essa preocupação. Na União Europeia, políticas de descarbonização têm incentivado a substituição parcial do clínquer por materiais suplementares, como cinza volante e escória de alto-forno (EUROPEAN COMMISSION, 2024). Na China, maior produtora mundial de cimento, programas de mitigação têm buscado reduzir em até 30% as emissões do setor até 2030 (Zhang; Li, 2024).

O uso de materiais cimentícios suplementares é uma das principais estratégias para descarbonizar a construção civil, pois reduz o consumo de clínquer, diminui as emissões de CO₂ e reaproveita resíduos industriais e agroindustriais na economia circular. Além disso, essas adições minerais melhoram a microestrutura da matriz, reduzindo a porosidade e aumentando a durabilidade do material contra agentes degradantes, como cloretos, sulfatos e a reação álcali-agregado (Li *et al.*, 2022; Scrivener; John; Gartner, 2023).

Dessa forma, a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares tem sido amplamente incentivada por pesquisadores, organismos internacionais e pela própria indústria da construção como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável.

Nesse contexto, a reutilização de resíduos industriais insere-se nos princípios da economia circular, permitindo reduzir simultaneamente a extração de matérias-primas naturais e o volume de resíduos destinados aos aterros industriais. Segundo Li *et al.* (2022), a substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos constitui uma das tecnologias mais promissoras para

promover a descarbonização da indústria cimenteira, contribuindo para construções mais sustentáveis e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Cinza Volante de Carvão Mineral: Origem, Classificação e Características

Origem da Cinza Volante

A cinza volante de carvão mineral é um subproduto industrial gerado a partir do processo de geração de energia termoeletrica. A sua formação ocorre durante a combustão do carvão mineral finamente pulverizado em caldeiras sob elevadas temperaturas, que variam tipicamente entre 1300°C e 1600°C (Ferreira, 2021).

Durante a queima, a matéria orgânica do carvão é consumida, enquanto os constituintes inorgânicos associados (minerais como argilas, quartzo e pirita) sofrem fusão rápida. Ao serem arrastados pelos gases de exaustão em direção às zonas de menor temperatura da caldeira, esses materiais fundidos sofrem um resfriamento abrupto (*têmpera*). Esse processo resulta na solidificação de partículas predominantemente esféricas e de caráter amorfo, conhecidas como cinza leve ou cinza volante (*fly ash*), as quais são coletadas eletrostaticamente ou por meio de filtros de manga antes da emissão dos gases na atmosfera (Mehta; Monteiro, 2014; Silva *et al.*, 2024).

Classificação das Cinzas Volantes

A classificação das cinzas volantes como adições minerais ativas baseia-se em suas propriedades químicas e físicas, sendo regulamentada por diretrizes nacionais e internacionais. No Brasil, a ABNT NBR 12653 categoriza os materiais pozolânicos em três classes: a Classe N, que abrange pozolanas naturais ou calcinações; a Classe C, referente às cinzas volantes de usinas termelétricas a carvão mineral que cumprem os requisitos normativos; e a Classe E, destinada a materiais com especificações divergentes das anteriores.

Internacionalmente, a norma ASTM C618 classifica as cinzas com base no teor de cálcio e na concentração de óxidos reativos, dividindo-as em duas classes principais:

- Classe F: originada de carvões de alto grau de carbonização (antracito e betuminoso), possui baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) e exige uma soma de óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de no mínimo 70%;
- Classe C: derivada de carvões sub-betuminosos ou lignitos, apresenta teor de cálcio elevado ($\text{CaO} > 10\%$) e requer soma mínima de óxidos de 50%.

Características Químicas e Mineralógicas

Quimicamente, a cinza volante é composta majoritariamente por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A reatividade desses óxidos com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), gerado durante a hidratação do cimento Portland, confere à cinza a sua atividade pozolânica, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto responsável pelo ganho de resistência mecânica e durabilidade do concreto a idades avançadas (Camarini, 2025).

Do ponto de vista mineralógico, devido ao resfriamento rápido, a maior porção da cinza volante é composta por uma fase vítrea (amorfa). No entanto, fases cristalinas inertes ou de baixa reatividade — como a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), o quartzo (SiO_2), a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3) — também estão frequentemente presentes em proporções variáveis dependendo da origem do carvão mineral utilizado (Silva *et al.*, 2024).

Características Físicas e Morfológicas

Fisicamente, a cinza volante destaca-se por sua morfologia predominantemente esférica, o que gera o chamado "efeito rolamento" (*ball-bearing effect*) em misturas frescas de concreto e argamassa. Esse formato reduz o atrito interno do sistema, diminuindo a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade (Witzke, 2017).

A sua granulometria é fina, com a grande maioria das partículas apresentando diâmetros equivalentes inferiores a $45 \mu\text{m}$. A massa específica da cinza volante varia tipicamente entre $1,9 \text{ g/cm}^3$ e $2,4 \text{ g/cm}^3$, valor inferior ao do cimento Portland convencional ($\approx 3,15 \text{ g/cm}^3$). Ademais, podem ocorrer estruturas morfológicas específicas como cenosferas (esferas ocas de silicato que flutuam na água e conferem leveza) e plenosferas (esferas maiores que contêm microesferas em seu interior) (Ferreira, 2021).

Figura 1

Principais características físico-químicas do cinza volante de acordo com a literatura científica

Características	Descrição	Fonte
Composição química	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO	LI <i>et al.</i> (2022)
Estrutura	Predominantemente amorfa	ASTM (2021)
Morfologia	Partículas esféricas finas	ZHANG; WANG (2023)
Atividade pozolânica	Reação com Ca(OH) ₂ formando C-S-H	SILVEIRA <i>et al.</i> (2025)

Fonte: Autores (2026)

Atividade Pozolânica da Cinza Volante

A atividade pozolânica é o principal mecanismo que confere à cinza volante relevância na construção civil. Essa reação ocorre entre os compostos de sílica e alumina presentes na cinza e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando o gel C-S-H, responsável pela resistência mecânica. Silva e Alves (2025) destacam que quanto maior a finura da cinza volante, maior será sua reatividade, resultando em concretos mais resistentes e duráveis.

Essa atividade pozolânica da cinza volante é considerada elevada, especialmente em cinzas do tipo F, que apresentam baixo teor de cálcio e alta concentração de sílica reativa. Essa propriedade permite a formação de compostos cimentícios secundários (C-S-H), responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e da durabilidade das argamassas (Freitas, 2025).

De acordo com Roque *et al.* (2025), substituições de 20% a 30% do cimento Portland por cinza volante resultaram em aumento de até 25% na resistência à compressão aos 28 dias, além de redução significativa na absorção de água.

Influência da Cinza Volante nas Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

A incorporação da cinza volante promove alterações significativas nas propriedades reológicas das argamassas no estado fresco, sendo amplamente reconhecida como um dos materiais cimentícios suplementares capazes de melhorar a trabalhabilidade sem aumentar a demanda hídrica da mistura. Esse comportamento decorre principalmente da morfologia esférica e da superfície lisa das partículas da cinza volante, que favorecem o denominado ball-bearing effect. Esse mecanismo reduz o atrito entre as partículas sólidas, proporcionando maior fluidez, melhor dispersão dos constituintes e maior facilidade durante as etapas de mistura, transporte e aplicação da argamassa (Singh; Gupta; Siddique, 2023; Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

A redução da quantidade de água necessária para atingir determinada consistência representa uma importante vantagem tecnológica, pois possibilita a diminuição da relação água/cimento, favorecendo a formação de uma matriz cimentícia mais densa após a hidratação. Consequentemente, ocorre redução da porosidade capilar e melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do material endurecido. Revisões sistemáticas recentes demonstram que esses benefícios são mais expressivos quando a substituição parcial do cimento ocorre em teores moderados e quando a cinza volante apresenta elevada finura e alto teor de fases amorfas reativas (Singh *et al.*, 2024; Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Outro efeito frequentemente observado refere-se ao aumento do tempo de pega das argamassas. A menor velocidade das reações pozolânicas em comparação à hidratação do cimento Portland reduz a taxa inicial de liberação de calor, aspecto particularmente vantajoso em concretagens de grande volume, nas quais a mitigação das tensões térmicas reduz o risco de fissuração precoce. Entretanto, em aplicações que exigem elevada resistência nas primeiras idades, o retardamento da hidratação pode representar uma limitação, exigindo ajustes na dosagem ou a utilização de adições minerais e aditivos químicos aceleradores (Kumar; Singh; Siddique, 2020; Singh *et al.*, 2024).

Embora os benefícios da cinza volante sobre a trabalhabilidade sejam amplamente reconhecidos, diversos estudos ressaltam que seu desempenho depende diretamente da composição química, da distribuição granulométrica, do teor de carbono não queimado e das condições de processamento do resíduo. Dessa forma, a caracterização físico-química da cinza volante constitui etapa indispensável para assegurar a uniformidade das propriedades das argamassas produzidas em escala industrial, reduzindo a variabilidade dos resultados e aumentando a confiabilidade do material (Hedegaard *et al.*, 2024).

Influência da Cinza Volante nas Propriedades Mecânicas

Com o avanço da cura, entretanto, a sílica e a alumina amorfas presentes na cinza volante reagem progressivamente com o Ca(OH)_2 , formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais, responsáveis pelo refinamento da microestrutura cimentícia. Essa transformação reduz significativamente a porosidade da matriz, aumenta a densidade dos produtos de hidratação e promove ganhos expressivos de resistência à compressão em idades superiores a 56 e 90 dias,

podendo superar o desempenho de misturas convencionais dependendo do teor de substituição empregado (Singh *et al.*, 2024; Kumar; Singh; Siddique, 2020).

Além da resistência à compressão, pesquisas recentes evidenciam melhorias na resistência à tração na flexão, no módulo de elasticidade e na tenacidade das argamassas quando são utilizados percentuais otimizados de cinza volante. Esses ganhos decorrem não apenas da atividade pozolânica, mas também do efeito filler, que promove melhor empacotamento das partículas e reduz a presença de vazios na matriz endurecida. Estudos que associaram cinza volante e nano-metacaulim demonstraram incrementos ainda mais expressivos nas propriedades mecânicas devido ao efeito sinérgico entre as adições minerais, acelerando a nucleação dos produtos de hidratação e proporcionando microestrutura mais homogênea (Singh; Gupta; Siddique, 2023).

Todavia, a literatura demonstra que substituições muito elevadas podem comprometer o desenvolvimento das resistências iniciais, principalmente quando superiores a 50% da massa de cimento. Assim, a definição do teor ótimo de substituição deve considerar simultaneamente as propriedades mecânicas, a durabilidade, o desempenho ambiental e as condições específicas de utilização da argamassa, reforçando a importância de estudos experimentais voltados à otimização das dosagens (Singh *et al.*, 2024; Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Com o avanço da cura, entretanto, a sílica e a alumina amorfas presentes na cinza volante reagem progressivamente com o Ca(OH)_2 , formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais, responsáveis pelo refinamento da microestrutura cimentícia. Essa transformação reduz significativamente a porosidade da matriz, aumenta a densidade dos produtos de hidratação e promove ganhos expressivos de resistência à compressão em idades superiores a 56 e 90 dias, podendo superar o desempenho de misturas convencionais dependendo do teor de substituição empregado (Singh *et al.*, 2024; Kumar; Singh; Siddique, 2020).

Além da resistência à compressão, pesquisas recentes evidenciam melhorias na resistência à tração na flexão, no módulo de elasticidade e na tenacidade das argamassas quando são utilizados percentuais otimizados de cinza volante. Esses ganhos decorrem não apenas da atividade pozolânica, mas também do efeito filler, que promove melhor empacotamento das partículas e reduz a presença de vazios na matriz endurecida. Estudos que associaram cinza volante e nano-metacaulim demonstraram incrementos ainda mais expressivos nas propriedades mecânicas devido ao efeito sinérgico entre as adições minerais, acelerando a nucleação dos

produtos de hidratação e proporcionando microestrutura mais homogênea (Singh; Gupta; Siddique, 2023).

Todavia, a literatura demonstra que substituições muito elevadas podem comprometer o desenvolvimento das resistências iniciais, principalmente quando superiores a 50% da massa de cimento. Assim, a definição do teor ótimo de substituição deve considerar simultaneamente as propriedades mecânicas, a durabilidade, o desempenho ambiental e as condições específicas de utilização da argamassa, reforçando a importância de estudos experimentais voltados à otimização das dosagens (Singh *et al.*, 2024; Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Durabilidade das Argamassas Contendo Cinza Volante

A utilização da cinza volante como material cimentício suplementar promove melhorias significativas na durabilidade das argamassas devido às reações pozolânicas, nas quais a sílica e a alumina amorfas reagem com o hidróxido de cálcio, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais. Esse processo refina a microestrutura da matriz cimentícia, reduzindo a porosidade e a conectividade dos poros, o que limita a penetração de agentes agressivos e aumenta a vida útil das estruturas (Juenger; Snellings; Bernal, 2019; Li *et al.*, 2022).

Como consequência, observa-se redução da absorção de água, da permeabilidade e da difusão de íons cloreto, além de maior resistência ao ataque por sulfatos. Essas propriedades retardam o início da corrosão das armaduras e minimizam processos de degradação química, especialmente em ambientes agressivos. Embora elevados teores de substituição possam favorecer maior carbonatação nas primeiras idades, esse efeito pode ser reduzido por meio de dosagem adequada e cura eficiente, garantindo desempenho satisfatório ao longo da vida útil da estrutura (Li *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2023).

Benefícios Ambientais e Economia Circular

A incorporação da cinza volante na produção de argamassas representa uma importante estratégia de economia circular, ao transformar um resíduo industrial em matéria-prima para a construção civil. Sua utilização reduz o consumo de clínquer, diminui a disposição de resíduos em aterros e contribui para a mitigação das emissões de CO₂ associadas à fabricação do cimento Portland, setor responsável por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa

(Scrivener; John; Gartner, 2018; Li *et al.*, 2022).

Além dos benefícios ambientais, o uso da cinza volante pode reduzir custos de produção e manutenção das estruturas, devido ao aumento da durabilidade dos materiais. Dessa forma, sua aplicação está alinhada aos princípios da construção sustentável e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente aqueles relacionados à inovação, infraestrutura resiliente e produção e consumo responsáveis (Rahman *et al.*, 2023).

Limitações, Desafios e Perspectivas Futuras

Apesar dos benefícios, a aplicação da cinza volante ainda enfrenta desafios relacionados à variabilidade de sua composição química e mineralógica, decorrente das diferentes condições de combustão e da origem do carvão mineral. Essa heterogeneidade influencia sua atividade pozolânica e reforça a necessidade de rigoroso controle de qualidade antes de sua utilização (Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Outro desafio refere-se à redução da resistência mecânica nas primeiras idades quando elevados teores de substituição são empregados. Como perspectiva, pesquisas recentes têm investigado o uso combinado da cinza volante com nanomateriais, sílica ativa e escória de alto-forno para acelerar as reações pozolânicas e otimizar simultaneamente resistência, durabilidade e sustentabilidade. Além disso, a redução da geração de cinza volante decorrente da transição energética reforça a necessidade de desenvolver novos materiais cimentícios suplementares provenientes de resíduos industriais e agroindustriais (Li *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2023).

CONCLUSÃO

A substituição parcial do cimento Portland por cinza volante de carvão mineral mostra-se uma solução viável para melhorar propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas. Estudos apontam ganhos em resistência à compressão e tração, redução da absorção de água e maior densidade da matriz cimentícia, favorecendo o desempenho estrutural.

Do ponto de vista ambiental, essa prática contribui para a mitigação das emissões de CO₂, reduz a dependência do clínquer e promove a valorização de resíduos industriais. Assim, insere-se nos princípios da economia circular e fortalece estratégias de sustentabilidade na construção civil.

Apesar dos benefícios, desafios como a variabilidade composicional da cinza e a menor resistência inicial em altas taxas de substituição exigem controle rigoroso de qualidade e otimização das dosagens. Ainda assim, o uso da cinza volante consolida-se como alternativa promissora para a descarbonização do setor e alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS

- ASTM. (2021). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (C618)*. ASTM International.
- Brasil. (2021). Avaliação das propriedades de argamassas cimentícias com adição de resíduos da geração termoeletrica. *Matéria (Rio J.)*, 26(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1300>
- Freitas, L. F. C., & Amaral, A. K. G. (2025). Emprego da cinza volante em materiais de construção: Uma abordagem sustentável. *Revista Fisioterapia & Terapia Ocupacional*, 29(152), 1–15. <https://doi.org/10.69849/revistaft/cs10202511292230>
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257–273.
- Kumar, P., Singh, B., & Siddique, R. (2020). Performance of high-volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 255.
- Li, Y., Zhang, H., & Wang, J. (2022). Chemical composition and pozzolanic activity of coal fly ash in cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 325.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais* (4. ed.). IBRACON.
- Novakem. (2024). *Concreto de baixo carbono: Inovação na construção*. Novakem.
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., & Januarti Jaya, E. (2017). Chemical and physical characterization of fly ash as geopolymer material. *MATEC Web of Conferences*.
- Roque, J. O. T., Baggio, T. F., Borges, P. M., Silva, S. R., & Andrade, J. J. O. (2025). Estudo das propriedades mecânicas em concretos com agregado reciclado e cinza volante. *26º Salão de Iniciação Científica da PUCRS*.
- Silva, D. A., & Alves, C. R. (2025). *Efeitos da adição de cinza volante e fibras de vidro na composição de um concreto sustentável*. Instituto Federal de Santa Catarina.
- Silveira, M. V., Oliveira, C., & Pereira, J. (2025). Efeitos da cinza volante e resíduo de bauxita na hidratação do cimento Portland. *Matéria (Rio J.)*, 30(2).

- Singh, A., Gupta, R., & Siddique, R. (2023). Mechanical strength and durability analysis of mortars prepared with fly ash and nano-metakaolin. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01796.
- Singh, M., *et al.* (2024). Strength and durability properties of high-volume fly ash binders: A systematic review. *CivilEng*, 5(2), 435–460.
- UFSM – Universidade Federal de Santa Maria. (2025). *Projeto busca reduzir emissão de CO₂ em concretos a partir de cinza volante de termelétrica*. PROINOVA.
- Vieira, A. P. (2025). Avaliação da substituição de agregado miúdo por cinza pesada em argamassas de revestimento. *Revista Engenharia Civil Contemporânea*, 12(1).
- Zhang, L., & Wang, Y. (2023). Morphology and performance of fly ash in cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 412.