v7.n8.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM ARGAMASSAS: DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL

SUGARCANE BAGASSE ASH AS A SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL IN MORTARS: MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PERFORMANCE

CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR COMO MATERIAL CEMENTICIO SUPLEMENTARIO EN MORTEROS: DESEMPEÑO MECÁNICO Y MICROESTRUCTURAL

Maria Eduarda Silva Arantes[1], Bacus de Oliveira Nahime[2], Michell Macedo Alves[3], Idalci Cruvinel dos Reis[4], Elton Carvalho Lima[5], Jorge Luís Akasaki[6]

e788714

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i8.8714

PUBLICADO: 08/2026

RESUMO

Este estudo avaliou a viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), resíduo gerado pela queima em caldeiras de indústrias sucroalcooleiras para cogeração de energia, como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. Foram utilizadas cinzas provenientes de duas indústrias do estado de Goiás (CRV e CJT), submetidas a peneiramento nas granulometrias de 300 e 150 µm e caracterizadas por massa específica, distribuição granulométrica e difração de raios X (DRX). As argamassas, produzidas com substituição de 10% do cimento por CBCA, foram avaliadas quanto à densidade de compactação, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. A composição de melhor desempenho foi submetida aos ensaios de índice de atividade pozolânica, fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TG/DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A cinza CJT apresentou maior fração amorfa, refletindo em melhor desempenho da argamassa CJT150, que atingiu incremento de aproximadamente 12% na resistência à compressão aos 56 dias em relação à referência. Essa composição também apresentou redução de cerca de 60% na absorção capilar, indicando refinamento da estrutura porosa, corroborado pelas imagens de MEV, que evidenciaram matriz mais compacta e homogênea. Os resultados demonstram que o desempenho das argamassas depende da origem e da granulometria da cinza, evidenciando o potencial da CBCA como material cimentício suplementar e ressaltando a importância da caracterização da fração amorfa para a seleção de materiais com maior reatividade pozolânica.

PALAVRAS-CHAVE: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Materiais cimentícios suplementares. Atividade pozolânica.

ABSTRACT

This study evaluated the feasibility of using sugarcane bagasse ash (CBCA)—a residue generated by burning in boilers at sugar and ethanol plants for energy cogeneration—as a partial substitute for Portland cement in mortars.

[1] Universidade de Rio Verde (UniRV), graduanda em Engenheira Civil pela Universidade de Rio Verde (UniRV).
[2] Instituto Federal Goiano (IF Goiano), doutor em Ciência dos Materiais pela UNESP e professor titular com atuação em Ciência dos Materiais e Engenharia Civil.
[3] Instituto Federal Goiano (IF Goiano), doutor em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo, USP e professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - PPGEAS (Mestrado Profissional).
[4] Instituto Federal Goiano (IF Goiano), doutor em Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP e professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - PPGEAS (Mestrado Profissional).
[5] Universidade Federal do Tocantins, doutor em Ciência dos Materiais pela UNESP e professor pesquisador na área de Física de Materiais e Materiais para Construção Civil.
[6] Professor Titular da UNESP, graduado em Engenharia Civil pela PUCCAMP, mestre e doutor pela USP, com pós-doutorados pela Universidad Politècnica de València (Espanha) e Livre-Docência pela UNESP.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Ash from two mills in the state of Goiás (CRV and CJT) was used; it was sieved to particle sizes of 300 and 150 µm and characterized by specific gravity, particle size distribution, and X-ray diffraction (XRD). The mortars, produced by replacing 10% of the cement with CBCA, were evaluated for compaction density, compressive strength, and capillary water absorption. The best-performing mixture was subjected to tests for pozzolanic activity index, X-ray fluorescence (XRF), thermogravimetric analysis (TG/DSC), and scanning electron microscopy (SEM). CJT ash exhibited a higher amorphous fraction, resulting in better performance of the CJT150 mortar, which achieved an approximately 12% increase in compressive strength at 56 days compared to the reference. This composition also showed a reduction of about 60% in capillary absorption, indicating a refinement of the porous structure, corroborated by SEM images, which revealed a more compact and homogeneous matrix. The results demonstrate that the performance of mortars depends on the origin and particle size distribution of the ash, highlighting the potential of CBCA as a supplementary cementitious material and underscoring the importance of characterizing the amorphous fraction for selecting materials with higher pozzolanic reactivity.

KEYWORDS: *Sugarcane bagasse ash. Supplementary cementitious materials. Pozzolanic activity.*

RESUMEN
Este estudio evaluó la viabilidad del uso de cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA), residuo generado por la quema en calderas de industrias azucareras y alcoholeras para cogeneración de energía, como sustituto parcial del cemento Portland en morteros. Se utilizaron cenizas de dos industrias del estado de Goiás (CRV y CJT), tamizadas a 300 y 150 µm y caracterizadas mediante masa específica, distribución granulométrica y difracción de rayos X (DRX). Los morteros, con sustitución del 10 % del cemento por CBCA, fueron evaluados en cuanto a densidad, resistencia a la compresión y absorción de agua por capilaridad. La mezcla de mejor desempeño fue sometida a ensayos de índice de actividad puzolánica, fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico (TG/DSC) y microscopía electrónica de barrido (MEV). La ceniza CJT presentó mayor fracción amorfa, lo que favoreció el desempeño del mortero CJT150, que alcanzó un incremento aproximado del 12 % en la resistencia a la compresión a los 56 días respecto a la referencia. Además, presentó una reducción cercana al 60 % en la absorción capilar, indicando un refinamiento de la estructura porosa, corroborado por las imágenes de MEV. Los resultados demuestran que el desempeño de los morteros depende del origen y la granulometría de las cenizas, destacando el potencial de la CBCA como material cementicio suplementario y la importancia de la fracción amorfa para una mayor reactividad puzolánica.

PALABRAS CLAVE*: Ceniza de bagazo de caña de azúcar. Materiales cementosos suplementarios. Actividad puzolánica.*

1. INTRODUÇÃO

A produção do cimento Portland exige grande mobilização industrial, começando pela extração mineral das matérias-primas, que gera enormes impactos ambientais. Estima-se que a indústria da construção civil seja responsável por mais de 30% da extração de recursos minerais. Além disso, a produção do clínquer, que é o principal componente do cimento, exige um alto consumo de energia, já que os fornos funcionam a temperaturas entre 1450 e 1600 °C. Por conta disso, a indústria cimenteira se torna uma das maiores responsáveis pela emissão de dióxido de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

carbono (CO_2), avalia-se que a indústria do cimento contribua com aproximadamente 8 % das emissões, aumentando a urgência de pesquisas para criar materiais alternativos e mais sustentáveis que possam substituir parcialmente o cimento Portland (Benachio *et al.*, 2020; Ainomugisha *et al.*, 2024; Alvarenga e Cordeiro, 2024; Serrone e Moretti, 2023).

Nesse sentido, diversos estudos têm investigado a incorporação de materiais cimentícios suplementares e resíduos agroindustriais em composições cimentícias, com o objetivo de substituir parcialmente o cimento Portland, reduzir o consumo de clínquer e mitigar os impactos ambientais associados à sua produção (Cupim *et al.*, 2025). Entre esses materiais, destaca-se a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). A cana-de-açúcar representa uma das culturas mais relevantes no agronegócio global, responsável pela produção de etanol e açúcar, sendo amplamente cultivada em diversos países, especialmente no Brasil, Índia, Tailândia e China, que se destacam entre os maiores produtores globais. Na indústria, o bagaço produzido é comumente empregado como biomassa para a geração de energia térmica nas usinas sucroenergéticas. Após a queima, resulta a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, um resíduo sólido fino que, mesmo com seu potencial para reaproveitamento, ainda possui uma destinação restrita em vários segmentos industriais (Torres de Sande *et al.*, 2022).

A safra brasileira de cana 2025/2026 teve uma produção aproximada de 673 milhões de toneladas, e somente a região Centro-Sul (responsável por cerca de 90% da produção nacional) encerrou a safra com produção aproximada de 616 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2026). O bagaço representa, em média, 25% da massa da cana moída (GURGEL *et al.*, 2024), assim, tem-se aproximadamente 154 milhões de toneladas de bagaço para a região Centro-Sul e, para o Brasil inteiro, estima-se 168 milhões de toneladas de bagaço.

A combustão desse material para cogeração de energia gera quantidades significativas de cinza residual. De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo e o Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP/CIESP, 2001), a produção de cinzas corresponde a aproximadamente 2,4% da massa do bagaço queimado. Com base nessa estimativa, a geração potencial de cinza do bagaço de cana-de-açúcar seria da ordem de 3,7 milhões de toneladas na região Centro-Sul e 4,0 milhões de toneladas no Brasil. Ressalta-se, entretanto, que esse percentual deve ser interpretado com cautela, uma vez que avanços tecnológicos e mudanças operacionais ocorridas nas últimas décadas podem influenciar a quantidade de cinzas efetivamente geradas.

A elevada geração de cinzas decorrente da queima do bagaço de cana-de-açúcar representa um desafio ambiental para o setor sucroenergético, especialmente em relação ao

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

armazenamento e à disposição final desse resíduo. A Figura 1 ilustra o acúmulo de cinzas em área de descarte de uma usina sucroenergética, evidenciando o volume expressivo de material gerado.

Figura 1. Área de disposição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)



Fonte: Acervo da autora (2025)

Devido, em especial, ao seu elevado teor de dióxido de silício (SiO_2), a CBCA apresenta considerável potencial de emprego como material pozolânico (Alvarenga e Cordeiro, 2024). A presença deste composto é atribuída à capacidade da cana-de-açúcar de absorver sílica do solo durante seu desenvolvimento, integrando-a nos tecidos vegetais, como parte da sua estrutura fisiológica. Com a queima do bagaço, a matéria orgânica é consumida e os compostos minerais remanescentes são concentrados nas cinzas. Caso esteja presente na fase amorfa e associada a uma adequada finura, a sílica pode também reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, formando compostos cimentícios secundários que ocasionam o refino microestrutural e a melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade das matrizes cimentícias (Abdalla *et al.*, 2024; Kirthiga e Elavenil, 2023).

Os materiais pozolânicos, ao serem incorporados em argamassas e concretos, têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] ou portlandita, favorecendo a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal responsável pela resistência mecânica dos compósitos cimentícios. Além disso, em virtude da sua alta finura das partículas, a CBCA pode promover o efeito fíler, preenchendo vazios e favorecendo a densificação da matriz cimentícia (Yaseen, 2024). Entretanto, os materiais alternativos na indústria do cimento necessitam de uma caracterização físico-química rigorosa e de uma avaliação de desempenho metódica, pois são diversos os fatores que podem influenciar as propriedades finais das cinzas. Aspectos relacionados às características do solo, o uso de fertilizantes e defensivos agrícolas,

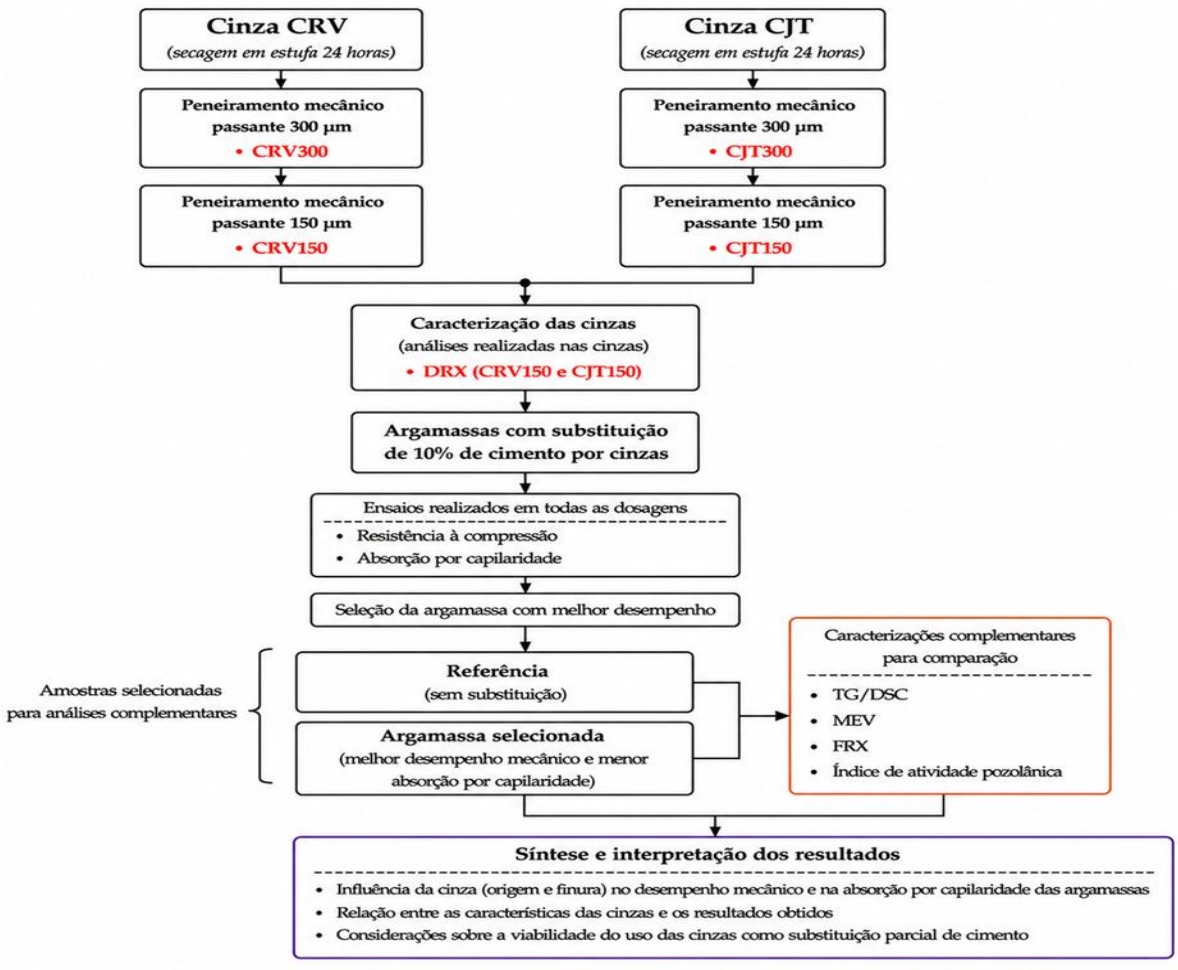
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

condições de cultivo, método de colheita, temperatura de queima nas caldeiras e sistemas de coleta das partículas podem alterar significativamente a composição química, mineralógica e granulométrica da CBCA, impactando diretamente seu potencial pozolânico (Ainomugisha *et al.*, 2024).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 2 apresenta, de forma resumida, as etapas do programa experimental desenvolvido neste estudo.

Figura 2. Fluxograma que descreve os procedimentos metodológicos utilizados no estudo



Fonte: Próprio Autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Inicialmente, foram realizadas a coleta, secagem e classificação granulométrica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), seguidas pelos ensaios de caracterização física e mineralógica. Posteriormente, foram produzidas as argamassas de referência e aquelas contendo substituição parcial do cimento pelas cinzas, sendo avaliadas quanto à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade. Por fim, foram realizados ensaios complementares de caracterização microestrutural, visando correlacionar as propriedades das cinzas e das argamassas com o desempenho observado experimentalmente.

2.1. Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA)

Foram coletadas duas amostras de CBCA, provenientes de diferentes regiões produtoras. Para fins de identificação ao longo do estudo, as amostras foram denominadas CRV e CJT.

As cinzas provenientes da unidade de produção de etanol de cana-de-açúcar localizada na cidade de Rio Verde (CRV), Goiás, Brasil, foram coletadas com acompanhamento de um funcionário da empresa. O material foi retirado pelo Autor 2 a partir de montes de cinzas previamente armazenadas a céu aberto nas dependências da unidade industrial, oriundas de um lavador de gases tipo spray, por via úmida, equipado com bicos aspersores geradores de névoa, responsável pela remoção de poluentes gasosos, material particulado e fuligem presentes no fluxo de gases.

De forma análoga, as cinzas provenientes da unidade de produção de etanol e açúcar localizada na cidade de Jataí (CJT), Goiás, Brasil, foram coletadas com acompanhamento de um funcionário da empresa. O material foi retirado pela Autora 1 a partir de montes de cinzas previamente armazenadas a céu aberto nas dependências da unidade industrial, oriundas do sistema de controle de emissões atmosféricas da usina, no qual as partículas sólidas geradas durante a combustão são capturadas pelo contato entre o fluxo gasoso e o líquido de lavagem, promovendo a retenção do material particulado.

2.2. Materiais constituintes das argamassas

O cimento utilizado na produção das argamassas foi adquirido no comércio local em embalagens de 40 kg, em conformidade com a ABNT NBR 16697 (2018), foram empregados cimentos Portland comerciais de classes distintas. As argamassas REF e CJT150 foram produzidas com cimento Portland CP II do fabricante Goiás Estrutura, enquanto as argamassas CRV150, CRV300 e CJT300 foram produzidas com cimento Portland CP IV do fabricante Ciplan Extra Forte.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora tenham sido utilizados cimentos Portland de diferentes classes durante a execução experimental, ambos atendiam às exigências normativas para produção das argamassas e não constituíram uma variável de estudo previamente estabelecida. Assim, os resultados foram analisados com foco na influência das características das cinzas, especialmente sua origem e granulometria, reconhecendo-se que diferenças inerentes aos cimentos empregados podem ter contribuído para parte da variabilidade observada.

Adicionalmente, para a realização do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP), foi utilizado um cimento Portland CP II-F-32, em conformidade com a ABNT NBR 16697 (2018), conforme estabelecido pela ABNT NBR 5752 (2014).

Como agregado miúdo, empregou-se areia natural quartzosa de rio proveniente de Rio Verde, Goiás, com diâmetro máximo característico de 2,36 mm e módulo de finura de 0,72.

Para ajuste da consistência das misturas, utilizou-se o aditivo superplastificante de pega normal Plastol 5030, fabricado pela Viapol, à base de policarboxilatos, com massa específica de 1,06 g/cm³ e pH igual a 5,4, conforme informações do fabricante e requisitos da ABNT NBR 11768-1 (2019). Segundo o fabricante, a dosagem do aditivo pode ser ajustada de acordo com os requisitos específicos de fluidez, manutenção da trabalhabilidade e redução do consumo de cimento, possibilitando sua aplicação em diferentes sistemas cimentícios.

2.3. Produção e caracterização de amostras de CBCA

Nas unidades industriais localizadas nos municípios de Rio Verde e Jataí, não havia sistema de monitoramento direto da temperatura interna das fornalhas durante o processo de combustão do bagaço de cana-de-açúcar. O controle operacional era realizado por meio da medição da temperatura dos gases na saída do superaquecedor, parâmetro utilizado como referência indireta para estimativa da temperatura interna de combustão.

Durante o período de coleta das cinzas na unidade de Rio Verde, registrou-se temperatura aproximada de 330 °C nos gases de saída da caldeira. Segundo informações fornecidas pelo responsável técnico da unidade, a temperatura interna da fornalha operava, estimativamente, entre 1000 °C e 1200 °C.

Na unidade de Jataí, o monitoramento operacional ocorreu de maneira semelhante, porém com registro de temperatura aproximada de 470 °C nos gases de exaustão. Apesar da diferença observada nas temperaturas dos gases, a temperatura estimada no interior da fornalha também se encontrava na faixa de 1000 °C a 1200 °C, conforme informado pelo responsável técnico da unidade. Essa diferença nos valores registrados nos gases de exaustão pode estar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

associada à capacidade volumétrica e às condições operacionais distintas entre as unidades industriais avaliadas.

Figura 3. Cinzas CRV (a) e CJT (b) coletadas diretamente das indústrias sucroalcooleiras antes da secagem em estufa



Fonte: Acervo da Autora (2025)

Após a coleta, as duas amostras de CBCA foram submetidas ao mesmo procedimento experimental, sem aplicação de processos de beneficiamento, moagem ou alteração física adicional, visando preservar as características originais do material. Inicialmente, as cinzas foram secas em estufa de secagem e esterilização modelo SL-100 (Solab) a 105 °C por 24 horas para remoção da umidade residual. Em seguida, procedeu-se à classificação granulométrica em agitador mecânico de peneiras (SOLOTEST) durante 5 minutos, obtendo-se frações granulométricas com partículas passantes em peneiras de 300 µm e 150 µm, identificadas pelas nomenclaturas CRV150, CRV300, CJT150 e CJT300.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Cinza CRV150 (a) e CJT150 (b)



Fonte: Acervo da Autora (2026)

A distribuição granulométrica da cinza foi determinada por peneiramento mecânico, mediante a utilização de uma série de peneiras normatizadas, conforme a ABNT NBR 17054 (2022), com aberturas de malha de 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm, com determinação das massas retidas em cada malha e construção da curva granulométrica.

A massa específica das cinzas foi determinada pelo método do frasco de Le Chatelier, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16605:2017. Para realização do ensaio, utilizou-se querosene como líquido não reagente, ao invés de água, visando evitar possíveis interações químicas com o material analisado.

A caracterização mineralógica das cinzas foi realizada por difração de raios X (DRX). Inicialmente, as amostras foram submetidas à moagem em almofariz de ágata até obtenção de material pulverulento homogêneo. As análises foram conduzidas em um difratômetro Bruker D8 Discover, utilizando radiação Cu-Kα proveniente de tubo com ânodo de cobre, operando a 40 kV e 40 mA. As medidas foram realizadas na configuração Bragg-Brentano (θ-θ), com detector unidimensional Lynxeye® XE-T, em intervalo de varredura de 10° a 70° (2θ), passo de 0,02° e tempo de aquisição de 1 segundo por passo. Durante os ensaios, as amostras foram mantidas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

sob rotação de 15 rpm, visando melhorar a representatividade da análise e minimizar efeitos de orientação preferencial.

2.4. Produção e caracterização de argamassas – propriedades mecânicas, absorção por capilaridade e microestrutura

Foram preparadas cinco argamassas para avaliar a resistência à compressão ao longo do tempo e a absorção de água por capilaridade, sendo uma utilizada como referência (REF) e quatro produzidas com substituição de 10% do cimento pelas amostras de CBCA (CRV150, CRV300, CJT150 e CJT300). Para facilitar a identificação dos traços ao longo do estudo, as argamassas receberam a mesma nomenclatura das respectivas cinzas incorporadas em sua composição.

As relações água/ligante e areia/ligante foram 0,50 e 3,0 respectivamente. Os teores de superplastificante foram utilizados para manter a consistência da argamassa entre 250 e 270 mm (ABNT NBR 13276, 2016). A manutenção de um índice de consistência constante é fundamental para a comparação das propriedades das argamassas, uma vez que a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar tende a reduzir a trabalhabilidade das misturas à medida que seu teor aumenta, comportamento verificado também por Cupim *et al.* (2025) e Chi (2012).

Tabela 1. Proporções das argamassas utilizadas nos ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade e caracterização microestrutural

Proporções da mistura	Argamassa referência	Argamassas com substituição de 10% de cimento Portland por cinzas			
		CRV150	CRV300	CJT150	CJT300
Cimento (g)	625	562,5	562,5	562,5	562,5
Cinza (g)	-	62,5	62,5	62,5	62,5
Areia (g)	1875	1875	1875	1875	1875
Água (g)	312,50	312,50	312,50	312,50	312,50
Aditivo (g)	2,50	6,875	5,625	5,625	8,125
a/c	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Fonte: Próprio Autor (2026)

A resistência à compressão das argamassas foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7215:2019. Após a mistura dos materiais, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo confeccionadas três amostras para cada dosagem e idade de ensaio. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em cura submersa em água até as idades de 7, 28 e 56 dias

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Teor de superplastificante e espalhamento na mesa de fluxo das argamassas

Argamassas	Teor de superplastificante (%) [a]	Espalhamento da mesa de fluxo (mm)
REF	0,4	250
CRV150	1,1	260
CRV300	0,9	259
CJT150	0,9	257
CJT300	1,3	250

[a] Conteúdo em relação à massa do aglutinante

Fonte: Próprio Autor (2026)

Os ensaios de compressão axial foram realizados em prensa hidráulica FORTEST, modelo FT-02, com capacidade máxima de 100 toneladas. A carga foi aplicada até a ruptura dos corpos de prova, sendo a resistência à compressão calculada a partir da razão entre a carga máxima registrada e a área da seção transversal do corpo de prova. Para cada condição experimental, foi adotada a resistência média dos três corpos de prova ensaiados.

Os resultados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) de fator único, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), visando verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resistências médias das argamassas avaliadas em cada idade de cura. Foram considerados estatisticamente diferentes os grupos que apresentaram valor-P inferior a 0,05.

A absorção de água por capilaridade das argamassas foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 9779 (2013), aos 28 e 56 dias de idade, utilizando-se três corpos de prova para cada composição analisada. O ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento das matrizes cimentícias frente ao transporte de água por ação capilar, parâmetro relacionado à porosidade, à conectividade dos poros e à capacidade de absorção de fluidos do material.

Para otimização, com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, foi selecionada a dosagem que apresentou o melhor desempenho para a realização das análises complementares de caracterização. Dessa forma, a mistura selecionada e a argamassa de referência foram submetidas aos ensaios de análise térmica simultânea (TG/DSC), fluorescência de raios X (FRX), e microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de investigar as alterações microestruturais e composicionais promovidas pela incorporação da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. As amostras analisadas consistiram em pastilhas de argamassa com dimensões aproximadas de 25 mm de diâmetro e 5 mm de altura.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O comportamento térmico e a decomposição dos compostos hidratados das argamassas foram avaliados por meio de análises térmicas simultâneas (TG/DSC). Após o período de cura, as amostras foram acondicionadas em dessecador contendo sílica gel até a realização dos ensaios, com objetivo de minimizar a presença de umidade livre. As análises foram conduzidas em equipamento NETZSCH STA 449 F3, sob a atmosfera de nitrogênio (N_2), utilizando taxa de aquecimento de 10 °C/min, no intervalo de temperatura de 35 a 1000 °C. As amostras foram acondicionadas em cadinho aberto de Al_2O_3, sendo analisadas simultaneamente as variações de massa (TG) e os eventos térmicos (DSC).

As amostras foram analisadas quanto à composição de óxidos maiores por fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDS). Para a realização do ensaio, foram submetidas à cominuição, secagem a 105 °C por 12 h e posterior calcinação a 1000 °C por 5 h. Após a calcinação, realizou-se a preparação de pérolas fundidas utilizando tetraborato de lítio ($Li_2B_4O_7$) como fundente, na proporção de 1:9 (amostra:fundente, em massa). As análises foram conduzidas em espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de ródio (Rh) de 4 kW, calibrado com conjunto de padrões naturais certificados.

2.5. Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Para a determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland, foram produzidas três dosagens de argamassa utilizando CP II-F-32: uma mistura de referência sem substituição do cimento Portland por cinza (P-REF), uma mistura com substituição de 10% do cimento por CBCA CJT150 (P-10) e uma mistura com substituição de 25% do cimento por CBCA CJT150 (P-25).

Este ensaio foi realizado em etapa posterior aos ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade das argamassas. Assim, visando otimizar o tempo de execução dos ensaios e aprofundar a investigação do material com melhor desempenho, optou-se por avaliar apenas a cinza que apresentou os melhores resultados mecânicos e de menor absorção por capilaridade entre as cinzas estudadas. As argamassas foram preparadas mantendo-se constante a relação areia/ligante, adotando-se o valor de 3,0, em massa.

Durante o preparo das misturas, foi necessário ajustar o teor de aditivo superplastificante para obtenção da consistência desejada. A espalhabilidade na mesa de fluxo (ABNT NBR 13276, 2016) foi fixada em 260 ± 10 mm, com teores de superplastificante variando entre 0,25 e 7,6%.

Tabela 3. Proporções das argamassas utilizadas no ensaio de índice de atividade pozolânica

Proporções da mistura	P-REF	P-10	P-25

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Cimento (g)	624	561,6	468
Cinza CJT150 (g)	-	62,4	156
Areia (g)	1872	1872	1872
Água (g)	305	310	305
Aditivo (g)	1,56	9,98	47,4
a/c	0,48	0,49	0,48

Fonte: Próprio Autor (2026)

Após a moldagem dos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, estes foram submetidos à cura até a idade de 28 dias. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em prensa EMIC GR048, empregando-se taxa de aplicação de tensão de 0,50 MPa/s.

Tabela 4. Teor de superplastificante e espalhamento na mesa de fluxo das argamassas

Argamassas	Teor de superplastificante (%) [a]	Espalhamento da mesa de fluxo (mm)
P-REF	0,25	255
P-10	1,6	250
P-25	7,6	260

[a] Conteúdo em relação à massa do aglutinante

Fonte: Próprio Autor (2026)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

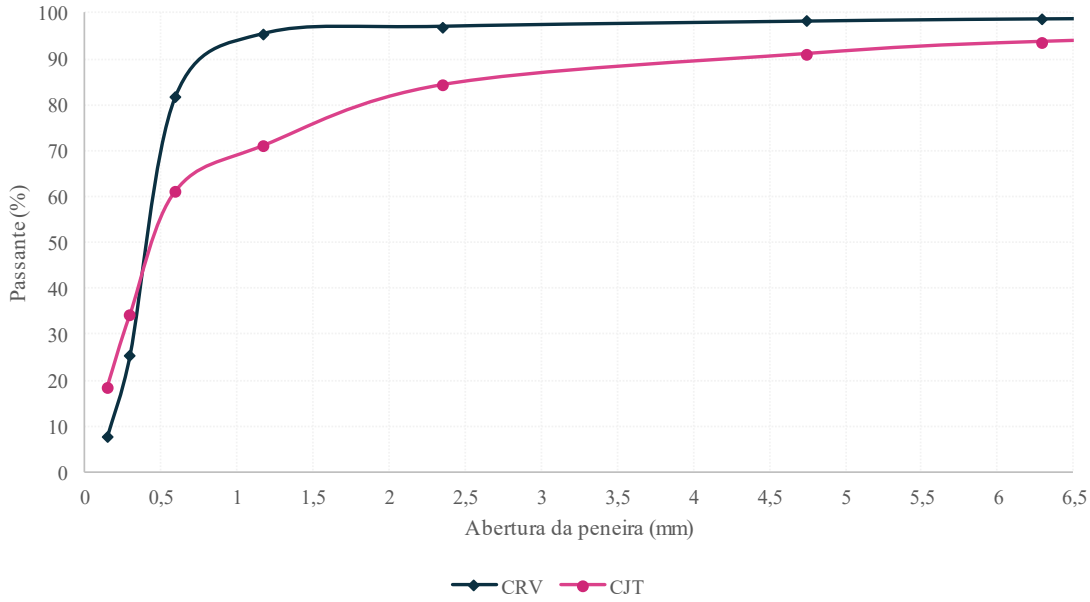
3.1. Caracterização das amostras de CBCA

As massas específicas das cinzas variaram entre 1,35 e 1,53 g/cm³. Os valores obtidos foram inferiores aos frequentemente reportados na literatura para cinzas de bagaço de cana-de-açúcar empregadas como materiais cimentícios suplementares. Essa diferença pode estar associada ao fato de que muitos estudos utilizam cinzas submetidas a etapas de beneficiamento, como moagem e calcinação, visando aumentar a reatividade pozolânica e reduzir o teor de carbono residual. Em contrapartida, as cinzas avaliadas neste estudo foram utilizadas sem qualquer beneficiamento térmico ou mecânico adicional. Comportamento semelhante foi observado por Bahurudeen *et al.* (2015), que reportaram gravidade específica de 1,91 g/cm³ para cinza de bagaço de cana-de-açúcar bruta, atribuindo esse resultado à presença de partículas de carbono não queimadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica das cinzas brutas CRV e CJT, previamente ao peneiramento empregado para obtenção das frações utilizadas na produção das argamassas. Observa-se que as cinzas apresentaram comportamentos distintos quanto à distribuição do tamanho de partículas, evidenciando influência da origem do material.

Figura 5. Distribuição granulométrica das cinzas brutas CRV e CJT



Fonte: Próprio Autor (2026)

Observa-se que, nas peneiras de maior abertura até 0,6 mm, a amostra CRV apresentou percentual passante superior ao observado para a amostra CJT. Na peneira de 1,18 mm, por exemplo, os percentuais passantes foram de aproximadamente 95% para a amostra CRV, enquanto para a amostra CJT o valor foi de 71%. Esse comportamento indica menor proporção de partículas de maiores dimensões na cinza CRV.

Entretanto, a partir da peneira de 300 µm, observa-se uma inversão do comportamento granulométrico. Nessa faixa, a amostra CJT apresentou maior percentual passante, atingindo 34% na peneira de 0,3 mm e 18,5% na peneira de 0,15 mm, enquanto a amostra CRV apresentou percentual inferior, de aproximadamente 25% na peneira de 0,3 mm e apenas 7,5% na peneira de 0,15 mm.

Esse resultado evidencia que a cinza CJT possui maior proporção de partículas finas, especialmente nas frações inferiores a 0,3 mm. Por outro lado, a cinza CRV apresenta

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

distribuição granulométrica mais concentrada em tamanhos intermediários, com menor participação relativa de partículas muito finas, o que sugere maior uniformidade.

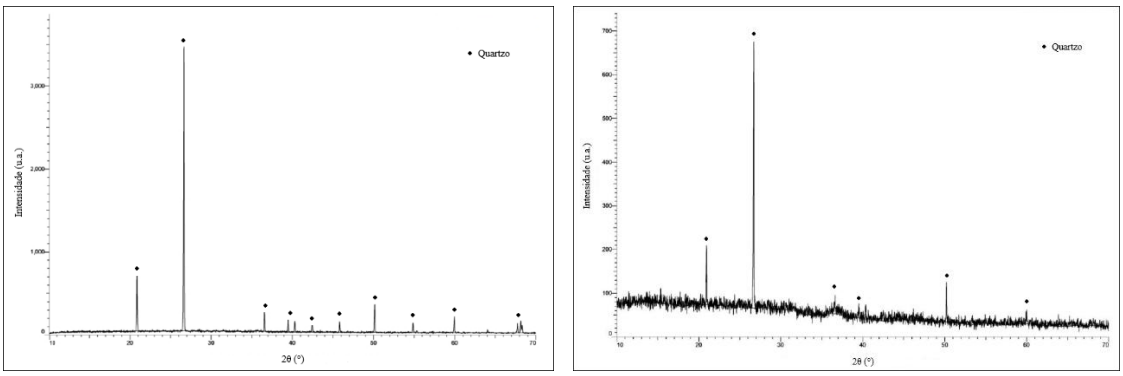
A ampla distribuição granulométrica observada nas cinzas avaliadas está em consonância com a literatura, que descreve a cinza de bagaço de cana-de-açúcar bruta como um material heterogêneo, constituído por partículas queimadas finas e partículas fibrosas não queimadas, com granulometria relativamente grosseira quando comparada às cinzas beneficiadas. Bahurudeen e Santhanam (2015) observaram que a cinza recebida diretamente da usina apresenta elevada variabilidade no tamanho e na morfologia das partículas, enquanto Torres *et al.* (2020) reportaram que as cinzas sem beneficiamento apresentam granulometria grosseira e elevada perda ao fogo, características associadas à ausência de processamento adicional.

De forma geral, os resultados sugerem que a cinza CJT apresenta distribuição granulométrica mais heterogênea, caracterizada pela coexistência de partículas de maiores dimensões e de uma fração fina mais expressiva. Já a cinza CRV apresenta distribuição mais uniforme, com predominância de partículas em faixas granulométricas intermediárias. Essa diferença pode influenciar o comportamento das cinzas quando utilizadas como material cimentício suplementar, uma vez que a presença de partículas finas tende a aumentar a área superficial específica disponível para interação com a matriz cimentícia e pode favorecer efeitos físicos de preenchimento (efeito fíler).

A análise dos difratogramas de DRX revelou diferenças significativas entre as cinzas avaliadas, conforme apresentado pela Figura 6. A cinza CJT150 apresentou a existência de um halo amorfo mais evidente, característico de materiais com maior fração vítrea e menor organização cristalina. Esse comportamento sugere maior potencial de reatividade pozolânica, uma vez que o halo amorfo presente nas cinzas representa a fração de sílica desprovida de organização cristalina, característica que confere maior reatividade ao material durante a reação pozolânica, conforme observado por Torres *et al.* (2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 6. Difratograma de DRX da cinza CRV150 (a) e CJT150 (b)



Fonte: Adaptado de CRTI (2026)

O principal pico para as duas amostras ocorreu em aproximadamente 26,6° (2θ), característico do quartzo, apresentando a maior intensidade entre as reflexões observadas. Picos secundários em 20,8° 36,5° e 50,1° também corroboram a presença dessa fase mineralógica, em consonância com padrões de difração reportados por Torres *et al.* (2020) e Cordeiro *et al.*, 2009.

Por outro lado, a cinza CRV150 apresentou picos cristalinos mais intensos e bem definidos, indicando uma estrutura mais organizada cristalograficamente. Esse comportamento pode estar associado à presença de fases cristalinas como quartzo e outros silicatos cristalizados, normalmente menos reativos do ponto de vista pozolânico.

A diferença entre os perfis mineralógicos pode estar relacionada às condições de geração e coleta das cinzas nas usinas. Fatores como temperatura de queima, tempo de residência do material, disponibilidade de oxigênio e local de recolhimento da cinza influenciam diretamente a formação de fases amorfas ou cristalinas. Segundo a literatura, a presença de cristobalita está associada a temperaturas mais elevadas de combustão. Como a atividade pozolânica é favorecida pela presença de sílica amorfa, o aumento da fração cristalina tende a reduzir a reatividade da cinza (Cordeiro *et al.*, 2009). Assim, a cinza CRV pode ter sido submetida a condições térmicas mais severas ou permanecido por maior tempo exposta ao calor, favorecendo a formação de estruturas cristalinas. Em contrapartida, a presença do halo amorfo na cinza CJT indica que parte significativa da sílica permaneceu em estado desordenado, condição normalmente associada a maior atividade pozolânica.

Os resultados observados por DRX podem auxiliar na interpretação do comportamento mecânico e de absorção capilar das argamassas produzidas com as cinzas. A maior fração

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

amorfa identificada na cinza CJT sugere maior capacidade de reação pozolânica, contribuindo para a formação adicional de produtos cimentícios secundários, principalmente C-S-H.

3.2. Resistência à compressão da argamassa ao longo do tempo

Os resultados de resistência à compressão das argamassas são apresentados na Figura 7. Observa-se aumento da resistência mecânica para todas as composições ao longo do período de cura, com ganhos mais expressivos entre 28 e 56 dias para as misturas contendo cinza.

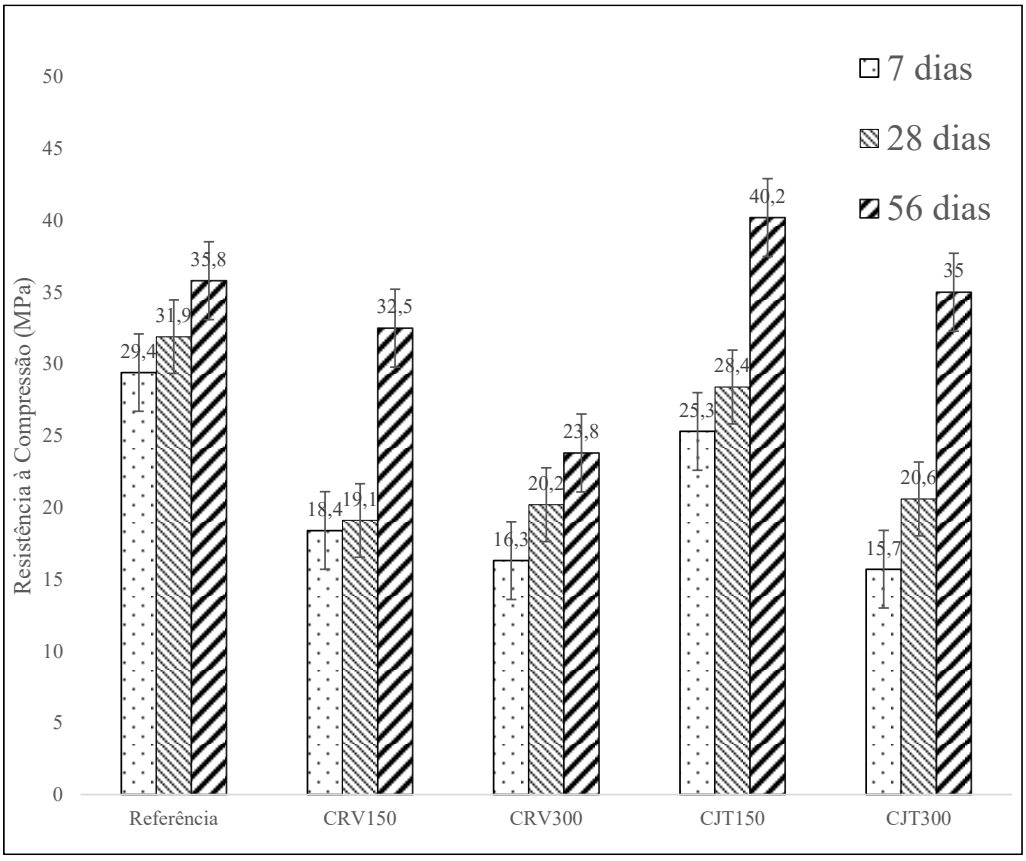
Aos 7 dias, a argamassa de referência apresentou a maior resistência à compressão, atingindo 29,4 MPa, enquanto as misturas com incorporação de cinza apresentaram valores inferiores. Tendência semelhante foi observada por Cupim *et al.* (2025), Yaseen (2024) e Kirthiga e Elavenil (2023) que verificaram diminuição da resistência à compressão aos 7 dias com a aplicação e aumento dos níveis de substituição por CBCA. Entre as misturas com substituição parcial do cimento, a maior resistência foi observada para a CJT150 (25,3 MPa), seguida pela CRV150 (18,4 MPa), CRV300 (16,3 MPa) e CJT300 (15,7 MPa).

Aos 28 dias, a referência permaneceu com a maior resistência média (31,9 MPa), enquanto a CJT150 atingiu 28,4 MPa. As demais misturas apresentaram resistências entre 19,1 MPa e 20,6 MPa, correspondentes às formulações CRV150, CRV300 e CJT300.

Aos 56 dias, observou-se alteração no comportamento das misturas. A argamassa CJT150 apresentou a maior resistência à compressão dentre todas as formulações avaliadas, atingindo 40,2 MPa, valor 12,3% superior ao da argamassa de referência (35,8 MPa), comportamento semelhante foi observado por Chi (2012). A mistura CJT300 também apresentou ganho expressivo de resistência ao longo do período de cura, alcançando 35,0 MPa aos 56 dias. A formulação CRV150 atingiu 32,5 MPa, enquanto a CRV300 apresentou o menor desempenho mecânico, com resistência de 23,8 MPa.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 56 dias de cura



Fonte: Próprio Autor (2026)

A análise estatística por ANOVA de fator único demonstrou que as diferenças observadas entre as composições foram estatisticamente significativas para todas as idades avaliadas. Aos 7 dias, obteve-se valor-P igual a $7{,}06 \times 10^{-6}$, enquanto aos 28 e 56 dias os valores foram 0,0024 e 0,0029, respectivamente, todos inferiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0{,}05$). Além disso, os valores da estatística F foram superiores aos respectivos valores críticos em todas as idades analisadas, indicando que as diferenças entre as médias não ocorreram de forma aleatória, mas foram influenciadas pelas distintas composições das argamassas.

Diferenças observadas no desempenho mecânico das argamassas podem estar associadas às características físico-químicas, mineralógicas e granulométricas das cinzas, as quais são influenciadas pelas condições de combustão e pelos sistemas de coleta empregados nas unidades industriais. Esses parâmetros estão intimamente relacionados à atividade pozolânica, uma vez que esta depende do tamanho das partículas e da morfologia do material,

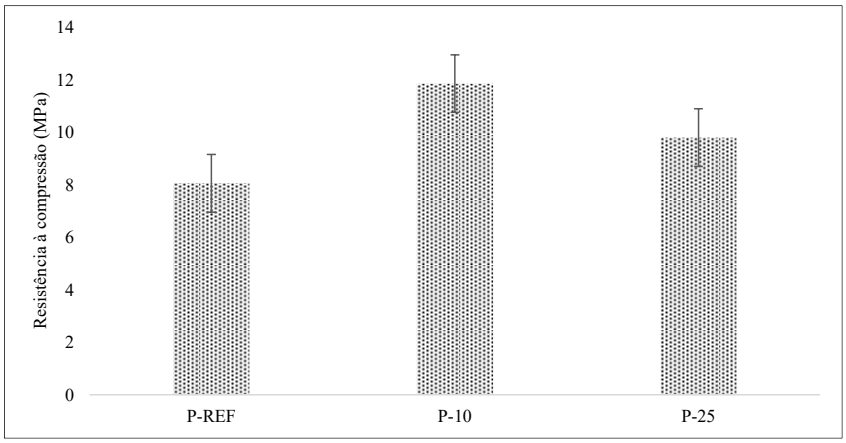
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

podendo afetar significativamente o desempenho de matrizes cimentícias (Cordeiro *et al.*, 2009; Frías *et al.*, 2011). Além disso, materiais finos incorporados em substituição parcial ao cimento Portland podem promover efeito fíler e maior compactação da matriz, favorecendo as reações de hidratação e resultando em ganhos de resistência mecânica (Silva *et al.*, 2020; Cupim *et al.*, 2025).

3.3. Avaliação da atividade pozolânica das cinzas

Os resultados do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento Portland, apresentados na Figura 8, demonstraram que a incorporação da cinza CJT150 promoveu aumento da resistência à compressão das argamassas em relação à mistura de referência aos 28 dias de cura, comportamento também observado por Kirthiga e Elavenil (2023) e Cupim *et al.* (2025). Esse resultado sugere a ocorrência de atividade pozolânica e reforça o potencial de utilização da cinza como material cimentício suplementar.

Figura 8. Resistência à compressão aos 28 dias das argamassas utilizadas na determinação do índice de atividade pozolânica com cinza CJT150



Fonte: Próprio Autor (2026)

A mistura de referência apresentou resistência média à compressão de 8,06 MPa, enquanto as argamassas com substituição de 10% e 25% do cimento por cinza apresentaram resistências médias de 11,86 MPa e 9,80 MPa, respectivamente. Esses valores correspondem a índices de atividade pozolânica de 147,1% e 121,6%, ambos superiores ao valor mínimo de 90% estabelecido pela ABNT NBR 5752 para a classificação de materiais pozolânicos.

O melhor desempenho foi observado para a substituição de 10%, sugerindo que esse teor proporcionou um equilíbrio mais favorável entre a redução do consumo de cimento e os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

efeitos benéficos promovidos pela incorporação da cinza, fenômeno observado por Cupim *et al.*, 2025. Entre esses efeitos destacam-se o preenchimento dos vazios da matriz cimentícia e a possível ocorrência de reações pozolânicas, capazes de contribuir para a formação adicional de compostos cimentícios.

Embora a substituição de 25% também tenha resultado em resistência superior à da argamassa de referência, seu desempenho foi inferior ao obtido com 10% de substituição. Esse comportamento pode estar associado à redução mais acentuada da quantidade de cimento disponível para hidratação, limitando parcialmente os ganhos promovidos pela incorporação da cinza.

Observou-se ainda aumento significativo na demanda de superplastificante com a incorporação da cinza, passando de 0,25% na mistura de referência para 1,6% e 7,6% nas misturas com 10% e 25% de substituição, respectivamente. Esse comportamento sugere maior demanda de água do sistema, possivelmente relacionada à elevada área superficial específica, morfologia irregular e porosidade das partículas de cinza. Apesar disso, os elevados valores de índice de atividade pozolânica obtidos indicam que a incorporação da cinza contribuiu positivamente para o desenvolvimento da resistência mecânica das argamassas.

3.4. Absorção de água por capilaridade das argamassas

A Figura 9 apresenta os resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 e 56 dias de cura. Aos 28 dias, a argamassa de referência apresentou o menor valor de absorção ao final do ensaio, atingindo 0,132 g/cm². Entre as misturas contendo cinza, a menor absorção foi observada para a CJT150 (0,170 g/cm²), seguida por CJT300 (0,285 g/cm²), CRV300 (0,441 g/cm²) e CRV150 (0,468 g/cm²).

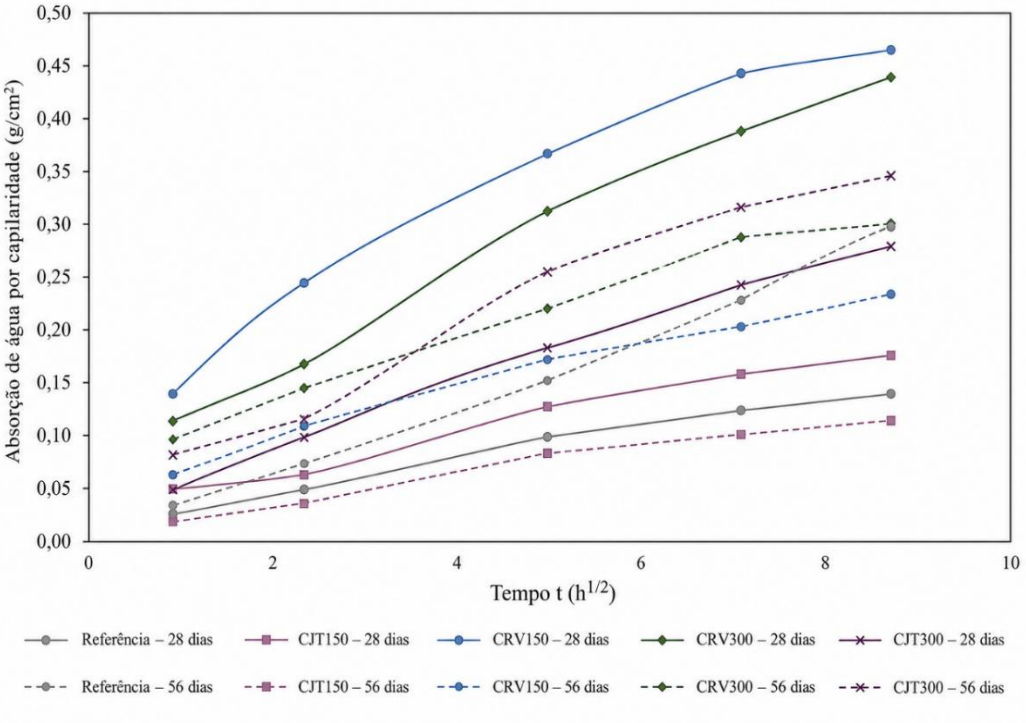
Aos 56 dias, observou-se alteração no comportamento das misturas. A argamassa CJT150 apresentou a menor absorção dentre todas as formulações avaliadas, atingindo 0,114 g/cm² ao final do ensaio, valor aproximadamente 60% inferior ao observado para a argamassa de referência (0,285 g/cm²). A formulação CRV150 também apresentou redução da absorção em relação à referência, alcançando 0,229 g/cm². Por outro lado, as misturas CJT300 e CRV300 apresentaram os maiores valores de absorção aos 56 dias, atingindo 0,342 g/cm² e 0,327 g/cm², respectivamente.

Comparando os resultados aos 28 e 56 dias, verifica-se redução da absorção capilar para as misturas CJT150, CRV150 e CRV300, enquanto a argamassa de referência e a CJT300 apresentaram aumento dos valores de absorção. A maior redução foi observada para a CJT150,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

cuja absorção diminuiu de 0,170 g/cm² para 0,114 g/cm², correspondendo a uma redução de aproximadamente 33%.

Figura 9. Evolução da absorção por capilaridade das argamassas aos 28 e 56 dias de cura



Fonte: Próprio Autor (2026)

A redução da absorção de água observada para a argamassa CJT150 pode estar associada ao refinamento da estrutura porosa e ao melhor preenchimento da matriz cimentícia, comportamento também relatado por Silva *et al.* (2020).

A combinação entre elevada resistência à compressão (40,2 MPa) e baixa absorção capilar (0,114 g/cm²) observada para a CJT150 indica que essa mistura apresentou o melhor desempenho global entre as formulações avaliadas, justificando sua seleção para as análises complementares de TG/DSC, FRX e MEV.

3.5. Análise térmica das argamassas por TG/DSC

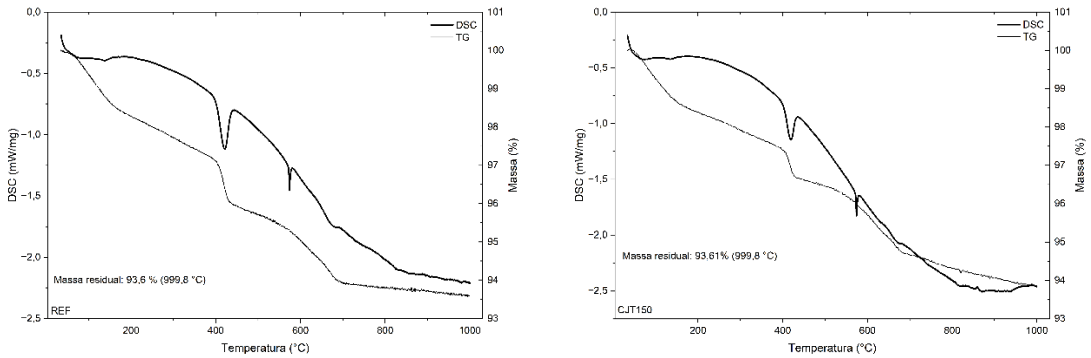
As curvas TG/DSC das amostras REF e CJT150 são apresentadas na Figura 10. Nos gráficos, a variação de massa registrada ao longo do aquecimento permite identificar os principais eventos de decomposição dos compostos presentes na matriz cimentícia. Além das

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fases sólidas hidratadas, as argamassas são constituídas por vazios preenchidos por diferentes formas de água, incluindo água capilar, adsorvida, interlamelar e quimicamente combinada, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2008).

De modo geral, ambas as argamassas exibiram comportamento térmico semelhante, caracterizado por eventos de perda de massa associados à desidratação e decomposição dos compostos hidratados da matriz cimentícia. A quantificação dessas perdas permite avaliar indiretamente as alterações promovidas pela incorporação da cinza na composição e no desenvolvimento microestrutural das argamassas.

Figura 10. TG/DSC para argamassas REF (a) e CJT150 (b) aos 56 dias de cura



Fonte: Adaptado de CRTI (2026)

Durante o aquecimento das amostras REF e CJT150, as curvas TG/DSC apresentadas mostram duas etapas significativas de perda de massa.

A argamassa REF apresentou perda de massa total de aproximadamente 6,38%, enquanto a argamassa CJT150 apresentou perda de massa de 6,13%, conforme exemplificado na Tabela 5, indicando comportamento térmico semelhante entre as amostras.

Em baixas temperaturas observou-se discreta perda de massa, atribuída à eliminação de água livre e água fisicamente adsorvida. A baixa intensidade desse evento pode estar relacionada ao pré-condicionamento das amostras em dessecador contendo sílica gel antes da realização do ensaio, procedimento que contribuiu para a remoção prévia da umidade livre presente na matriz.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 5. Resultados da análise térmica (TG/DSC) das argamassas REF e CJT150

Argamassa	Perda de massa total (%)	Massa residual (%)	Temperatura do pico da Portlandita (°C)	Perda de massa associada à Portlandita (%)
REF	6,38	93,61	421,0	1,07
CJT150	6,13	93,87	419,9	0,66

Fonte: Próprio Autor (2026)

O principal evento térmico observado ocorreu entre aproximadamente 400 e 430 °C, sendo identificado nas curvas DSC por meio de pico endotérmico associado à desidroxilação da portlandita ($Ca(OH)_2$), fenômeno tipicamente observado entre 400 e 465 °C (Torres de Sande *et al.*, 2022). A reação correspondente é apresentada na Equação (2).

$$Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O \quad (2)$$

Para a argamassa REF, a perda de massa observada na faixa de desidroxilação da portlandita foi de 1,07%. A partir desse valor, estimou-se um teor de portlandita de aproximadamente 4,40%, utilizando-se a razão estequiométrica entre as massas molares do $Ca(OH)_2$ e da H_2O (74,09/18,02 = 4,11). Já para a argamassa CJT150, a perda de massa na mesma faixa foi de 0,66%, correspondendo a um teor estimado de portlandita de aproximadamente 2,71%.

Esse resultado representa uma redução de aproximadamente 38,2% no teor de portlandita residual em relação à argamassa de referência, o que sugere consumo parcial do hidróxido de cálcio por reações pozolânicas decorrentes da incorporação da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, comportamento também identificado por Torres de Sande *et al.* (2022). Conforme representado simplificadamente pela Equação (3).

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow C - S - H \quad (3)$$

Esse resultado está em concordância com o melhor desempenho mecânico e a menor absorção por capilaridade observados para essa mistura, pois a formação adicional de C-S-H tende a contribuir para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia, promovendo redução da porosidade e maior densificação da pasta, comportamento similar foi observado por Thomas *et al.*, 2021. Esse comportamento pode estar diretamente relacionado ao incremento de 12,2% na resistência à compressão observado para a argamassa contendo cinza, além da menor absorção por capilaridade (0,114 g/cm²), indicando que a possível reação pozolânica favoreceu o desenvolvimento mecânico do material em idade mais avançada.

Em temperaturas superiores a 570 °C, ambas as amostras apresentaram evento térmico associado à decomposição de compostos carbonáticos, principalmente carbonato de cálcio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

($CaCO_3$), com picos endotérmicos em aproximadamente 574 °C (Frías; Villar; Savastano, 2011). Esse comportamento pode estar relacionado à carbonatação parcial dos produtos de hidratação da matriz cimentícia e/ou à presença de carbonatos originalmente presentes nos constituintes do cimento, conforme representado pela Equação (4).

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (4)$$

De maneira geral, os resultados térmicos evidenciam que a incorporação da cinza de bagaço de cana-de-açúcar favoreceu o consumo de portlandita por reações pozolânicas. Esse resultado está em concordância com o elevado índice de atividade pozolânica, o aumento da resistência à compressão e a redução da absorção por capilaridade observados para a argamassa CJT150, indicando o refinamento da microestrutura e a melhoria das propriedades mecânicas e de absorção capilar.

3.6. Caracterização química por fluorescência de raios X (FRX)

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise por fluorescência de raios X (FRX) dos óxidos maiores das argamassas REF e CJT150 aos 56 dias de cura. A FRX é uma técnica amplamente empregada para a determinação da composição química de materiais cimentícios, incluindo argamassas e concretos endurecidos, permitindo a quantificação dos principais óxidos presentes na matriz cimentícia (García-Florentino *et al.*, 2018; Valix, 2020).

Tabela 6. Resultados da análise térmica (TG/DSC) das argamassas REF e CJT150

Óxidos analisados (%)	REF - 56 dias	CJT150 - 56 dias
SiO2	77,92	79,58
TiO2	0,22	0,24
Al2O3	1,50	1,55
Fe2O3	0,88	1,04
MnO	< LQ	< LQ
MgO	0,27	0,27
CaO	13,79	11,97
Na2O	< LQ	< LQ
K2O	< LQ	0,12
P2O5	< LQ	< LQ
SO3	1,00	0,61

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LOI	5,10	5,31
SOMA	100,67	100,68

Fonte: Próprio Autor (2026)

Observa-se que ambas as formulações apresentaram predominância de dióxido de silício (SiO_2), com teores de 77,92% para a REF e 79,58% para a CJT150. Os elevados teores de SiO_2 estão associados principalmente à presença de areia na composição das argamassas, além da contribuição da sílica proveniente da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. A argamassa contendo CJT150 também apresentou discreto aumento nos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3, comportamento compatível com a incorporação de constituintes minerais presentes na cinza.

Em contrapartida, verificou-se redução do teor de CaO, de 13,79% na REF para 11,97% na CJT150, resultado esperado em função da substituição parcial do cimento Portland por um material predominantemente silicoso e com menor teor de cálcio. Adicionalmente, a redução relativa de CaO pode estar associada ao consumo parcial de compostos cálcicos durante as reações de hidratação e possíveis reações pozolânicas. Os teores de SO_3 também diminuíram na argamassa contendo cinza, passando de 1,00% para 0,61%, enquanto os valores de perda ao fogo (LOI) permaneceram semelhantes entre as formulações.

Em conjunto, os resultados indicam alterações na composição química da argamassa contendo cinza, caracterizadas pelo aumento relativo dos compostos silicosos e pela redução dos constituintes ricos em cálcio. Esse comportamento está em concordância com os resultados de índice de atividade pozolânica, resistência à compressão e TG/DSC, que evidenciaram o potencial pozolânico da cinza CJT150.

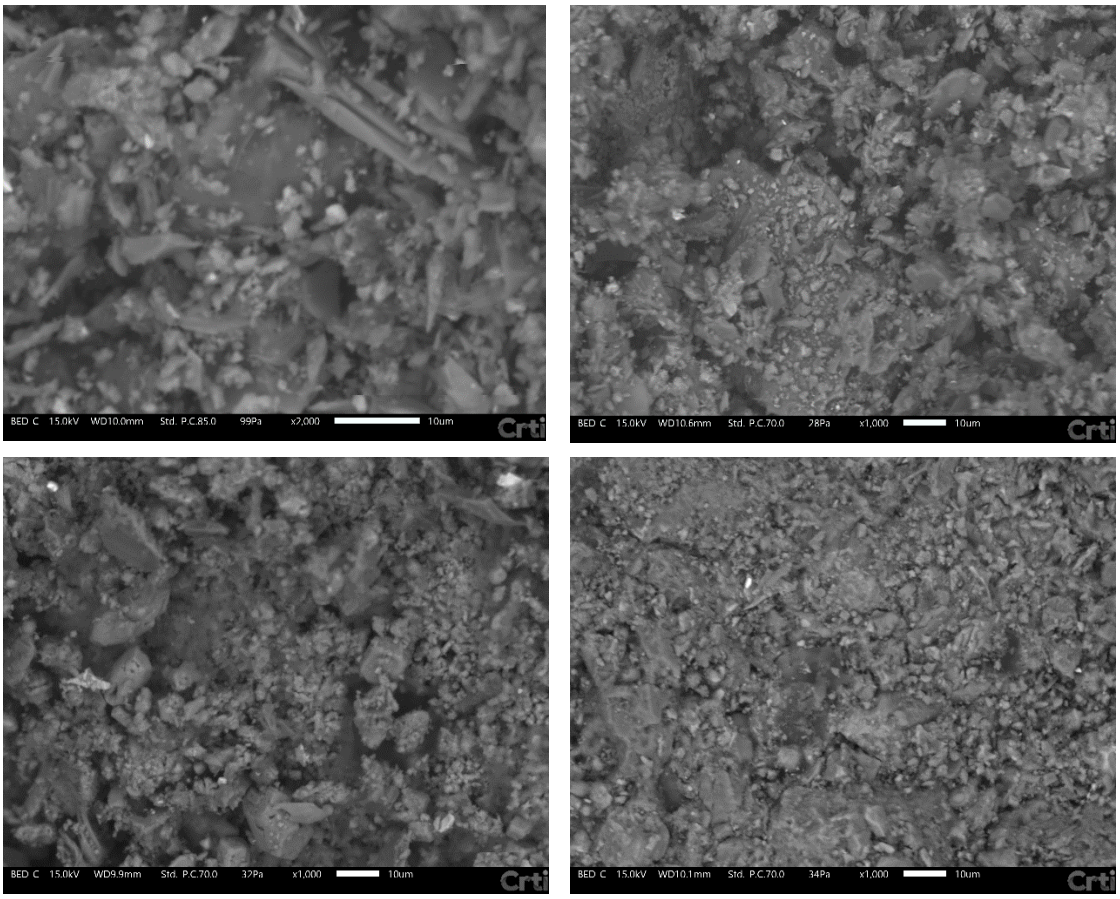
3.7. Análise morfológica das argamassas por microscopia eletrônica por varredura (MEV)

As micrografias de MEV evidenciaram que ambas as argamassas apresentam morfologia heterogênea, constituída por partículas de diferentes dimensões, regiões de aspecto rugoso e poros isolados.

Comparativamente, as imagens obtidas aos 56 dias sugerem maior preenchimento da matriz em relação às amostras aos 28 dias, comportamento compatível com a evolução das reações de hidratação ao longo do período de cura. Entretanto, as diferenças morfológicas entre REF e CJT150 não se mostraram suficientemente pronunciadas para permitir conclusões isoladas a partir do MEV, sendo sua interpretação realizada em conjunto com os resultados de resistência à compressão, absorção por capilaridade, DRX e TG/DSC.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 11. MEV das argamassas com ampliação de 1000×: (a) REF aos 28 dias; (b) CJT150 aos 28 dias; (c) REF aos 56 dias; e (d) CJT150 aos 56 dias



Fonte: Adaptado de CRTI (2026)

A morfologia observada por MEV para a argamassa CJT150 aos 56 dias, caracterizada por aspecto mais homogêneo e maior preenchimento aparente da matriz, é compatível com um processo de densificação microestrutural, corroborando os resultados de menor teor de portlandita obtidos por TG/DSC, maior resistência à compressão e menor absorção por capilaridade. Comportamento semelhante foi observado por Chi (2012), que atribuiu o incremento da resistência mecânica ao refinamento da microestrutura promovido pela atividade pozolânica da cinza.

As características observadas nas micrografias são compatíveis com o refinamento da microestrutura e a redução de vazios descritos por Silva *et al.* (2020), os quais associam a incorporação de materiais finos à formação de uma matriz cimentícia mais compacta.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entretanto, as diferenças morfológicas entre a argamassa de referência e a argamassa contendo CJT150 não se mostraram suficientemente pronunciadas para permitir conclusões isoladas a partir do MEV, sendo ambas caracterizadas por uma matriz heterogênea, com partículas de diferentes dimensões, regiões de aspecto rugoso e poros isolados.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar é tecnicamente viável, desde que o material seja previamente caracterizado, uma vez que suas características físico-químicas, mineralógicas e granulométricas influenciam diretamente o desempenho das argamassas.

Entre as amostras avaliadas, a cinza CJT150 apresentou o melhor desempenho global. A argamassa produzida com essa cinza atingiu resistência à compressão de 40,2 MPa aos 56 dias, valor superior ao da argamassa de referência (35,8 MPa), além de apresentar a menor absorção por capilaridade (0,114 g/cm²), em comparação à referência (0,285 g/cm²). Os resultados de índice de atividade pozolânica, associados à redução de aproximadamente 38,2% do teor de portlandita residual observada por TG/DSC, indicam a ocorrência de reações pozolânicas que contribuíram para o refinamento da matriz cimentícia.

As análises de DRX, FRX, TG/DSC e MEV demonstraram maior caráter amorfo da cinza CJT150, menor teor de portlandita residual e uma microestrutura mais densa em relação à argamassa de referência. A concordância entre os resultados mecânicos, de absorção, térmicos e microestruturais indica que a incorporação dessa cinza favoreceu a formação de uma matriz mais compacta e menos permeável, evidenciando potencial para melhoria da durabilidade das argamassas.

A cinza CRV150 também apresentou potencial de utilização como material cimentício suplementar, alcançando resistência à compressão de 32,5 MPa aos 56 dias e absorção por capilaridade inferior à da referência (0,229 g/cm²). Já a cinza CJT300 apresentou desempenho mecânico satisfatório, porém sua maior absorção de água aos 56 dias evidencia limitações quanto ao refinamento da microestrutura quando comparada à CJT150, ressaltando a influência da granulometria no desempenho final das argamassas.

Por fim, conclui-se que o aproveitamento de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas apresenta potencial técnico, ambiental e tecnológico, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland e para a valorização de resíduos agroindustriais. Os resultados obtidos demonstram que o grau de cristalinidade e a granulometria das cinzas exerceram

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

influência direta sobre sua atividade pozolânica e, consequentemente, sobre o desempenho das argamassas. Entre os materiais avaliados, a cinza CJT150 destacou-se por promover ganhos simultâneos de resistência mecânica, redução da absorção de água, consumo de portlandita e refinamento microestrutural, indicando potencial para aumentar a durabilidade das argamassas e atuar como alternativa sustentável para substituição parcial do cimento Portland.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16697, 2018. Cimento Portland – Requisitos.

ABNT NBR 11768-1, 2019. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos.

ABNT NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

ABNT NBR 13276, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.

ABNT NBR 7215, 2019. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

ABNT NBR 5752, 2014. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

Abdalla, T. A.; Hussein, A. A. E.; Ahmed, Y. H.; Semmana, O. Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. **Results in Engineering**, v. 21, 2024.

Ainomugisha, S.; Kibwami, N.; Racheal, W.; Adubango, E. N.; Matovu, M. J.; Manga, M. Effect of sugarcane bagasse ash on eco-friendly blended cement production: Physicochemical, mechanical, and microstructure properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, 2025.

Alvarenga, K. P.; Cordeiro, G. C. Evaluating sugarcane bagasse fly ash as a sustainable cement replacement for enhanced performance. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 20, 2024.

Bahurudeen, A.; Santhanam, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, 2015.

Bahurudeen, A.; Wani, K.; Basit, M. A.; Santhanam, M. Assessment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, no. 2, 2015.

Benachio, G. L. F.; Freitas, M. do C. D.; & Tavares, S. F. (2020). Circular Economy in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. **Journal of Cleaner Production**, 260, ArticleID: 121046. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Chi, M. –C. Effects of sugar cane bagasse ash as a cement replacement on properties of mortars. Science and Engineering of Composite Materials, v. 19, 2012.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 13, n.4. Abril, 2026.

Cordeiro, G. C.; Filho, R. D. T.; Fairbairn, E. de M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, vol. 32, No. 1, 2009.

Cordeiro, G. C.; Filho, R. D. T.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. de M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research,** v. 39, 2009.

Cupim, R. V.; Junior, J. A. T. L.; Mesquita, L. C.; Marques, M. G.; Azevedo, A. R. G. de. Rheological and Mechanical properties of mortars made with recycled sugarcane bagasse ash. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 36, 2025.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). 1. ed. São Paulo: **FIESP/CIESP**, 2001.

Frías, M.; Villar, E.; Savastano, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement & Concrete Composites**, vol. 33, 2011.

García-Florentino, C.; Maguregui, M.; Romera-Fernández, M.; Queralt, I.; Margui, E.; Madariaga, J. M. Usefulness of a Dual Macro- and Micro-Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer to Develop Quantitative Methodologies for Historic Mortar and Related Materials Characterization. **Analytical Chemistry**, vol. 90, 2018.

Gurgel, M. N. do A.; Freire, F. J.; Silva, F. C. da; Abreu Junior, C. H.; Marchiori, L. F. S.; Raizer, A. J. Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; FREIRE, F. J. (ed.). **Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa; Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2024. cap. 10, p. 339-385.

Kirthiga, R.; Elavenil, S. Potential utilization of sugarcane bagasse ash in cementitious composites for developing inorganic binder. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 14, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: **IBRACON**, 2008.

Silva, L. A.; Nahime, B. de O.; Felipe, A. dos S.; Elias, C. N.; Devaney, R. do C.; Lima, E. C. de; Santos, I. S. dos; Lima, K. L.; Istuque, D. Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste. **Construction and Building Materials**, v. 265, 2020.

Thomas, B. S.; Yang, J.; Bahurudeen, A.; Abdalla, J. A.; Hawileh, R. A.; Hamada, H. M.; Nazar, S.; Jittin, V.; Ashish, D. K. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. **Materials Today Sustainability**, vol. 15, 2021.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Torres, S. M.; Lima, V. E. de; Basto, P. de A.; Junior, N. T. de A.; Neto, A. A. de M. Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.

Torres de Sande, V.; Sadique, M.; Bras, A.; Pineda, P. Activated sugarcane bagasse ash as efficient admixture in cement-based mortars: Mechanical and durability improvements. **Journal of Building Engineering**, v. 59, 2022.

Valix, M. Test Method 2B.2 Analysis of the Elemental Composition of Concrete, or Mortar, by X-ray Fluorescence. **University of Sydney**, 2020.

Yaseen, N. Exploring the potential of sugarcane bagasse ash as a sustainable supplementary cementitious material: Experimental investigation and statistical analysis. **Results in Chemistry**, v. 10, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.