

ESTUDO PRELIMINAR DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: INFLUÊNCIA NA COMPRESSÃO AXIAL

PRELIMINARY STUDY OF CONCRETE WITH ADDITION OF SUGARCANE BAGASSE ASH: INFLUENCE ON AXIAL COMPRESSION

ESTUDIO PRELIMINAR DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR: INFLUENCIA EN LA COMPRESIÓN AXIAL

Esdras Márcio Araújo Lima¹
Manoel Martins dos Santos Filho²

RESUMO: O concreto é reconhecido como o principal material de construção global, mas a fabricação do cimento Portland é energeticamente intensiva e responsável por elevadas emissões anuais de dióxido de carbono, superando 2,5 bilhões de toneladas. A escassez de materiais cimentícios suplementares (MCS) tradicionais impulsiona a busca por subprodutos agroindustriais, como a Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA), cuja produção global de cinza alcança cerca de 11,9 milhões de toneladas anuais. O potencial da CBCA reside na sua composição rica em sílica, que a configura como material pozolânico. Este estudo preliminar de revisões bibliográficas avaliou a viabilidade da CBCA como substituto parcial do cimento, focando em sua influência na resistência à compressão axial. As análises indicam que a viabilidade depende do processamento, pois somente as cinzas leves demonstraram alto teor de amorfos e atividade pozolânica adequada. Em contrapartida, as cinzas densas apresentaram elevada cristalinidade, sendo inertes. A moagem foi imprescindível para adequar o material, produzindo cinzas leves com granulometria similar à do cimento. A substituição parcial do cimento por essas cinzas leves processadas, em teores de até 25%, proporcionou resistência à compressão axial similar ou superior à referência. O ganho de resistência é explicado pelo efeito pozolânico contínuo em idades avançadas, evitando o efeito prejudicial de diluição observado com cinzas densas inertes. A CBCA leve processada atende, assim, aos requisitos técnicos de pozolana para aplicação na construção civil.

655

Palavras-chave: Concreto. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Compressão axial.

ABSTRACT: Concrete is recognized as the leading global construction material, but the manufacture of Portland cement is energy-intensive and responsible for high annual carbon dioxide emissions, exceeding 2.5 billion tons. The scarcity of traditional supplementary cementitious materials (SCM) is driving the search for agro-industrial byproducts, such as sugarcane bagasse ash (SCBA), whose global ash production reaches approximately 11.9 million tons annually. The potential of SCBA lies in its silica-rich composition, which makes it a pozzolanic material. This preliminary literature review evaluated the viability of SCBA as a partial cement substitute, focusing on its influence on axial compressive strength. The analyses indicate that viability depends on processing, as only fly ash demonstrated a high amorphous content and adequate pozzolanic activity. In contrast, dense ash exhibited high crystallinity and was inert. Grinding was essential to refine the material, producing fly ash with a particle size similar to that of cement. Partial replacement of cement with this processed fly ash, at levels up to 25%, provided axial compressive strength similar to or higher than the reference. The strength gain is explained by the continued pozzolanic effect at advanced ages, avoiding the detrimental dilution effect observed with inert dense ash. The processed lightweight SCBA thus meets the technical requirements for pozzolan for use in construction.

Keywords: Concrete. Sugarcane bagasse ash. Axial compression.

¹Acadêmico em engenharia civil pelo Instituto Federal de Alagoas.

²Doutorado em Química e Biotecnologia pela Universidade Federal de Alagoas.

RESUMEN: El hormigón es reconocido como el principal material de construcción a nivel mundial, pero la fabricación de cemento Portland consume mucha energía y genera elevadas emisiones anuales de dióxido de carbono, que superan los 2500 millones de toneladas. La escasez de materiales cementantes suplementarios (SCM) tradicionales impulsa la búsqueda de subproductos agroindustriales, como la ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA), cuya producción mundial de cenizas alcanza aproximadamente 11,9 millones de toneladas anuales. El potencial de la SCBA reside en su composición rica en sílice, lo que la convierte en un material puzolánico. Esta revisión preliminar de la literatura evaluó la viabilidad de la SCBA como sustituto parcial del cemento, centrándose en su influencia en la resistencia a la compresión axial. Los análisis indican que la viabilidad depende del procesamiento, ya que solo las cenizas volantes demostraron un alto contenido amorfo y una adecuada actividad puzolánica. Por el contrario, las cenizas densas mostraron una alta cristalinidad y fueron inertes. La molienda fue esencial para refinar el material, produciendo cenizas volantes con un tamaño de partícula similar al del cemento. La sustitución parcial del cemento por esta ceniza volante procesada, en concentraciones de hasta el 25%, proporcionó una resistencia a la compresión axial similar o superior a la de referencia. El aumento de la resistencia se explica por el efecto puzolánico continuo a edades avanzadas, lo que evita el efecto perjudicial de dilución observado con cenizas densas inertes. Por lo tanto, el SCBA ligero procesado cumple con los requisitos técnicos de la puzolana para su uso en la construcción.

Palabras clave: Hormigón. Ceniza de bagazo de caña de azúcar. Compresión axial.

I. INTRODUÇÃO

O concreto é reconhecido como o principal material de construção utilizado globalmente, sendo fundamental para a construção de infraestrutura e edificações há mais de 100 anos (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2018). Estima-se que, somente em 2020, foram produzidas 4,2 bilhões de toneladas de cimento e 14 bilhões de metros cúbicos de concreto em todo o planeta. No entanto, a fabricação do cimento Portland demanda um elevado consumo de energia e matérias-primas naturais, além de ser responsável por emissões globais de dióxido de carbono que superam 2,5 bilhões de toneladas anuais.

A crescente demanda por cimento e a escassez de materiais cimentícios suplementares (MCS) tradicionais, como cinzas volantes e escórias de alto-forno, impulsionam a busca por novas alternativas (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019), especialmente subprodutos de setores agroindustriais, alinhando-se a um cenário de economia circular.

Neste contexto, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) surge como uma alternativa promissora para aplicação em larga escala como MCS. A CBCA é um resíduo agroindustrial gerado a partir da queima do bagaço nas usinas de açúcar e álcool para geração de energia. A cana-de-açúcar é a maior cultura do planeta em termos de quantidade produzida, sendo o Brasil o maior produtor (DE MATOS; SANTOS; EICHLER, 2019; FAO, 2023). A

produção mundial de cana esteve na ordem de 1,9 bilhões de toneladas em 2022 (FAO, 2023), o que pode levar a uma geração anual de cerca de 11,9 milhões de toneladas de cinza no mundo (ABDALLA et al., 2024; DE MATOS; SANTOS; EICHLER, 2019; FAO, 2023).

O principal atrativo da cinza do bagaço para aplicações como MCS é sua composição química rica em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), que a configura como um potencial material pozolânico (MARTIRENA; MONZÓ, 2018; YADAV et al., 2020). Análises da CBCA mostram que ela é composta majoritariamente por sílica, com teores variando entre 54% e 87% (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2018; GONÇALVES et al., 2024; INTECHOPEN, 2018). A atividade pozolânica do material permite que ele reaja com o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento, formando compostos com capacidade aglomerante (HOPPE FILHO et al., 2017). Diversas pesquisas comprovaram os efeitos positivos da CBCA no desempenho mecânico (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009; BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; CORDEIRO et al., 2018).

Embora o potencial da CBCA seja alto, estudos ressaltam a sua grande heterogeneidade, pois a presença de contaminantes (como o quartzo) e as condições de queima do bagaço podem interferir significativamente na composição e reatividade, limitando seu uso como pozolânico (JITTIN; MINNU; BAHURUDEEN, 2021). A contaminação por quartzo foi mais evidente nas cinzas densas (bottom ash), que apresentaram elevada cristalinidade e baixa reatividade, indicando um comportamento inerte. Por outro lado, as cinzas leves (fly ash), expurgadas com os gases da queima, demonstraram alto teor de amorfos e adequada atividade pozolânica (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2018).

Pesquisas anteriores confirmam que a moagem das cinzas, que visa a redução do tamanho das partículas, é eficiente para melhorar a reatividade e o desempenho mecânico dos sistemas cimentícios. Cinzas leves com granulometria similar à do cimento, por exemplo, contribuíram com ganhos significativos de desempenho e resultaram em resistência à compressão similar ou superior à referência. No entanto, a adição de cinzas densas resultou na queda significativa da resistência, o que está relacionado ao efeito de diluição pela substituição parcial do cimento por um material de caráter inerte (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2018).

Dessa forma, o estudo preliminar de concreto com adição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar(CBCA): influência na compressão axial visa estudar referências bibliográficas para avaliar a viabilidade de utilizar este resíduo como substituto parcial do cimento.

2. MÉTODOS

2.1. Definição do escopo

O estudo delimitou como tema central a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como material cimentício suplementar. O foco principal foi avaliar sua influência na resistência à compressão axial do concreto, considerando tanto aspectos técnicos quanto ambientais.

2.2. Levantamento bibliográfico

O levantamento foi realizado em bases de dados científicas, além de normas técnicas. Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês, incluindo: “sugarcane bagasse ash”, “cement replacement”, “pozzolanic activity” e “compressive strength”.

2.3. Critérios de seleção

Foram incluídos estudos que apresentaram caracterização física, química e mineralógica da CBCA, bem como resultados experimentais. Foram excluídas pesquisas que não apresentaram dados quantitativos de resistência ou que se apenas a limitarem à caracterização preliminar do resíduo. Na figura 1 observa-se a cinza do bagaço da cana-de-açúcar sem a caracterização por peneiramento.

658

Figura 1 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar sem caracterização



Fonte: LIMA E FILHO, 2025

2.4. Tratamento das informações

As informações extraídas foram organizadas em quatro categorias de análise: composição física e química da CBCA;

influência da granulometria e da moagem;
distinção entre cinzas leves e densas;
comportamento mecânico em substituições parciais do cimento.

2.5. Análise crítica

A análise dos resultados para identificar a substituição do cimento pelo CBCA considerados viáveis em termos de desempenho à compressão axial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção evidencia estritamente na resistência à compressão axial onde a cinza do bagaço da cana-de-açúcar é empregada como substituto parcial do cimento. Buscando corroborar a cinza supracitada como possível material suplementar em concretos.

3.1. Caracterização da e Implicações na Substituição do Cimento

A adequação para a substituição de cimento é determinada por sua composição e processamento, que garantem a atividade pozolânica.

As cinzas, em geral, atendem aos requisitos químicos da NBR 12653 para materiais pozolânicos, com baixa Perda ao Fogo (abaixo de 6%) e a soma dos óxidos reativos (Sílica, Alumina e Óxido de Ferro) acima de 70% (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

A reatividade efetiva está ligada à fase em que a sílica se apresenta. Apenas as cinzas leves (fly ash) demonstraram alto teor de amorfos (entre 64,1% e 83,2%) e teor de sílica amorfa entre 24,7% e 42,6%, indicando potencial pozolânico.

As cinzas densas (bottom ash) apresentaram elevada cristalinidade, com altos teores de quartzo (superiores a 68%), e não atingiram os requisitos mínimos de atividade pozolânica, sendo inertes (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

O processamento por moagem foi imprescindível para adequar o material, produzindo cinzas leves com granulometria de cerca de 15 μm , similar à do cimento (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

As cinzas leves com igual ou inferior a 15 μm foram classificadas como pozolanas e podem ser usadas em substituição parcial ao cimento na construção civil (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

3.2. Justificativa em relação à influência à compressão axial

O efeito do ganho de resistência à compressão axial é explicado pela natureza pozolânica do material, o que evita o efeito prejudicial da diluição do cimento.

O aumento da resistência é consistente com os resultados que demonstram que as cinzas leves com finura semelhante ao cimento podem resultar em resistência à compressão similar ou superior à referência, mesmo com 25% de substituição do cimento, comprovando o benefício do efeito pozolânico (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

Em contrapartida, a adição de cinzas densas (materiais inertes) resulta em queda significativa da resistência das misturas cimentícias, o que está relacionado ao efeito de diluição causado pela substituição parcial do cimento por um material sem reatividade (SIQUEIRA; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2024).

A atividade pozolânica é um processo gradual que contribui com o ganho da compressão axial em idades mais avançadas da mistura cimentícia (após 28 dias), devido à reação contínua com o hidróxido de cálcio (CORDEIRO et al., 2018; MEMON et al., 2022; DE SIQUEIRA; CORDEIRO, 2022b; ABDALLA et al., 2024).

4. CONCLUSÃO

660

Sendo assim, verifica-se que a utilização da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar como substituto parcial do cimento se mostrou viável apenas quando o material foi processado adequadamente, de modo a obter cinzas leves com granulometria próxima à do cimento. Esse aspecto foi fundamental para garantir a reatividade do material, atendendo aos critérios estabelecidos pela NBR 12653 para materiais pozolânicos. A presença de sílica amorfa em teores significativos conferiu às cinzas a capacidade de atuar de forma efetiva na reação pozolânica, contribuindo para o desempenho mecânico das misturas.

Os resultados indicaram que a substituição parcial do cimento por cinzas leves proporcionou ganhos relevantes de resistência à compressão axial, sobretudo em idades mais avançadas, devido à reação contínua entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio. Essa característica permitiu que as misturas apresentassem resistências equivalentes ou superiores ao concreto de referência, mesmo em teores de substituição de até 25%, comprovando o potencial do material para aplicações na construção civil.

Em contraste, a utilização de cinzas densas, de caráter predominantemente cristalino e inerte, resultou em significativa redução da resistência mecânica das misturas. Esse

comportamento foi atribuído ao efeito de diluição do cimento, uma vez que a ausência de atividade pozolânica comprometeu a formação de compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado, responsáveis pelo aumento da resistência.

Dessa forma, conclui-se que a cinza leve do bagaço de cana, quando processada adequadamente, pode ser considerada uma alternativa sustentável e tecnicamente eficiente para a substituição parcial do cimento. Essa aplicação não apenas contribui para a redução do consumo de clínquer, como também agrega valor a um resíduo agroindustrial, promovendo benefícios ambientais e econômicos à cadeia produtiva da construção civil. Assim, sendo totalmente possível aplicar no concreto visando melhorias na propriedade mecânica de compressão axial.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, T. A. et al. 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.

ALMEIDA, R. P. A.; CORDEIRO, G. C. Sustainable approach to simultaneously improve the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash and the vinasse fertilization potential. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 13, 2023.

661

ALVARENGA, K. P.; CORDEIRO, G. C. Evaluating Sugarcane Bagasse Fly Ash as a Sustainable Cement Replacement for Enhanced Performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 2024.

ANDREÃO, P. V. et al. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. *Green Materials*, v. 7, n. 2, p. 61–70, 2019..

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 59, p. 77–88, 2015.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 32–45, 2015.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009.

CORDEIRO, G. C. et al. Long-term compressive behavior of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 46, n. 2, p. 564–573, 2018.

DE MATOS, M.; SANTOS, F.; EICHLER, P. Sugarcane world scenario. *SUGARCANE BIOREFINERY, TECHNOLOGY AND PERSPECTIVES*. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 1–19.

DE SIQUEIRA, A. A.; CORDEIRO, G. C. Properties of binary and ternary mixes of cement, sugarcane bagasse ash and limestone. *Construction and Building Materials*, v. 317, p. 126150, 2022.

DE SIQUEIRA, A. A.; CORDEIRO, G. C. Sustainable cements containing sugarcane bagasse ash and limestone: effects on compressive strength and acid attack of mortar. *Sustainability*, v. 14, n. 9, p. 5683, 2022.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAOSTAT. Crops and livestock products. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 20 set. 2024.

GONÇALVES, J. P. et al. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in construction: Challenges and opportunities. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 21, p. 9370, 2024.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade Pozolânica De Adições Minerais Para Cimento Portland (Parte I): Índice De Atividade Pozolânica (IAP) Com Cal, Difração De Raios-X (DRX), Termogravimetria (TG/DTG) E Chapelle Modificado. *Matéria*, v. 22, n. 3, 2017.

INTECHOPEN. SINGH, N. B.; SINGH, V. Sugarcane Bagasse Ash: A Renewable Waste for Sustainable Construction Materials. *Sustainable Construction Materials*. [S.l.]: IntechOpen, 2018.

JITTIN, V.; MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A. Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash. *Construction and Building Materials*, v. 273, p. 121679, 2021.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, v. 122, p. 257–273, 2019.

MARTIRENA, F.; MONZÓ, J. Vegetable ashes as supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 57–64, 2018.

MEMON, S. A. et al. Use of processed sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement: Mechanical and durability properties. *Buildings*, v. 12, n. 10, 2022.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018.

SIQUEIRA, A. A.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação da reatividade de diferentes cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar para aplicação como material cimentício suplementar. *CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 65., 2024.

YADAV, A. L. et al. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, v. 245, 2020.