ESTUDO COMPARATIVO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Comparative study of mortars produced with sugarcane bagasse ash

Bernardo Fonseca Dias
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG | bernardofdias@gmail.com

André Barroso Mourão
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG I andrebmourao@cefetmg.br

Ivan Batista Morais
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG I ivan@cefetmg.br

Lucas Thadeu da Silva Ramos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG I lucas.ramos@cefetmg.br

Rogério Cabral de Azevedo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG I rogeriocabral@cefetmg.br

RESUMO

O cimento Portland responde por 7% das emissões de CO_2 relacionadas à ação humana. A produção do clínquer, seu principal constituinte, demanda grande gasto de energia e emissões de CO_2. O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituição parcial ao cimento é uma alternativa para a redução desses impactos. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é um MCS rico em sílica amorfa, podendo melhorar propriedades de concretos e argamassas. Assim, este estudo avaliou os efeitos do uso de CBCA de origem da cachaça artesanal como MCS na produção de argamassas, analisando suas propriedades físicas e mecânicas (resistência à compressão e índice de absorção de água por imersão), comparando com outros resultados registrados na literatura. Foram produzidas argamassas com 0%, 10% e 20% de substituição do cimento por CBCA, em volume. A introdução da CBCA reduziu a resistência em menos de 10% e não aumentou a absorção das amostras.

Palavras-chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; Material cimentício suplementar; Cimento Portland; Argamassa; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Portland cement accounts for 7% of CO_2 emissions related to human action. The production of clinker, its main constituent, requires a great deal of energy and CO_2 emissions. The use of supplementary cementitious materials (SCM) as a partial replacement for cement is an alternative for reducing these impacts. Sugarcane bagasse ash (SBCA) is an SCM rich in amorphous silica and can improve the properties of concrete and mortar. Therefore, this study evaluated the effects of using SBCA from artisanal cachaça as a SCM in the production of mortars, analyzing its physical and mechanical properties (compressive strength and immersion water absorption index) and comparing them with other results obtained in the literature. Mortars were produced with 0%, 10% and 20% replacement of cement with SCBA, by volume. The introduction of SBCA reduced the strength by less than 10% and did not increase the water absorption of the samples.

Keywords: Sugarcane bagasse ash; Supplementary cementitious materials; Portland cement; Mortar; Environmental sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de Cimento Portland responde por cerca de 7% das emissões mundiais de CO_2 inerentes às ações antrópicas (SNIC, 2019) e sua produção anual é estimada em 4,1 bilhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por 65 milhões deste volume (IPCC, 2022; USGS, 2023). Além disso, a produção de uma tonelada de cimento consome em média 1,6 toneladas de recursos naturais (Bullard *et al*., 2011). Em 2021, cada tonelada de cimento produzida no planeta resultou na emissão de 633 kg de gás carbônico na atmosfera (SNIC, 2022).

O clínquer é o principal constituinte do cimento Portland e sua fabricação requer grande consumo energético e queima de combustível, sendo responsável por 90% das emissões ocorridas durante a fabricação do cimento (Moumin *et al.,* 2020; Berenguer *et al.,* 2020). Segundo Scrivener *et al*. (2018), a redução da emissão de carbono da cadeia produtiva do cimento passa por duas estratégias principais: maior uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) com baixo CO_2 associado em substituição parcial ao clínquer e o uso mais eficiente do cimento Portland em argamassas e concretos. Adicionados ao cimento Portland, os MCS melhoram as propriedades de argamassas e concretos como aumento da resistência (LI *et al*., 2023; Matos Neto *et al*., 2015), redução do consumo do cimento (Magalhães *et al*., 2018; De Souza Morais *et al*., 2018; KIM *et a*l., 2023; YE *et al*., 2023), do calor de hidratação e da carbonatação (Duarte *et al*., 2022; Martins *et al*., 2021), além de aumentar a resistência química e a durabilidade (Pires *et al*., 2022).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é uma alternativa de MCS, pois contém alto teor de sílica amorfa, o que favorece o seu uso como material pozolânico e contribui para a melhoria das propriedades dos compostos cimentícios (Bezerra *et al*., 2017; Payá *et al*., 2002). A CBCA origina-se da queima do bagaço da cana, processo que visa gerar bioeletricidade dentro da matriz sucroalcooleira (Paris *et al*., 2016). Embora existam na literatura estudos que avaliam a reutilização da CBCA como MCS, a maioria dessas pesquisas fez uso de cinzas oriundas de grandes indústrias sucroalcooleiras e poucos estudos avaliaram o reuso de CBCA originárias da produção da cachaça artesanal.

O presente trabalho visa estudar os efeitos do uso da CBCA de origem da cachaça artesanal como substituição parcial ao cimento Portland sobre as propriedades das argamassas cimentícias e comparar seus resultados com aqueles obtidos por argamassas produzidas com a incorporação de CBCA de origem industrial. Além disso, o presente estudo visa contribuir para o fortalecimento do arranjo produtivo local, por meio do reaproveitamento de um resíduo gerado pela indústria da cachaça no setor da construção civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: cimento CP-V-ARI, cimento com maior teor de clínquer e menor quantidade de adições disponível no mercado permitindo uma análise mais isolada dos efeitos da introdução da CBCA; CBCA: coletada na empresa Decisão, produtora de cachaça artesanal, localizada em Sabinópolis-MG; areia normal brasileira, adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas; e água fornecida pela COPASA, distribuidora da cidade de Belo Horizonte.

A CBCA foi submetida ao peneiramento na malha de 2,4 mm para retirada de impurezas maiores (Figura 1) e na malha de 600 µm para retirada de contaminantes menores e moída em moinho de bolas cerâmicas durante uma hora.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). A massa específica da CBCA e do cimento foi determinada a partir do ensaio de picnometria com gás He. A cinza foi submetida aos ensaios de Difração de Raios-X (DRX), para identificação das principais fases cristalinas, espectroscopia por Fluorescência de Raios-X (FRX), para determinação da composição de óxidos, e determinação da granulometria por raios laser.

A produção das argamassas seguiu a NBR 7215 (ABNT, 2019). Conforme Quadro 1, foram elaborados três dosagens: Referência (REF), com 0% de CBCA; CBCA-10 e CBCA-20, com 10% e 20% de substituição do cimento por cinzas, em volume.

Figura 1: Peneiramento da CBCA



Fonte: os autores, 2025.

Quadro 1: Traços de argamassas

Argamassa	Cimento (g)	CBCA (g)	Ligante (g)	Areia (g)	Água (g)	Água / ligante (massa)	Água / ligante (volume)
REF	624,00	0	624,00	1872	300	0,481	1,455
CBCA-10	561,60	51,63	613,23			0,489	
CBCA-20	499,20	103,27	602,47			0,498	

Fonte: autores, 2025.

As amostras foram submetidas ao ensaio de compressão axial após 7, 28 e 90 dias de cura submersa em solução de água saturada com cal hidratada. Também foi realizado o ensaio de absorção por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), após 28 dias de cura.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Observou-se que o peneiramento e a moagem conferiram maior homogeneidade à amostra de CBCA. A CBCA e o cimento apresentaram massa específica de 2,505 g/cm^3 e 3,050 g/cm^3 (ensaio de picnometria) e estes valores foram usados de base para o cálculo das dosagens das argamassas. Com relação à granulometria, a cinza apresentou um diâmetro médio de 31,33 µm.

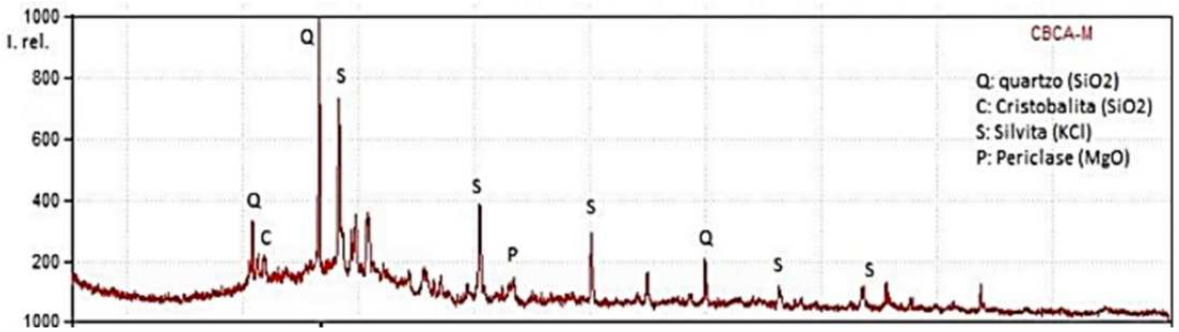
A Tabela 1 e a Figura 2 exibem os principais componentes identificados no FRX e DRX, respectivamente:

Tabela 1: Composição química da CBCA

Principais elementos	Percentual
SiO_2	32,63%
K_2O	30,70%
Cao	12,80%
Fe_2O_3	5,73%
Al_2O_3	4,18%
P_2O_5	3,95%
SO_3	3,28%
Cl	3,16%
MgO	1,98%

Fonte: autores, 2025

Figura 2: Difratograma da CBCA



Fonte: autores, 2025.

A predominância de sílica se manteve em comparação com a CBCA de origem industrial (PAULA *et al*., 2009; BEZERRA, *et al*., 2017). Porém, a CBCA de origem da cachaça artesanal apresentou grande parcela de óxido de potássio, provavelmente pelo uso de agrotóxicos ou de fertilizantes. Esta alta concentração de K_2O merece atenção, pois o mesmo pode contribuir para a ocorrência das reações álcali-agregados em artefatos de concreto (Mourão; Paula, 2022).

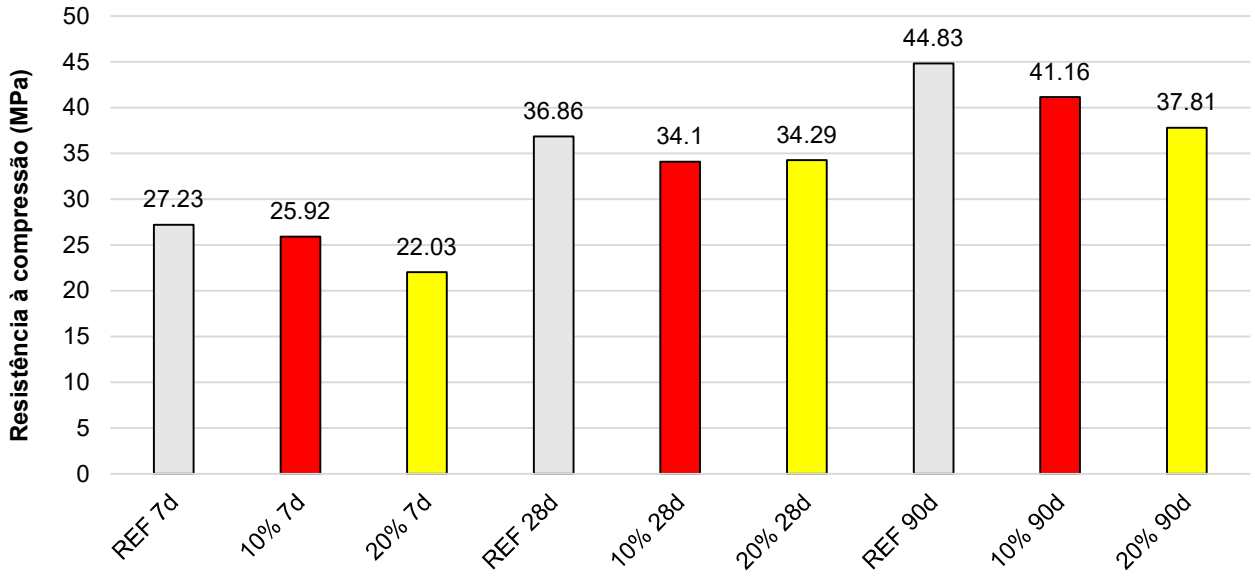
Os resultados para o teste de compressão axial estão dispostos no Quadro 2 e na Figura 3.

Quadro 2: Resultados de resistência à compressão

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)				Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Percentual em relação à REF
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4			
REF	7	28,27	25,72	28,38	26,56	27,23	1,308	100,00%
	28	35,47	36,34	38,83	38,81	37,36	1,720	100,00%
	90	44,35	43,42	45,69	45,86	44,83	1,157	100,00%
CBCA-10	7	25,30	26,45	25,46	26,46	25,92	0,624	95,19%
	28	37,78*	34,28	34,43	33,59	34,10	0,448	91,27%
	90	42,10	42,76	40,40	39,36	41,16	1,556	91,81%
CBCA-20	7	26,02*	21,68	21,23	23,19	22,03	1,027	80,90%
	28	31,09*	34,04	35,14	33,70	34,29	0,753	91,78%
	90	39,72	36,33	39,90	35,29	37,81	2,349	84,34%
* Valor eliminado por apresentar desvio superior a 6% em relação à média								

Fonte: autores, 2025.

Figura 3: Resultados de resistência à compressão.



Fonte: autores, 2025.

Os resultados das médias obtidas por CBCA-10 apresentaram diferença inferior a 10% em relação à REF, para todas as idades. Já a dosagem CBCA-20 registrou decréscimos de 19,09% e de 15,65% em relação a REF, aos 7 e 90 dias, respectivamente. Os valores de resistência, em comparação com outros estudos (Paula *et al*., 2009; Bezerra *et al*., 2017), foram inferiores, tanto nos corpos de prova com uso de CBCA quanto nos de referência, sugerindo que o cimento utilizado, bem como a execução de ensaios e da própria produção de argamassas, possam ter interferido na resistência dos corpos de prova.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o resultado das dosagens CBCA-10 e CBCA-20 superam a resistência mínima exigida para diversas classes dos cimentos CP II e CP III, que por sua vez apresentam adições minerais e menor teor de clínquer.

Quadro 3: Resultados de absorção de água

Argamassa	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Massa submersa (g)	Absorção de água
REF	411,89	442,80	245,58	7,50%
CBCA-10	405,74	437,37	241,73	7,80%
CBCA-20	406,12	435,60	240,58	7,26%

Fonte: autores, 2025.

Os valores de absorção (Quadro 3) foram muito similares para todas as amostras, o que evidencia que a introdução das cinzas não modificou a porosidade aberta das argamassas, constatação positiva do ponto de vista da durabilidade. A CBCA de origem industrial utilizada por Bezerra *et al*. (2017) também não gerou alterações no índice de absorção das argamassas, para os mesmos teores de substituição.

4 CONCLUSÕES

A introdução da CBCA não prejudicou a resistência à compressão das argamassas, com o melhor desempenho obtido pelas amostras com 10% de substituição, dentre as dosagens com cinzas. O desempenho mecânico das amostras com cinzas foi superior ao desempenho estabelecido por norma para algumas classes de cimento.

A substituição parcial do cimento pela CBCA não gerou nenhum aumento da porosidade aberta à água das amostras, fato positivo do ponto de vista da durabilidade. Destaca-se o alto teor de K_2O que pode gerar a formação de reações álcali-agregado em concretos e argamassas e sugere-se o estudo futuro dessas reações com o uso da CBCA de origem da cachaça artesanal.

O uso da CBCA como MCS é viável diante do viés técnico e também ambiental, visto que sua aplicação pode reduzir o consumo de cimento e clínquer, minimizando a emissão de CO_2 da sua respectiva indústria e reaproveitando um resíduo da indústria sucroalcooleira.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-MG, à CAPES e à FAPEMIG pelo financiamento e apoio a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697** -Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

BERENGUER, R. A. *et al.* Sugarcane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103655, abr. 2020.

BEZERRA, A. C. DA S. *et al.* Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. **Revista Matéria,** v. 22, n. 1, 2017.

BULLARD, J. W. *et al.,* 2011. “Mechanisms of cement hydration”, **Cement and Concrete Research**, v. 41, 1208-1223.

DE MAGALHÃES, L. F. et al. Iron Ore Tailing as Addition to Partial Replacement of Portland Cement. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 125–130, set. 2018.

DE SOUZA MORAIS, I. *et al.* Sericitic Phyllite as Addition in Portland Cement. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 131–136, set. 2018.

DUARTE, M. S. *et al.* Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. **Journal of Building Engineering,** v. 59, p. 105099, nov. 2022.

IPCC. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf>.

KIM, J. *et al.* Utilization of Different Forms of Demolished Clay Brick and Granite Wastes for Better Performance in Cement Composites. **Buildings,** v. 13, n. 1, p. 165, 9 jan. 2023.

LI, J. *et al.* Mechanical Properties and Microstructure Analysis of Cement Mortar Mixed with Iron Ore Tailings. **Buildings**, v. 13, n. 1, p. 149, 6 jan. 2023.

LORENA FIGUEIREDO MARTINS, M. *et al.* Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125172, dez. 2021.

MATOS NETO, J. A. DE *et al.* Sterile Clay Pozzolans from Phosphate Mining. **Materials Research,** v. 18, n. suppl 2, p. 230–234, 17 nov. 2015.

MOUMIN, G. *et al.* CO_2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1578–1596, jan. 2020.

MOURÃO, A. B.; DE PAULA, J. N. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça como substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias. 4º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, Salvador-BA, Brasil, 2022.

PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1–18, maio 2016.

PAULA, M. O. *et al.* Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.13, n.3, p.353–357, 2009

PAYÁ, J. *et al.* Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology,** v. 77, n. 3, p. 321–325, mar. 2002.

PIRES, M. *et al.* Phosphate rock waste in the production of cement tile. **Results in Engineering,** v. 16, p. 100701, dez. 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, dez. 2018.

SINDICATO NACIONAL DE CIMENTO PORTLAND. SNIC. **Relatório Anual**, 2019.

SINDICATO NACIONAL DE CIMENTO PORTLAND. SNIC. **Relatório Anual**, 2021.

UN-DESA. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420) Demographic Research. New York: [s.n.].

URATANI, J. M.; GRIFFITHS, S. A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South. **Energy Research and Social Science**, v. 97, 2023.

USGS. Mineral Commodity Summaries 2023. St. Louis: [s.n.]. Disponível em:<chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>