AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO DESEMPENHO MECÂNICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS

Evaluation of the partial replacement of cement with sugarcane bagasse biochar on the mechanical performance of cementitious pastes

Rafaela de Jesus Paula
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | rafaela.0692969@discente.uemg.br

Jaqueline do Carmo Lima
Universidade Federal de Itajubá | Itabira, Minas Gerais | jaqueline.z.lima@unifei.edu.br

Antônio Teodoro Dutra Júnior
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | antonio.0694018@discente.uemg.br

Filipe Gomes Fagundes
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | fgfagundes@gmail.com

Evaneide Nascimento Lima
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | evaneide.lima@uemg.br

Robson Pereira de Lima
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | robson.lima@uemg.br

Carlos Augusto de Souza Oliveira
Universidade Federal de Itajubá | Itabira, Minas Gerais | carlosoliveira@unifei.edu.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

Alan Rodrigues Teixeira Machado
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | alan.machado@uemg.br

RESUMO

A indústria da construção civil é uma grande emissora de CO_2, especialmente na produção de cimento. Para contribuir com o desenvolvimento de materiais que possam auxiliar no combate às emergências climáticas, este estudo investigou a substituição parcial do cimento CPV-ARI por biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar como material cimentício suplementar. O biocarvão foi obtido por pirólise e caracterizado por análise imediata. Pastas cimentícias foram preparadas com substituições de 0%, 2% e 5% m/m e relações água/cimento de 0,28 e 0,35. Após 7 dias, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão e caracterização microestrutural por MEV/EDS. A incorporação de 5% m/m de biocarvão, com relação água/cimento de 0,35, aumentou a resistência mecânica em 48%. A análise morfológica indicou interações entre o biocarvão e os produtos de hidratação. Assim, pode-se afirmar que o biocarvão se destaca como potencial alternativa para a redução das emissões de CO_2 na construção civil.

Palavras-chave: Biocarvão, Cimento, Carbono, Bagaço, Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The construction industry is a major emitter of CO_2, particularly due to cement production. In order to contribute to the development of materials that can aid in addressing climate emergencies, this study investigated the partial replacement of CPV-ARI cement with sugarcane bagasse biochar as a supplementary cementitious material. The biochar was produced via pyrolysis and characterized through proximate analysis. Cement pastes were prepared with 0%, 2%, and 5% w/w replacements and water-to-cement ratios of 0.28 and 0.35. After 7 days, the specimens were subjected to compressive strength testing and microstructural characterization by SEM/EDS. The incorporation of 5% w/w biochar, with a water-to-cement ratio of 0.35, resulted in a 48% increase in mechanical strength. Morphological analysis indicated interactions between the biochar and hydration products. Therefore, biochar stands out as a promising alternative for reducing CO_2 emissions in the construction sector.

Keywords: Biochar, Cement, Carbon, Bagasse, Sugarcane.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, em busca de atingir a meta de neutralidade de emissão de carbono até 2050, tem adotado alternativas sustentáveis, como materiais cimentícios suplementares (MCS), para reduzir o consumo de cimento e, consequentemente, as emissões de CO_2 (Kushwah *et al*., 2024). Essa iniciativa contribui diretamente para o alcance das metas globais de redução de emissões, uma prioridade diante da crescente preocupação com as mudanças climáticas.

Nesse contexto, o biocarvão, um material obtido por pirólise de biomassa, surge como uma alternativa promissora para a construção civil. Além de atuar como material cimentício suplementar, reduzindo a necessidade de cimento e, por consequência, as emissões de CO_2 associadas à sua produção (Aneja *et al*., 2022), o biocarvão é um material carbonáceo que permite a captura de carbono. Assim, pode ser utilizado para o sequestro de carbono em materiais cimentícios (Gupta *et al*., 2018a), ampliando ainda mais seus benefícios ambientais. A sua incorporação em materiais cimentícios não apenas mitiga os impactos ambientais da construção, mas também favorece a inovação e evolução do setor (Gupta *et al*., 2021).

O Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, atingiu 713,2 milhões de toneladas na safra 2023/2024 (CONAB, 2024), destinando a maior parte à produção de açúcar e etanol, o que gera subprodutos como o bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Para cada tonelada de cana processada, estima-se 260 a 280 kg de BCA, tradicionalmente usado para geração de energia. No entanto, seu excedente pode ser convertido em produtos de alto valor agregado, como o biocarvão (Carvalho *et al*., 2025).

Com base no exposto, o biocarvão se apresenta como uma solução inovadora que não apenas reduz as emissões de CO_2, mas também contribui ativamente para a mitigação das mudanças climáticas, tornando o setor da construção mais sustentável e de baixo carbono. Assim, este trabalho analisou a substituição parcial do cimento por biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar nas proporções de 0%, 2% e 5% m/m, avaliando seu efeito nas propriedades mecânicas do material.

2 METODOLOGIA

2.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO

O biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar foi produzido por pirólise em reator horizontal contínuo. A temperatura de pirólise na zona intermediária do reator foi de aproximadamente 350 ºC. O material obtido foi moído em graal com pistilo e peneirado em peneira de 75 µm. Posteriormente, foi submetido à análise imediata conforme a norma NBR 8112 (ABNT, 1986) para determinação do teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo.

2.2 CORPOS DE PROVA

As misturas das pastas cimentícias foram moldadas em corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, seguindo a NBR 7215 (ABNT, 2019), para os ensaios de resistência à compressão. Os testes foram realizados após 7 dias de cura, utilizando duas relações água/cimento (a/c): 0,28 e 0,35. As pastas foram preparadas em uma argamassadeira elétrica de bancada, e a moldagem foi feita manualmente. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram curados por imersão em água saturada com cal por 7 dias. Após esse período, foram submetidos ao ensaio de compressão em máquina universal de ensaios (EMIC DL20000, Instron, São José dos Pinhais, Paraná, Brasil). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância inicialmente, e posteriormente discriminados pelo teste de Scott-Knott (p <0,05).

2.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA

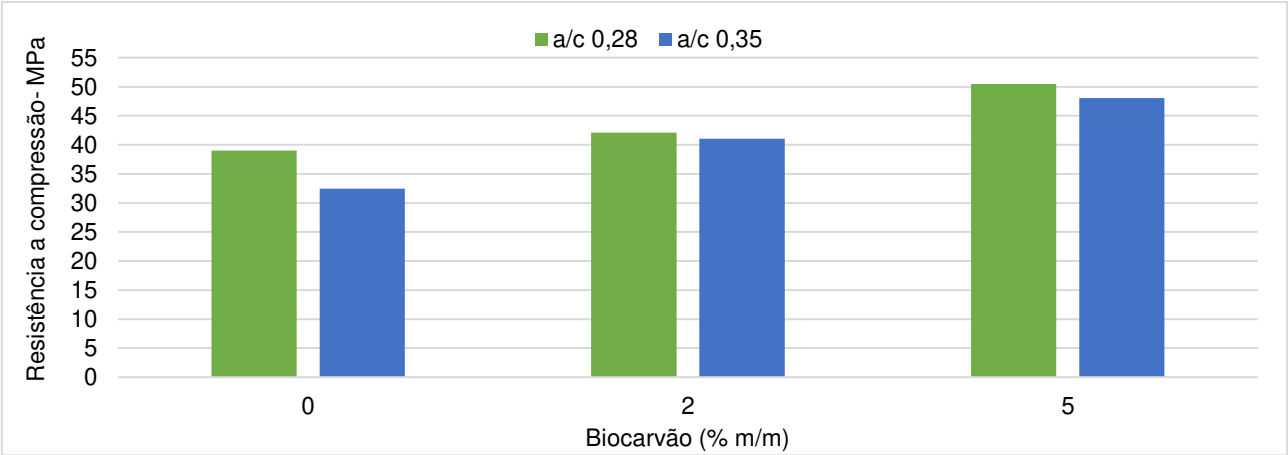
Após o rompimento, partes das amostras fraturadas foram secas em estufa por 24 horas. Em seguida, as amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro-paládio por pulverização catódica (SC7620, Quorum Technologies, Ashford, Reino Unido). A morfologia foi investigada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o equipamento Vega 3 LMU (TESCAN, Brno-Kohoutovice, República Tcheca).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição imediata do biocarvão produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar indica seu potencial para atividade pozolânica e sequestro de carbono. Os resultados obtidos foram: carbono fixo (68,2 %); cinzas (10,6%); e materiais voláteis (21,2%). O alto teor de carbono fixo (68,2%) sugere a formação de carbono estável, favorecendo sua aplicação no armazenamento de carbono (Veiga *et al*., 2017; Rezende *et al*., 2011). Além disso, o teor de cinzas (10,6%) pode contribuir para reações pozolânicas, promovendo interações com materiais cimentícios (Paula *et al*., 2008; Lima, Rossignolo, 2009). A baixa fração de materiais voláteis (21,2%) indica uma pirólise eficiente na decomposição da biomassa, resultando em um biocarvão com maior estabilidade.

Os ensaios de compressão das pastas cimentícias com 7 dias de cura mostraram que a adição de 2% m/m de biocarvão não teve efeito estatisticamente significativo na resistência à compressão para a relação a/c de 0,28 (p >0,05). No entanto, para a relação a/c de 0,35, houve um aumento de aproximadamente 26% (Gráfico 1). Por outro lado, com a adição de 5% m/m de biocarvão, observaram-se aumentos expressivos de resistência, alcançando 29% e 48% para as relações a/c de 0,28 e 0,35, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Kashuwah *et al*. (2024), que identificaram aumento na resistência das pastas cimentícias à medida que a concentração de biocarvão aumentava. No entanto, com o aumento do percentual de biocarvão o espalhamento diminuiu, devido à alta capacidade de absorção de água do biocarvão, afetando a trabalhabilidade, (Gupta *et al*., 2018b). Além disso, é importante destacar que o aumento da relação a/c reduziu a resistência mecânica da pasta cimentícia, como esperado, devido à maior porosidade causada pelo excesso de água. A pasta controle (0% m/m de biocarvão) apresentou resistência média de 39,01 MPa para a relação a/c de 0,28 e de 32,47 MPa para a relação a/c de 0,35, representando uma redução de aproximadamente 17%. No entanto, as pastas contendo 2% m/m e 5% m/m de biocarvão com relação a/c de 0,35 apresentaram resistências superiores à da pasta referência (a/c = 0,28), atingindo 41,03 MPa e 48,05 MPa, respectivamente. Esses resultados sugerem que o biocarvão pode contribuir para a melhoria da microestrutura do material, tornando-se uma alternativa promissora para a otimização das propriedades mecânicas de materiais cimentícios.

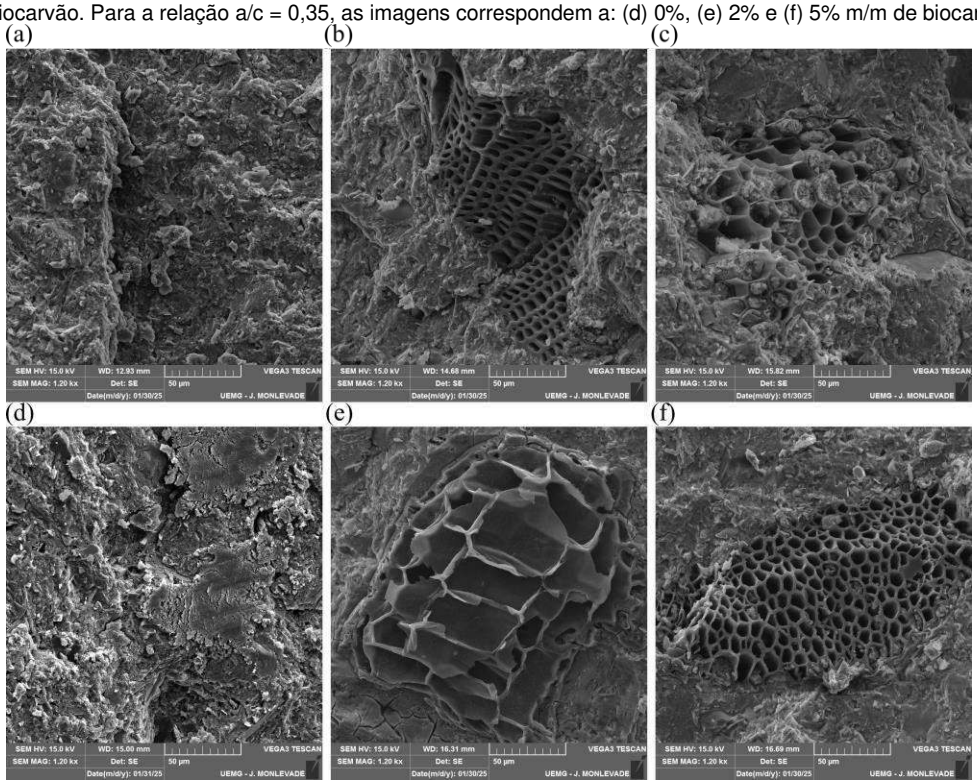
Gráfico 1: Resistencia à compressão ao 7 dias de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento por biocarvão.



Fonte: Os autores

Para analisar as mudanças morfológicas, as pastas cimentícias com 7 dias de cura foram examinadas por MEV (Figura 1). As micrografias revelam que a estrutura do biocarvão não foi alterada após sua incorporação às pastas cimentícias, mantendo sua porosidade e morfologia semelhante a um favo de mel. Nas micrografias não foram observadas grandes aglomerações de partículas de biocarvão, indicando uma boa dispersão de biocarvão na matriz cimentícia. Foi observado também uma boa aderência do biocarvão a matriz cimentícia e aos produtos de hidratação do cimento. A homogeneidade visual da pasta também sugere essa interação eficiente entre os materiais. Além disso, observa-se que, nas pastas cimentícias com substituição de 2% e 5% m/m de biocarvão e relações a/c de 0,28 (Figura 1b-c) e 0,35 (Figura 1d-f), há formação de produtos de hidratação da matriz cimentícia ao redor e dentro dos poros do biocarvão. Sugerindo a formação de géis de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), e etringita. De fato, a presença do biocarvão parece favorecer a hidratação do cimento, conforme evidenciado pelo aumento da quantidade de produtos de hidratação na matriz cimentícia (Chen *et al*., 2022; Qin *et al*., 2021). Esse efeito pode ser atribuído à liberação gradual de água pelo biocarvão durante o processo de cura, além da interação entre sua estrutura porosa e os compostos hidratados do cimento, como discutido por Choi *et al*. (2012).

Figura 2: Micrografias de pastas cimentícias com substituição parcial do cimento por biocarvão. As amostras foram preparadas com duas relações água/cimento (a/c): 0,28 e 0,35. Para a relação a/c = 0,28, as imagens correspondem a: (a) 0%, (b) 2% e (c) 5% m/m de biocarvão. Para a relação a/c = 0,35, as imagens correspondem a: (d) 0%, (e) 2% e (f) 5% m/m de biocarvão.



Fonte: Os autores

4 CONCLUSÃO

Os dados preliminares indicam que o biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar tem potencial como substituto parcial do cimento, aumentando a resistência à compressão em até 48%, dependendo da relação água/cimento. A maior substituição testada (5% m/m) apresentou melhorias significativas. As pastas preparadas com biocarvão tiveram aumento dos compostos de hidratação comparadas com a pasta referência. Além disso, a substituição parcial do cimento por biocarvão contribui para a sustentabilidade, reduzindo a demanda por cimento, um dos principais emissores de CO_2 na construção civil. Dessa forma, seu uso pode auxiliar na redução da pegada de carbono e no cumprimento das metas de neutralidade climática até 2050. Para viabilizar sua aplicação prática, novos ensaios serão realizados, incluindo testes de trabalhabilidade e a adição de superplastificantes, visando melhorar a fluidez da mistura sem comprometer a resistência. O teor de carbono fixo do biocarvão contribui para o sequestro de carbono, reduzindo as emissões líquidas de gases de efeito estufa. Esses estudos contribuirão para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis e de alto desempenho, portanto, soluções promissoras e vantajosas das Engenharias.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ-02998-22) e à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG [Pesquisador de Produtividade da UEMG – PQ/UEMG]) pelo apoio financeiro e pelas bolsas concedidas. Esta pesquisa utilizou, e expressa sua gratidão, às instalações disponibilizadas pelo Laboratório de Materiais Inovadores Sustentáveis (LAB-MIS) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) que contribuiu para a obtenção dos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

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

CARVALHO, Jaqueline do Carmo Lima; SILVA, Nathalia Eugênia; PATROCÍNIO, Marina Costa; FERREIRA, Osania Emerenciano; LIMA, Robson Pereira de; OLIVEIRA, Magno André de; DUMONT, Marcello Rosa; BEZERRA, Augusto César da Silva & MACHADO, Alan Rodrigues Teixeira. Biochar prepared from sugarcane bagasse for the clarification of brown sugar solutions. **Sugar Tech**, v.27, p. 478-487, 2025. doi: https://doi.org/10.1007/s12355-024-01517-7.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série história. 2024 Disponível em: https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica Acesso em 16 jan.2025.

CHOI, Won Chang, YUN Hyun-Do, LEE Jan Yeon. Mechanical proprieties of mortar containing bio-char from pyrolysis. **Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection**, v.16, n.3, p.67-74, 2012. doi: https://doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.3.067.

CHEN, Liang., ZHANG, Yuying., LABIANCA, Claudia., WANG, Lei., RUAN, Shaoqin., POON, Chi Sun., OK, Yong Sik., TSANG, Daniel C. W. Carbon-negative cement-bonded Biochar particleboards. **Biochar**, v. 4, n. 58, 2022. doi: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00185-8.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; KOH, Hui Jun. Application of Biochar from food wood waste as green admixture for cement mortar. **Science of the Total Environment**, v. 619-620, p. 419-435, 2018a. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; PANG, Sze Dai. Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical proprieties and economic viability. **Construction of Building Materials**, v. 167, n.10, p. 874-889, 2018b. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.104

GUPTA, Souradeep., MUTHUKRISHNAN, Shravan., KUA, Harn Wei. Comparing influence of inert biochar and silica rich biochar on cement mortar – Hydration kinetics and durability under chloride and sulfate environment. **Construction of Building Materials**, v.268, p. 121142, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121142.

KUSHWAH, Sini; SINGH, Shweta; AGARWAL, Rachit; NIGHOT, Nikhil Sanjay; KUMAR, Rajest; ATHAR, Humaira; NAIK B, Srinivasarao. Mixture of biochar as a green additive in cement-based materials for carbon dioxide sequestration. **Journal of Materials Science: Materials in Engineering**, v.19, n. 27, 2024. doi: https://doi.org/10.1186/s40712-024-00170-y.

LIMA, S.A.; ROSSIGNOLO, J.A.; Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X. **Matéria (Rio J.)**, v.14, n.1, p. 680-688, 2009. doi: https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000100002.

PAULA, Marcos O.; TINÔCO, Ilda de F.F.; RODRIGUES, Conrado de S.; SILVA, Elizabeth N.; SOUZA, Cecília de F.; Potencial da cinza do bagaço de 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. doi: https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019.

QIN, Yinghong.; PANG, Xijun., TAN, Kanghao.; BAO, Ting.; Evaluation of previous concrete performace with pulverized biochar as cement replacement. **Cement and Concrete Composites**, v.19, p. 104022, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104022.

REZENDE, E.I.P.; ANGELO, L.C; DOS SANTOS, S.S; MANGRICH, A.S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual Química**, v.3 n.5, p.426-433, 2011. doi :https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110046.

VEIGA, Tais Regina Lima Abreu; LIMA, José Tarcísio; DESSSIMONI, Anelise Lima de Abreu; PEGO, Matheus Felipe Freire Pego; SOARES, Jenaina Ribeiro; TRUGILHO, Paulo Fernando. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne** v.23, n.4, p. 529-536, 2017. doi: https://doi.org/10.