BIOCHAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO DO POTENCIAL USO DO BIOCHAR EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA MELHORIA DE SUAS PROPRIEDADES

Biochar in civil construction: review of the potential use of biochar in cementitious materials for improving properties

Giovana Biscotto de Carvalho
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | giovana.carvalho@ufv.br

Julia Luiza Monteiro Lopes
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | julia.monteiro@ufv.br

Bernardo Victor Silva de Andrade
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | bernardo.victor@ufv.br

Angélica de Cássia Carneiro
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | cassiacarneiro@ufv.br

Filipe Emerick Caldeira
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | filipe.caldeira@ufv.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Outro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

Jane Aparecida dos Santos
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | jane.santos@ufv.br

José Maria Franco de Carvalho
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | josemaria.carvalho@ufv.br

Gustavo Emílio Soares de Lima
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | gustavo.lima@ufv.br

Leonardo Gonçalves Pedroti
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | leonardo.pedroti@ufv.br

Resumo

O uso do biochar em materiais de construção civil surge como um potencial solução para melhorar propriedades mecânicas e físicas, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental. Este trabalho revisa as aplicações do biochar em materiais cimentícios, como argamassa e concreto, incluindo sua utilização como substituto de agregados e cimento, bem como filler e aditivo, através de publicações indexadas entre 2020 e 2025. Diante disso, nota-se que o biochar melhora a resistência à compressão, reduz a retração autógena e aumenta a durabilidade dos compósitos cimentícios. Adicionalmente, explora-se o potencial do biochar em materiais sensores, devido à sua condutividade elétrica, reforçando sua versatilidade tecnológica. Com base na análise bibliográfica, destaca-se a viabilidade técnica e ambiental do uso do biochar na construção civil, alinhando-se aos princípios da economia circular e da redução de emissões de gases de efeito estufa. Este panorama busca incentivar novos estudos e aplicações práticas.

Palavras-chave: Biochar; Argamassa; Propriedades Cimentícias; Sustentabilidade; Resíduos.

ABSTRACT

The use of biochar in construction materials emerges as a potential solution to improve mechanical and physical properties, in addition to contributing to environmental sustainability. This work reviews the applications of biochar in cementitious materials, such as mortar and concrete, including its use as a substitute for aggregates and cement, as well as filler and additive, through N publications indexed between 2020 and 2025. Therefore, it is noted that biochar improves compressive strength, reduces autogenous shrinkage, and increases the durability of cementitious composites. Additionally, the potential of biochar in sensor materials is explored, due to its electrical conductivity, reinforcing its technological versatility. Based on the bibliographic analysis, the technical and environmental feasibility of using biochar in construction is highlighted, aligning with the principles of the circular economy and the reduction of greenhouse gas emissions. This overview seeks to encourage new studies and practical applications.

Keywords: Biochar; Mortar; Cementitious Properties; Sustainability; Waste.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico global. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a receita bruta das empresas brasileiras da construção civil ultrapassou 467 bilhões de reais em 2022, representando 4,6% do Produto Interno Bruto. No entanto, o setor também é responsável por cerca de 40% do uso de energia e um terço das emissões mundiais de gases de efeito estufa (Pearce, Ahn, 2017), destacando-se pelo consumo intensivo de recursos naturais e pela geração de resíduos e poluentes em diversas etapas.

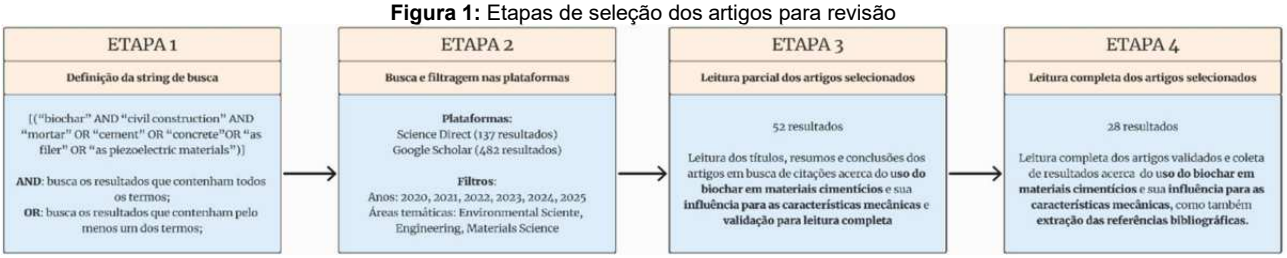
Nesse cenário, o desenvolvimento de materiais sustentáveis é um dos principais desafios da construção. O biochar, material sólido carbonáceo oriundo da decomposição termoquímica de biomassa (Sirico *et al.,* 2022), apresenta-se como uma solução promissora. Produzido a partir de resíduos como cascas de arroz, serragem, bambu e resíduos urbanos (Ye, 2025), o biochar possui alta estabilidade, baixa densidade e capacidade de melhorar propriedades mecânicas e térmicas de compósitos cimentícios. Estudos como o de Chen *et al.* (2022) indicam que 1 tonelada de biochar pode capturar entre 2,0 e 2,6 toneladas de dióxido de carbono, reforçando seu papel como agente de sequestro de carbono. Além disso, sua decomposição extremamente lenta relatada por estudos de longevidade (Kuzyakov *et al.,* 2014) contribui para a durabilidade ambiental dos materiais produzidos.

Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo analisar artigos acerca da aplicação do biochar em diferentes frentes, tais como substituição de agregados e cimento, bem como seu emprego como aditivo e filler. A análise buscou evidenciar os benefícios e limitações associados ao uso do biochar, além de incentivar novas pesquisas e fomentar aplicações práticas voltadas à promoção da construção civil sustentável.

2 METODOLOGIA

Este estudo apresenta uma revisão sistemática sobre as aplicações do biochar em materiais cimentícios na construção civil. A seleção da literatura seguiu quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Etapas de seleção dos artigos para revisão



Fonte: Autores, 2025

Na Etapa 1, foi definida a string de busca para identificação de estudos pertinentes. A Etapa 2 envolveu a pesquisa em bases acadêmicas como Google Scholar e ScienceDirect, além de sites de instituições reconhecidas, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Na Etapa 3, filtros automáticos foram aplicados para refinar os resultados e delimitar o foco temático. Na Etapa 4, procedeu-se à análise de títulos, resumos e conclusões, selecionando 28 artigos publicados entre 2020 e 2025, que fundamentaram a construção dos resultados acerca do potencial do biochar na construção civil, organizados conforme tópicos específicos de aplicação.

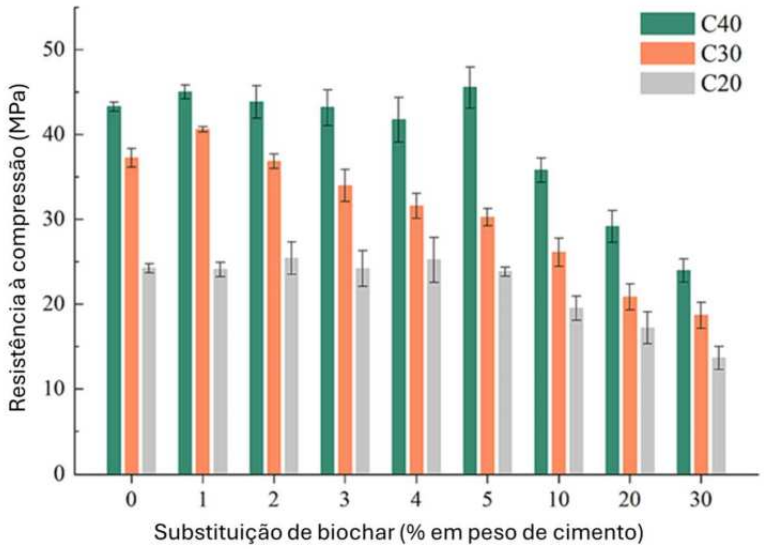
3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os estudos sobre a aplicação do biochar na construção civil cresceram nos últimos anos, impulsionados por suas propriedades que melhoram o desempenho de materiais cimentícios, geopolímeros, cerâmicos, entre outros. Os artigos analisados mostram que a incorporação, adição ou substituição de componentes por biochar pode impactar significativamente características mecânicas, durabilidade e sustentabilidade de argamassas e concretos. Investiga-se o uso do biochar como substituto de agregados, cimento ou materiais cimentícios suplementares, além de sua atuação como filler e sua aplicação como sensores eletroquímicos, promovendo a modificação e melhoria dos compósitos.

3.1 ADIÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

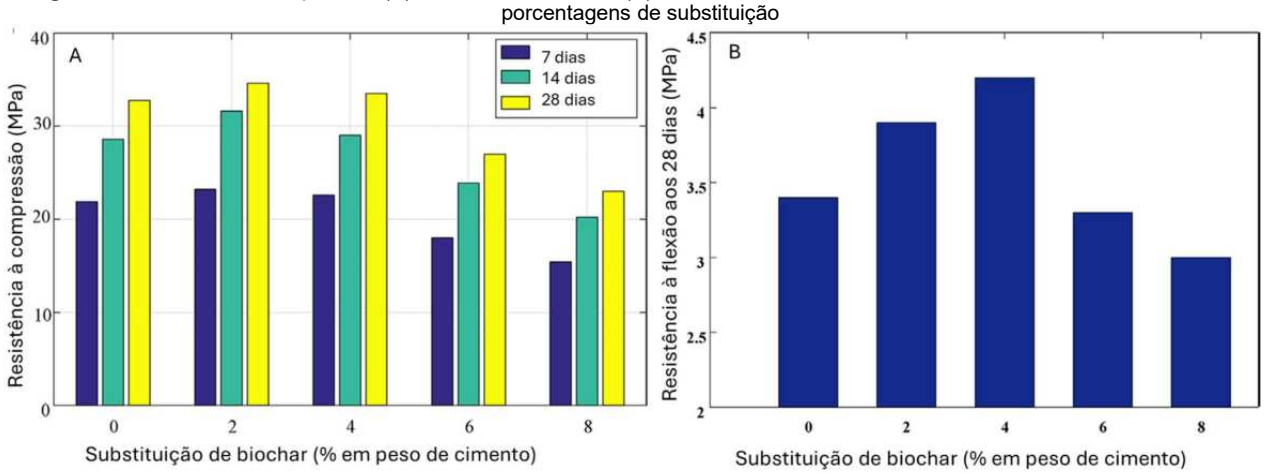
Estudos recentes destacam o biochar como alternativa viável para substituição parcial do cimento em concretos e argamassas, com potencial de reduzir emissões de carbono associadas ao Cimento Portland (Tan, Kang-Hao *et al.,* 2021). De modo geral, a maior porosidade do biochar reduz a trabalhabilidade das misturas (Yang,Wang, 2021; Jia *et al*., 2023). Porém, substituições de até 10% podem manter ou melhorar a resistência à compressão, enquanto teores superiores reduzem essa propriedade (Yang, Wang, 2021; Hylton, 2024; Aneja, Sharma, Singh, 2022; Jia *et al.,* 2023; Lin *et al.,* 2023; Wang *et al.,* 2025). Resultados positivos também foram observados para a resistência à flexão (Aneja, Sharma E Singh, 2022; Jia et al., 2023). Jia *et al.* (2023) verificaram melhoria de até 9% na resistência à compressão com substituições de até 5% de cimento por biochar, enquanto teores entre 10% e 30% acarretaram perdas de até 46%, conforme mostrado na Figura 2. Para a resistência à flexão, somente a substituição de 30% do cimento por biochar levou à redução. Aneja, Sharma e Singh (2022) observaram em sua pesquisa com concreto que a incorporação de até 4% de biochar elevou a resistência à compressão em 2,32%, à flexão em 23,52% e a durabilidade em 17,30%. Teores superiores a 4%, contudo, resultaram em perdas nessas propriedades, como apresentado na Figura 3.

Figura 2: Resistência à compressão do concreto C40, C30 e C20 contendo biochar de resíduos sólidos urbanos em diferentes porcentagens de substituição



Fonte: Jia et al., 2023

Figura 3: Resistência à compressão (A) e resistência à flexão (B) do concreto contendo biochar de casca de arroz em diferentes porcentagens de substituição



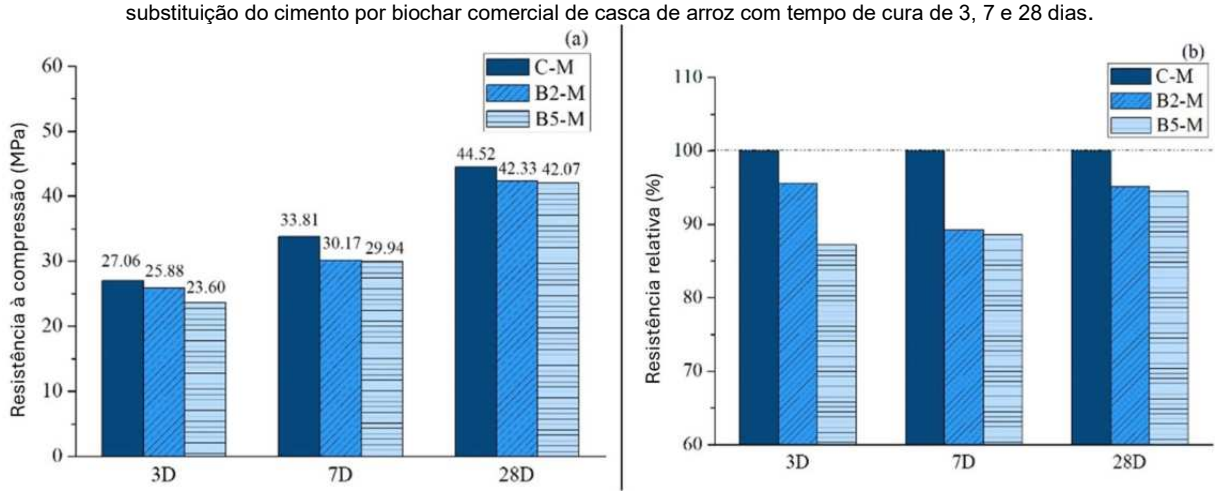
Fonte: Jia et al., 2023

Em argamassas, comportamento semelhante foi observado. Yang e Wang (2021) e Hylton (2024) reportaram resistências à compressão equivalentes ou superiores à referência com até 10% de substituição do cimento por biochar, conforme mostrado nas Figuras 4 e 5. Wang et al. (2025) constataram reduções entre 10% e 30% de substituição. Liu *et al.* (2022) identificaram melhor desempenho com 1% de biochar, registrando até

22% de aumento na resistência aos 7 dias e valores entre 15 e 18 MPa aos 40 dias, além de maior resistência à propagação de fissura, na substituição ao cimento.

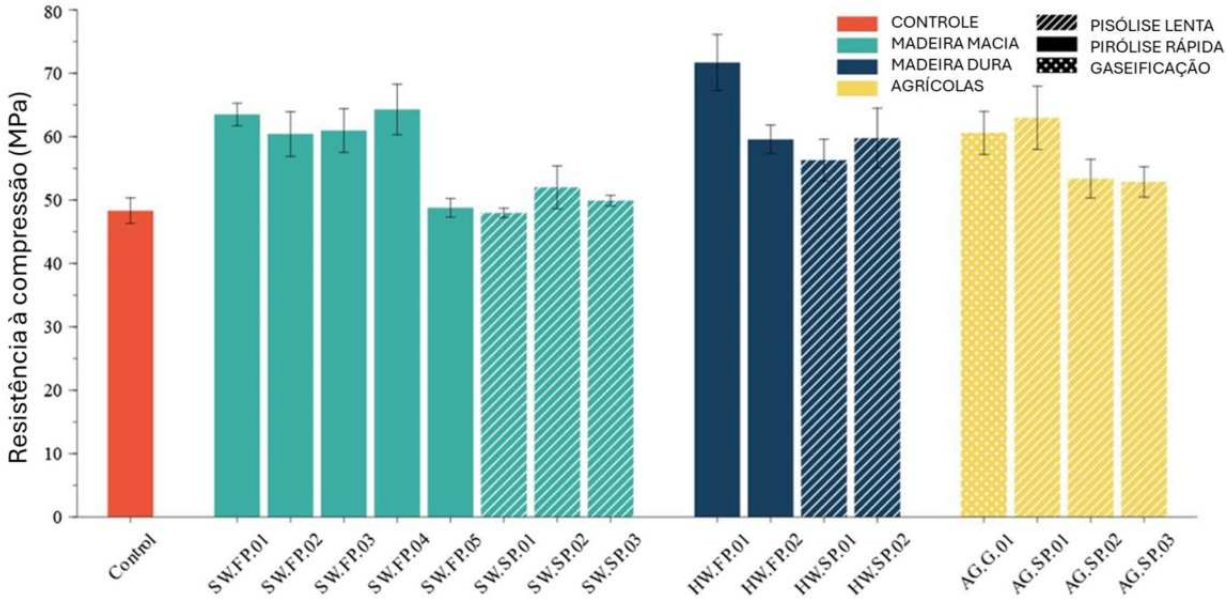
Por outro lado, teores acima de 3% comprometeram a formação da matriz cimentícia, resultando em menor capacidade de resistência às fissuras e redução da resistência à compressão. Em termos de fluidez, Tan et al. (2020) observaram diminuição progressiva com o aumento da adição, associada à estrutura porosa e alta capacidade de troca catiônica do biochar. A pirólise a 400 °C minimizou perdas de 5% a 30% na fluidez, devido ao caráter hidrofílico do material.

Figura 4: (a) Resistência à compressão e (b) Resistência relativa à compressão de corpos de prova de argamassa com 2% e 5% de substituição do cimento por biochar comercial de casca de arroz com tempo de cura de 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Yang, Wang, 2021

Figura 5: Resistência à compressão das argamassas de cimento com 10% de substituição de biochar produzidos a partir de diversas biomassas após cura por 28 dias. As barras de erro indicam o desvio padrão das amostras triplicadas testadas



Fonte: Hylton, 2024

O biochar também tem sido avaliado como substituto parcial da sílica ativa, uma adição comum ao concreto. Gupta *et al.* (2020) constataram que a substituição de 33% da sílica ativa por biochar reduziu a retração autógena, mantendo taxas de hidratação e resistência à compressão similares às obtidas em misturas com sílica pura. A combinação de 5% de biochar e 10% de sílica ativa, ambos em peso de cimento, promoveu reduções de 61% na retração autógena e de 23% na retração por secagem em 91 dias, quando comparado a misturas com 15% (em peso de cimento) de sílica ativa, resultado atribuído à atuação do biochar como agente de cura interna e redistribuindo a umidade.

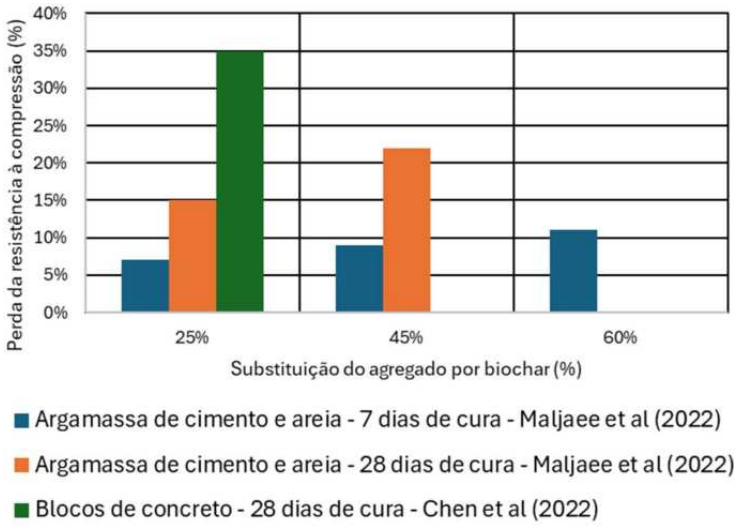
Outra aplicação do biochar em compósitos cimentícios é como filler (carga). Suas partículas finas aumentam a densidade de empacotamento da mistura, preenchendo vazios entre grãos de cimento e areia, melhorando a retenção de água, reduzindo a trabalhabilidade e o tempo de pega (Tan *et al.,* 2020). Estudos indicam que

adições em torno de 2% (em peso) promovem ganhos na resistência à compressão em argamassas (Gupta *et al.,* 2018; Danish *et al.,* 2020), enquanto percentuais de 5% levaram a reduções entre 5,23% e 13,21% em relação à referência (Gupta et al., 2020). Esse teor também elevou ligeiramente a viscosidade, favorecendo a fluidez e possibilitando a autoadensabilidade (Mendes, 2017). Em concretos, o uso como filler reduziu a densidade linear, melhorou o desempenho acústico (200 a 2000 Hz) e diminui a condutividade térmica em cerca de 0,192 W/mK para adições de 1% a 2% (Cuthbertson *et al.,* 2019). Almeron *et al.* (2024) observaram redução de cerca de 20% no coeficiente de absorção sonora entre 250 e 2000 Hz com 15% de substituição, sem, contudo, classificar o material como absorvedor de som.

3.2 SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS

A substituição de agregados por biochar nos compósitos possibilita maior incorporação do material sem comprometer o teor de ligante, embora modifique as propriedades do compósito. Chen *et al.* (2022) estudaram a substituição de agregados reciclados finos (0–5 mm) e grossos (5–10 mm) do Hong Kong EcoPark por até 30% de biochar em blocos de concreto, observando que o aumento do teor de biochar favoreceu a hidratação, mas reduziu a resistência à compressão em até 35% aos 28 dias. Maljaee *et al.* (2022), ao substituir 25%, 45% e 60% da areia grossa em argamassas de cimento por biochar, registraram reduções de resistência à compressão de 7%, 9% e 11% aos 7 dias, chegando a uma redução de 22% aos 28 dias na mistura com 60% de substituição, em comparação às argamassas com agregados convencionais. Na Figura 6 são apresentados os dados das pesquisas citadas acima.

Figura 6: Redução percentual da resistência à compressão de compósitos cimentícios com substituição dos agregados miúdos por biochar



Fonte: Autores, 2025

3.3 UTILIZAÇÃO COMO SENSORES PIEZORESISTIVOS

Quando se busca produzir sensores de base cimentícia, uma opção é o uso de filler para melhorar as propriedades piezoresistivas, reduzindo a resistividade elétrica. Os materiais mais comuns na literatura para esse fim são Carbon Black (Han *et al.,* 2014), nanotubos de carbono (Konsta-Gdoutos, Aza, 2014) e grafeno (Verma *et al.,* 2021), todos compostos de carbono em escala nanométrica, que demonstram eficácia na melhoria das propriedades elétricas e piezoresistivas de compósitos cimentícios. Recentemente, o biochar tem sido estudado como alternativa mais ecológica na produção desses sensores. Trabalhos que utilizaram diferentes tipos de biochar, substituindo parcialmente o cimento em até 15%, observaram redução da resistividade elétrica dos compósitos (Haque *et al.,* 2021; Jeong *et al.,* 2022; Ahmed *et al*., 2024). Haque *et al*. (2021) reportaram redução de 23% na resistividade de argamassas com substituição parcial do Cimento Portland por biochar, enquanto Ahmed *et al.* (2024) alcançaram 68% de redução com 15% de adição de biochar.

4 CONCLUSÕES

A análise da literatura recente evidencia que o biochar possui grande potencial técnico e ambiental para aplicação em materiais cimentícios como concretos e argamassas. Sua utilização como aditivo, filler ou substituição parcial de cimento e agregados pode melhorar a resistência mecânica, a durabilidade, a eficiência

térmica e propriedades acústicas e piezoresistivas dos compósitos, além de reduzir retrações autógenas e emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Contudo, o desempenho depende de fatores como o tipo de biomassa, a temperatura de pirólise, a granulometria e a dosagem aplicada. Quando empregados em proporções inferiores a 10% do volume de cimento ou agregados, os ganhos são expressivos, enquanto dosagens excessivas tendem a prejudicar a matriz cimentícia devido à elevada porosidade e absorção de água. Destaca-se ainda que a substituição de cimento é mais estudada, enquanto a substituição de agregados demanda avanços experimentais.

Assim, recomenda-se o desenvolvimento de metodologias de produção padronizadas, tratamentos de superfície para o biochar e a criação de normas técnicas específicas, além de análises de viabilidade econômica. Consolidar o biochar como material estratégico exige superar desafios técnicos e validar seu desempenho em escala real, impulsionando um setor construtivo mais inovador e sustentável.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa – MG, pela formação acadêmica e apoio institucional, ao grupo de pesquisa de Biochar do Laboratório de Materiais de Construção (LMC), pelo incentivo e pelas discussões que enriqueceram a elaboração deste estudo, e ao professor Leonardo Pedroti, pela orientação, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições técnicas durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AHMED, S.; REHMAN, A.; AMJAD, A.; HASIB, M. H.; HUSSAIN, F.; KHAN, A. Q.; KHUSHNOOD, R. A. Development of multifunctional cementitious composite using biochar. **Journal of Building Engineering**, 96, 110598. Acesso em: 26 abr. 2025. doi: https://dx.doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110598

ALMERON, M. M.; FERREIRA, S. D.; MAREZE, P. H.; & GODINHO, M. Mechanical and acoustic performance of mortar with partial replacement by biochar from civil construction wood waste at advanced ages. **Construction and Building Materials**, 428, 136281. Acesso em: 28 abr. 2025. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136281

AMAN, A. M. N., SELVARAJOO, A., LAU, T. L., & CHEN, W. H. Biochar as Cement Replacement to Enhance Concrete Composite Properties: A Review. **Energies 2022**, Vol. 15, Page 7662, 15(20), 7662. doi: https://dx.doi.org/10.3390/en15207662

ANEJA, Akash; SHARMA, R. L.; SINGH, Harpal. Mechanical and durability properties of biochar concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3724-3730, 2022. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.371

BARBHUIYA, Salim; DAS, Bibhuti Bhusan; KANAVARIS, Fragkoulis. Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. **Case Studies in Construction Materials**, v.22, e02859, 2024. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859

CHEN, Liang et al. Biochar-augmented carbon-negative concrete. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, p. 133946, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721055194?via%3Dihub>. Acesso em: 10 mar. 2025. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.133946

CUTHBERTSON, Douglas et al. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. **Biomass and bioenergy**, v. 120, p. 77-83, 2019. doi: https://dx.doi.org/10.1080/19648189.2021.2021998

DANISH, Aamar et al. Reusing biochar as a filler or cement replacement material in cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124295, 2021. doi: https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124295

GUPTA, Souradeep; KRISHNAN, Padmaja; KASHANI, Alireza; KUA, Harn Wei. Application of biochar from coconut and wood waste to reduce shrinkage and improve physical properties of silica fume-cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 262, n 120688, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120688

HAN, B. et al. Carbon nanotube-based cementitious composites: a review. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 19, p. 6599-6613, 2014. doi:https://doi.org/10.1177/15280837241262

HAQUE, M. I. et al. Production of sustainable, low-permeable and self-sensing cementitious composites using biochar. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 28, n. e00279, jul. 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00279

HYLTON, Julia et al. Relevant biochar characteristics influencing compressive strength of biochar-cement mortars. **Biochar**, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2024. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2022.** IBGE 2022 .Disponível em: < https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html >. Acesso: 11 fev. 2025.

JEONG, Junyoung et al. Ecofriendly and electrically conductive cementitious composites using melamine-functionalized biochar from waste coffee beans. **Crystals**, v. 12, n. 6, p. 820, 2022. doi: https://doi.org/10.3390/cryst12060820

JIA, Yaqi et al. Effect of biochar from municipal solid waste on mechanical and freeze–thaw properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 368, 130374, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130374

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; AZA, C. A. Self-sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 162-169, 2014. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.003

KUZYAKOV, Y.; Bogomolova, I.; Glaser, B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific 14C analysis. **Soil Biol. Biochem**. 2014, 70, 229–236.

LIN, Xuqun et al. Biochar-cement concrete toward decarbonisation and sustainability for construction: Characteristic, performance and perspective. **Journal of Cleaner Production**, 138219, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138219

LIU, Wen; LI, Kangning; XU, Shilang. Utilizing bamboo biochar in cement mortar as a bio-modifier to improve the compressive strength and crack-resistance fracture ability. **Construction and Building Materials**, v. 327, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126917

MALJAEE, Hamid et al. Sustainable lightweight mortar using biochar as sand replacement. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 16, p. 8263-8279, 2022. doi: https://doi.org/10.1080/19648189.2021.2021998

MENDES, M., Bauer, E., & Silva, F. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. Matéria (rio De Janeiro), 22(4), e–11878. 2017. doi: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0212

PEARCE, Annie R.; AHN, Yong Han. Sustainable buildings and infrastructure: paths to the future. Abingdon: Routledge, 2012. Disponível em: https://www.routledge.com/Sustainable-Buildings-and-Infrastructure-Paths-to-the-Future/Pearce-Ahn/p/book/9780415690928. Acesso em: 28 abr. 2025.

SIRICO, Alice; BELLETTI, Beatrice; BERNARDI, Patrizia; MALCEVSCHI, Alessio; PAGLIARI, Federico; FORNONI, Paolo; MORETTI, Emanuele. Effects of biochar addition on long-term behavior of concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 162, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103626

SUAREZ-RIERA, Daniel; *et al.* The effect of different biochar on the mechanical properties of cement-pastes and mortars. **Buildings**, 2023, 13, 2900.. doi: https://doi.org/10.3390/buildings13122900

TAN, Kanghao; PANG, Xijun; QIN, Yinghong; WANG, Junsong. Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 262, 120616, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.12061

TAN, Kang-Hao et al. Biochar as a partial cement replacement material for developing sustainable concrete: an overview. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 12, p. 03121001, 2021.. doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003987

VERMA, Praveen; CHOWDHURY, Rajib; CHAKRABARTI, Anupam. Papel dos materiais à base de grafeno (GO) na melhoria das propriedades físico-químicas de nanocompósitos cimentícios: uma revisão. **Journal of Materials Science** v. 56, n. 35, p. 19329-19358, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110963

WANG, Tianyu et al. Sustainable and mechanical properties of Engineered Cementitious Composites with biochar: Integrating micro-and macro-mechanical insight. **Cement and Concrete Composites**, v. 155, n. 105813, 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105813

YANG, Xu; WANG, Xiao-Yong. Hydration-strength-durability-workability of biochar-cement binary blends. **Journal of Building Engineering,** v. 42, 103064, 2021.doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103064

YE, Ping et al. The state-of-the-art review on biochar as green additives in cementitious composites: performance, applications, machine learning predictions, and environmental and economic implications. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 21, 2025. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00423-1