

BIOCHAR EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DAS TENDÊNCIAS DE PESQUISA**BIOCHAR IN CEMENTITIOUS MATERIALS: A BIBLIOMETRIC REVIEW OF RESEARCH TRENDS****BIOCHAR EN MATERIALES CEMENTICIOS: UNA REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA DE LAS TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN**

10.56238/revgeov17n2-072

Jackson Cesar Lopes de Santana

Graduado em Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: jackson_jcls@ufrj.br

Danieli Martins do Carmo

Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: danielimartins@ufrj.br

Antonieta Middea

Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros

Instituição: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)

E-mail: AMIDDEA@cetem.gov.br

Everton Rangel Bispo

Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos

Instituição: Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM)

E-mail: prof.evertonrangel@gmail.com

Desiree Lorryne dos Santos Silva

Mestranda em Ciência e Tecnologia de Polímeros

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto de Macromoléculas Professora

Eloisa Mano

E-mail: depirez@ima.ufrj.br

Aline Ramos Portella

Doutoranda em Engenharia Ambiental

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: alineportella@ufrj.br



Eduardo da Cunha Hora Paraíso

Mestre em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: eduardocunha@ufrj.br

Renata Nunes Oliveira

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: renatanunes.ufrj@gmail.com

Antonio Renato Bigansolli

Doutor em Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: bigansolli@ufrj.br

RESUMO

A busca por alternativas capazes de reduzir o impacto ambiental dos materiais cimentícios tem intensificado o interesse pelo biochar como componente funcional em concretos e argamassas. Produzido pela pirólise de diferentes biomassas, esse material rico em carbono apresenta elevada porosidade, estabilidade estrutural e composição química favorável à interação com matrizes à base de cimento. Essas características têm motivado investigações sobre seu desempenho mecânico, influência microestrutural e contribuição para estratégias de sequestro de carbono. Estudos recentes apontam que pequenas frações de biochar podem modificar processos de hidratação, aprimorar a zona de transição interfacial e atuar no refinamento da rede porosa, refletindo em ganhos de resistência e durabilidade em determinadas condições com parâmetro definidos. Em paralelo, sua incorporação oferece potencial para a diminuição de emissões associadas à produção de cimento e valorizar resíduos agrícolas, florestais e urbanos. A análise bibliométrica realizada na base Scopus evidencia a expansão global desse campo de pesquisa na última década, com ênfase no desempenho mecânico, sustentabilidade, microestrutura e sequestro de carbono. O conjunto de informações reunidas permitiu compreender as tendências atuais, identificar limitações e apontar direções que podem ser exploradas para o desenvolvimento de compósitos mais eficientes.

Palavras-chave: Biochar. Concreto. Materiais Cimentícios. Sustentabilidade. Análise Bibliométrica.**ABSTRACT**

The search for alternatives capable of reducing the environmental impact of cementitious materials has intensified the interest in biochar as a functional component in concrete and mortars. Produced through the pyrolysis of different biomasses, this carbon-rich material features high porosity, structural stability, and a chemical composition favorable to interaction with cement-based matrices. These characteristics have motivated investigations into its mechanical performance, microstructural influence, and contribution to carbon sequestration strategies. Recent studies indicate that small fractions of biochar can modify hydration processes, enhance the interfacial transition zone, and act in the refinement of the pore network, resulting in gains in strength and durability under specific conditions with defined parameters. In parallel, its incorporation offers the potential to decrease emissions associated with cement production and to add value to agricultural, forestry, and urban waste. The bibliometric analysis conducted in the Scopus database highlights the global expansion of



this research field over the last decade, with emphasis on mechanical performance, sustainability, microstructure, and carbon sequestration. The gathered information allowed for an understanding of current trends, identification of limitations, and pointing out directions that can be explored for the development of more efficient composites.

Keywords: Biochar Concrete. Cementitious Materials. Sustainability. Bibliometric Analysis.

RESUMEN

La búsqueda de alternativas capaces de reducir el impacto ambiental de los materiales cementicios ha intensificado el interés en el biochar como componente funcional en hormigones y morteros. Producido mediante la pirólisis de diversas biomasas, este material rico en carbono presenta una alta porosidad, estabilidad estructural y una composición química favorable para la interacción con matrices cementicias. Estas características han motivado investigaciones sobre su desempeño mecánico, influencia microestructural y contribución a las estrategias de secuestro de carbono. Estudios recientes indican que pequeñas fracciones de biochar pueden modificar los procesos de hidratación, mejorar la zona de transición interfacial y actuar en el refinamiento de la red de poros, resultando en ganancias de resistencia y durabilidad bajo condiciones específicas con parámetros definidos. En paralelo, su incorporación ofrece el potencial de disminuir las emisiones asociadas a la producción de cemento y de agregar valor a los residuos agrícolas, forestales y urbanos. El análisis bibliométrico realizado en la base de datos Scopus destaca la expansión global de este campo de investigación durante la última década, con énfasis en el desempeño mecánico, la sostenibilidad, la microestructura y el secuestro de carbono. La información recopilada permitió comprender las tendencias actuales, identificar limitaciones y señalar direcciones que pueden ser exploradas para el desarrollo de compuestos más eficientes.

Palabras clave: Hormigón con Biochar. Materiales Cementicios. Sostenibilidad. Análisis Bibliométrico.



1 INTRODUÇÃO

O concreto, composto classicamente por cimento Portland, agregados e água, permanece o principal material da construção civil devido à moldabilidade, resistência mecânica e ampla disponibilidade de matérias-primas (COUTO et al., 2013). A elevada pegada de carbono da produção de cimento tem impulsionado o estudo de materiais cimentícios alternativos e adições minerais capazes de melhorar o desempenho e reduzir emissões de CO₂, destacando-se o biochar, obtido por pirólise de biomassa e caracterizado por estrutura porosa, alta área superficial e potencial de sequestro de carbono (BARBUIYA; DAS; KANAVARIS, 2024). O biochar altera a microestrutura de compósitos cimentícios, influenciando hidratação, empacotamento de partículas e retenção de água, podendo aumentar resistência e durabilidade por micropreenchimento e interação química com produtos de hidratação, ao mesmo tempo em que fixa carbono de forma estável (CHEN et al., 2024; PANG et al., 2024; EE et al., 2025). A adoção do biochar, contudo, enfrenta desafios operacionais decorrentes de variabilidade em granulometria, porosidade e teor de carbono, o que demanda rigor no controle de qualidade, ajustes de dosagem e maior complexidade de processamento (REVATHI et al., 2024). Essa variabilidade, associada ao tipo de biomassa e às condições de pirólise ou carbonização hidrotérmica, aproxima o tema dos princípios da Engenharia de Materiais e de estratégias de economia circular baseadas no aproveitamento de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais (CHEN et al., 2024; PANG et al., 2024). Estudos recentes analisam concretos convencionais e misturas com adições combinadas, como zeólicas ou biochars hidrotérmicos, consolidando o biochar como alternativa promissora para conciliar desempenho estrutural e sustentabilidade em matrizes cimentícias (PANG et al., 2024).

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema decorre da necessidade de mitigar o impacto ambiental da construção civil, em especial das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento Portland, e de desenvolver compósitos cimentícios que aliem desempenho técnico e menor pegada de carbono (CHEN et al., 2024). O biochar destaca-se por sua estrutura carbonosa estável, elevada área superficial, microporosidade e composição química, atuando como substituinte parcial do cimento ou aditivo funcional capaz de densificar a matriz, ajustar a distribuição granulométrica e melhorar propriedades mecânicas, permeabilidade e resistência a agentes agressivos (BARBUIYA; DAS; KANAVARIS, 2024; MAHMOUD et al., 2025; KIRAN et al., 2025). A forte dependência entre tipo de biomassa, parâmetros de pirólise e propriedades finais reforça o alinhamento do tema com a Engenharia de Materiais e com estratégias de economia circular baseadas no uso de resíduos de diferentes cadeias produtivas (PANG et al., 2024; EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2020). Além disso, a estabilidade da estrutura aromática do biochar permite que ele funcione como reservatório de carbono



de longa duração quando incorporado ao concreto, contribuindo para tecnologias de sequestro e armazenamento de carbono alinhadas às metas globais de transição para sistemas construtivos mais sustentáveis (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Nesse contexto, uma revisão sobre biochar em materiais cimentícios é oportuna e tecnicamente relevante, pois integra processamento, microestrutura, propriedades e impactos ambientais, sistematizando avanços recentes e orientando novos desenvolvimentos em compósitos mais eficientes e duráveis (DE GUZMAN et al., 2025).

1.2 OBJETIVO

Os objetivos específicos deste trabalho são: caracterizar os processos de produção e as principais propriedades do biochar, explicando seus mecanismos de atuação em matrizes cimentícias; avaliar sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto; analisar seus benefícios ambientais, especialmente no sequestro de carbono; realizar análise bibliométrica para mapear tendências de pesquisa na área; e identificar desafios e perspectivas futuras para o uso do biochar em materiais cimentícios.

2 MECANISMOS DE AÇÃO DO BIOCHAR EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

O biochar modifica a microestrutura do concreto por sua elevada porosidade e área superficial, que favorecem a retenção e a liberação gradual de água, intensificando a hidratação, melhorando o empacotamento dos sólidos e reduzindo vazios nocivos pelo efeito de micropreenchimento (SUN et al., 2025). Grupos funcionais oxigenados em sua superfície atuam como sítios de nucleação de produtos hidratados, influenciando a formação de C–S–H e densificando a zona de transição pasta-agregado, o que potencializa ganhos de resistência, sobretudo em idades iniciais (WANG et al., 2025; PANG et al., 2024).

A presença de sílica e alumina na matriz carbônica do biochar permite interações com o hidróxido de cálcio, produzindo efeitos pozolânicos que geram C–S–H secundário e refinam a rede porosa (DE GUZMAN et al., 2025). Em condições de alta temperatura, sua estrutura aromática estável altera a propagação de fissuras e o comportamento residual do concreto, resultando em menor degradação térmica, ainda que respostas distintas sejam observadas em função da textura superficial e da granulometria de biochars oriundos de diferentes resíduos agrícolas (EE et al., 2025; WANG et al., 2025).

A rede de poros interconectados também favorece a captação e a difusão de CO₂, acelerando a carbonatação e promovendo o sequestro de dióxido de carbono e a formação de carbonatos estáveis que densificam a matriz ao longo do tempo (PANG et al., 2024). Em misturas com zeólitas, ocorre sinergia entre a microporosidade do biochar e o efeito de peneira molecular, ampliando a adsorção de CO₂, enquanto tratamentos hidrotermais, como em biochar de borra de café, reorganizam grupos



funcionais e aumentam sua estabilidade estrutural e interação com o cimento (YE et al., 2025; MAHMOUD et al., 2025).

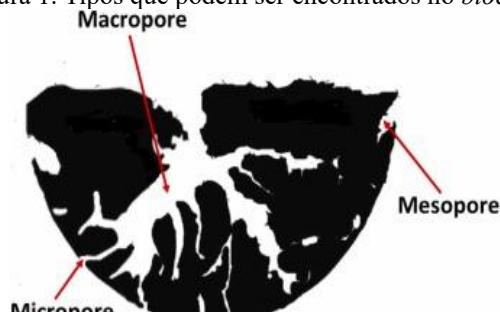
Outro mecanismo relevante é o papel do biochar como reservatório interno de água, o que suaviza gradientes de umidade, reduz tensões de retração e preenche vazios críticos, elevando a estabilidade do concreto frente a ciclos térmicos e ambientes agressivos (SILVA; SOUZA, 2025). Esses efeitos se associam à melhoria da ligação na interface pasta/agregado quando o biochar possui poros acessíveis e superfície reativa, contribuindo ainda para menor perda de massa e maior resistência residual após exposição a altas temperaturas (KHAN et al., 2025; YE et al., 2025).

3 DESEMPENHO E PROPRIEDADES APÓS ADIÇÃO DO *BIOCHAR*

3.1 DESEMPENHO MECÂNICO

A estrutura porosa que o biochar possui representa uma rede complexa que influencia significativamente seu desempenho em sistemas cimentícios. Essa estrutura de poros que engloba microporos (<2 nm), mesoporos (2–50 nm) e macroporos (>50 nm), onde cada um influenciará de maneiras distintas o comportamento do material (KHAN et al., 2025). Os poros podem apresentar diferentes estruturas, como pode ser visto na figura 1 onde são retratadas essas estruturas.

Figura 1. Tipos que podem ser encontrados no *biochar*.



Fonte: Physical properties of biochar (2025).

Estudos têm evidenciado o efeito positivo do biochar sobre o desempenho mecânico do concreto. Pesquisas demonstram que a substituição parcial e controlada do biocarvão (biochar) no concreto ou em seus agregados é capaz de promover melhorias significativas na resistência à compressão e à flexão do material. Essa adição controlada contribui para um produto final mais eficiente e sustentável (SILVA; SOUZA, 2025).

De acordo com Khan et al. (2025), a melhoria nas propriedades mecânicas é impulsionada por quatro mecanismos que atuam em sinergia, sendo eles:

- **1º mecanismo:** Efeito de preenchimento, em que as partículas de *biochar* preenchem os vazios na matriz, aumentando a densidade e reduzindo defeitos;
- **2º mecanismo:** Hidratação, visto que o *biochar* fornece sítios de nucleação adicionais que



aceleram as reações de hidratação e melhoram a formação de géis cimentícios;

- **3º mecanismo:** Reforço da ligação interfacial, em que a estrutura porosa e os grupos funcionais da superfície do *biochar* fortalecem a adesão entre a pasta de cimento e os agregados;
- **4º mecanismo:** Resistência à fissuração, já que a capacidade do *biochar* de absorver tensões e preencher microfissuras ajuda a mitigar a propagação de fissuras e a melhorar a durabilidade.

3.2 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE

A durabilidade dos compósitos é crucial para seu desempenho em serviço e depende de fatores ambientais, das propriedades do material e das condições de uso (YE et al., 2025). A incorporação de biochar tem proporcionado ganhos significativos, sobretudo na permeabilidade: seu efeito de preenchimento e o refinamento de poros na zona de transição reduzem a penetração de água em compósitos curados ao ar ou em ambiente úmido (ZHOU; WANG; CHEN, 2025). Quanto à penetração de cloreto, o biochar altera a estrutura porosa e a retenção iônica; registram-se reduções de até 32% no coeficiente de difusão com 3% de biochar, associadas a maior formação de produtos de hidratação, diminuição da razão Ca/Si e maior polimerização do C-S-H, restringindo o transporte de íons agressivos (SILVA; SOUZA, 2025; KHAN et al., 2025; ZHOU; WANG; CHEN, 2025). Em permeabilidade, pequenas dosagens de biochar finamente moído aumentam a densidade da matriz: reduções superiores a 25% na absorção de água foram obtidas em argamassas com biochar de resíduos agroalimentares (BOSCHIERO, 2023), enquanto misturas com até 15% exibiram microestruturas mais compactas e menor conectividade de poros, em razão da ação pozolânica moderada e da granulometria fina do biochar (KHAN et al., 2025).

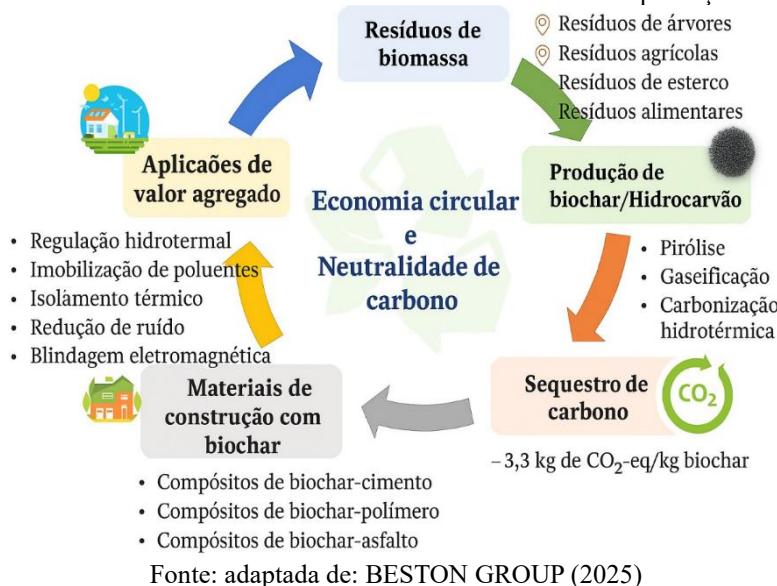
3.3 ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE

A literatura indica que o biochar melhora o isolamento térmico de materiais cimentícios, otimiza o consumo energético relacionado ao conforto térmico e contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa (BOSCHIERO, 2023). Produzido a partir de resíduos biomássicos, gera materiais porosos de alta área superficial adequados à captura de CO₂ em processos industriais, configurando alternativa de baixa pegada ambiental (BOSCHIERO, 2023; COMPLETO, 2012). Quando empregado como substituinte parcial do cimento, o biochar reduz o consumo de clínquer e atua como reservatório de carbono de longa duração, graças à sua estrutura estável, mitigando emissões de CO₂ (YE et al., 2025; ZHOU; WANG; CHEN, 2025). Estimativas apontam que 1 t de biochar pode reduzir cerca de 870 kg de CO₂ equivalente e que teores da ordem de 1% em concretos poderiam sequestrar aproximadamente 500 milhões de toneladas de CO₂ por ano, cerca de 20% das emissões do setor cimenteiro (BOSCHIERO, 2023; RAÍZA, 2021). O uso de biochar derivado de resíduos agrícolas e florestais, como a palha de arroz, simultaneamente favorece o gerenciamento de resíduos e apoia



metas de neutralidade de carbono, inserindo o material em um ciclo de economia circular, conforme ilustrado no esquema da Figura 2, que representa o ciclo de produção, utilização e sequestro de carbono associado ao biochar (LING et al., 2023; SIRICO et al., 2022; AHMAD; CHEN; DUAN, 2020).

Figura 2. Esquema de ciclo da economia circular e neutralidade de carbono na produção e utilização de biochar.



Fonte: adaptada de: BESTON GROUP (2025)

Em avaliações envolvendo biochar oriundo de pirólise, verificou-se que sua estrutura porosa permite retenção de carbono em longo prazo, gerando benefícios ambientais em comparação a misturas convencionais (ZHOU; WANG; CHEN, 2025). Essa capacidade de imobilizar carbono também é ressaltada quando o biochar é utilizado como substituinte de agregados ou ligantes, auxiliando em estratégias de construção de menor pegada carbônica (SATHISHKUMAR; PRAKASH, 2026).

A incorporação do biochar em concretos tem sido apontada como uma alternativa para valorizar resíduos agroindustriais e minimizar a dependência de matérias-primas de alta intensidade energética. Pesquisas envolvendo o aproveitamento de borra de café mostram que a carbonização hidrotermal possibilita converter um resíduo urbano abundante em material funcional para matrizes cimentícias, reduzindo impactos associados a práticas tradicionais de descarte (ZENG et al., 2025).

Em outras investigações, o uso de biochar produzido a partir de diferentes biomassas contribuiu para reduzir a quantidade necessária de cimento, ampliando o potencial de economia de recursos naturais (WU et al., 2025).

Paralelamente, observa-se que biochars com maior área superficial favorecem efeitos de micropreenchimento que podem diminuir a porosidade e, consequentemente, mitigar processos degradantes que exigiriam manutenção mais frequente ao longo da vida útil da estrutura (DE GUZMAN et al., 2025).

A vertente da sustentabilidade também se manifesta no desempenho do concreto frente à absorção e estocagem de CO₂. Em formulações que combinam zeólita e biochar, a maior quantidade



de sítios ativos e a presença de microporos favorecem a captura de dióxido de carbono, apontando para compósitos capazes de reduzir concentrações atmosféricas do gás durante sua vida útil (JIE et al., 2025).

Essa interação entre estrutura porosa e reatividade permite que materiais alternativos sejam usados não apenas como ligantes ou agregados, mas como mecanismos passivos de mitigação climática. Pesquisas sobre concretos contendo biochar também indicam que sua contribuição para a carbonatação controlada pode resultar em maior densificação microestrutural, aspecto benéfico tanto para o desempenho quanto para a redução da pegada ambiental (WU et al., 2025).

A otimização da combinação entre biochar e outros aditivos de origem mineral amplia o campo de soluções para o desenvolvimento de concretos ambientalmente estratégicos (JIE et al., 2025).

4 REVISÃO CRÍTICA, DESAFIOS E TENDÊNCIAS FUTURAS

4.1 PANORAMA GERAL DAS PUBLICAÇÕES

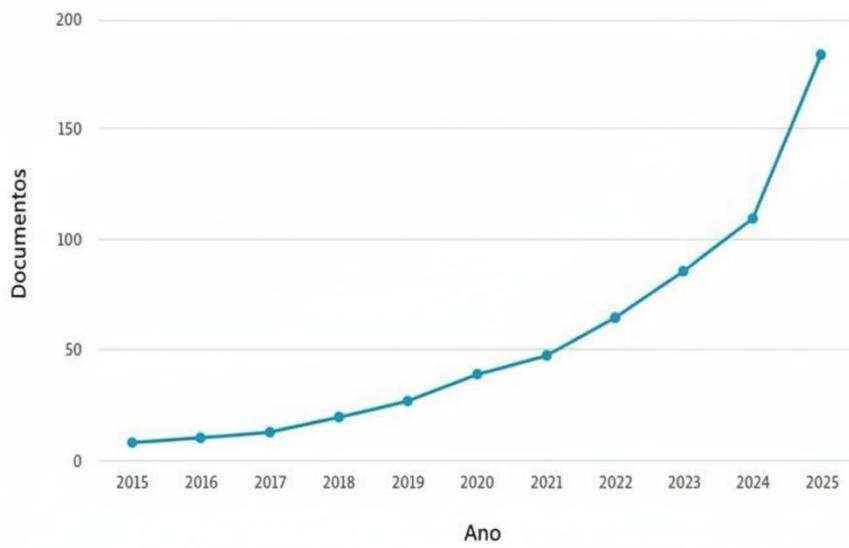
Nas últimas décadas, o avanço da Engenharia de Materiais tem impulsionado a busca por compósitos cimentícios capazes de aliar desempenho mecânico à redução de impactos ambientais. Nesse cenário, o *biochar* tem se destacado como uma alternativa promissora, especialmente pela possibilidade de aproveitar resíduos, ao mesmo tempo, influenciar propriedades microestruturais do cimento e do concreto. A análise bibliométrica conduzida na base Scopus permite observar como esse campo de estudo tem evoluído e quais direções vêm orientando a produção científica recente.

4.2 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TERMO “BIOCHAR AND CEMENT”

A busca realizada com o termo “*Biochar and Cement*” identificou 574 publicações no período de 2015 a 2025, evidencia a presença crescente de estudos dedicados à interação entre *biochar* e matrizes cimentícias como é possível visualizar na figura 3. Grande parte desses trabalhos investiga aspectos relacionados à hidratação, porosidade, resistência mecânica e modificações estruturais induzidas pela incorporação do *biochar*.



Figura 3. Publicações dos últimos 10 anos (de janeiro de 2015 a novembro de 2025).



Fonte: Adaptado de Plataforma *Scopus*

Ao realizar a análise de palavras pelo *VOSviewer* foi possível identificar que o termo “*biochar*” aparece como o núcleo central das pesquisas, apresentando as maiores conexões com “*concrete*”, “*cement*”, “*mechanical property*”, “*microstructure*”, “*strength*” e “*compressive strength*”. A Figura 3 evidencia três agrupamentos principais:

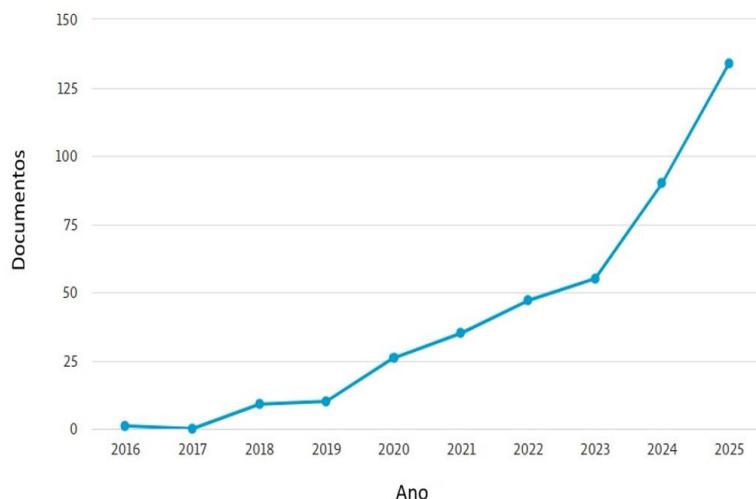
- (1) um *cluster* focado em concreto e desempenho mecânico, indicando que muitos estudos analisam resistência à compressão e propriedades globais dos compósitos;
- (2) um *cluster* relacionado ao cimento e aos mecanismos do material, mostrando pesquisas dedicadas à interação do *biochar* com a pasta de cimento e efeitos na hidratação;
- (3) um *cluster* voltado à microestrutura e caracterização, reunindo termos como *microstructure*, *characterization*, *mortar* e *carbon sequestration*, o que demonstra interesse em análises estruturais, argamassas e aspectos ambientais. Assim, a Figura 7 revela que as publicações sobre “*and Cement*” se concentram principalmente em desempenho mecânico, mecanismos físico-químicos do cimento, alterações microestruturais e potencial de sequestro de carbono.

4.3 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TERMO “BIOCHAR AND CONCRETE” E “BIOCHAR” AND “CONCRETE”.

Ao restringir a pesquisa ao termo “*biochar and concrete*” e “*biochar*” and “*concrete*”, foram encontrados 417 artigos publicados também nos últimos dez anos como mostra o Figura 4. Esse recorte demonstra o avanço das pesquisas voltadas ao comportamento do *biochar* em concretos, aproximando os estudos das aplicações reais na construção civil.



Figura 4: Publicações dos últimos 10 anos (de janeiro de 2015 a novembro de 2025).



Fonte: Adaptado de Plataforma Scopus

Realizando a análise de palavras pelo *VOSviewer* foi possível identificar que, conforme ilustrado na Figura 9, o núcleo temático central das pesquisas que relacionam “*and Concrete*” e ““*and Concrete*” concentra-se fortemente nos termos ”*biochar*”, ”*concrete*”, ”*cement*”, ”*material*”, ”*cementitious composite*”, ”*mechanical property*” e ”*carbon sequestration*”. A estrutura da rede evidencia que o *biochar* atua como o principal elo de conexão entre os demais termos, demonstrando que ele é o ponto de maior recorrência nos artigos analisados da base *Scopus*.

Observa-se que ”*concrete*” forma um cluster mais associado a propriedades mecânicas, indicando que parte significativa dos estudos se dedica a avaliar como o *biochar* influencia resistência, desempenho e comportamento estrutural de matrizes cimentícias. Já o grupo de palavras que orbita ”*biochar/cement/material*” está ligado a temas de desenvolvimento de novos compósitos cimentícios, microestrutura e funcionalidades adicionais, refletindo uma abordagem mais ampla e interdisciplinar.

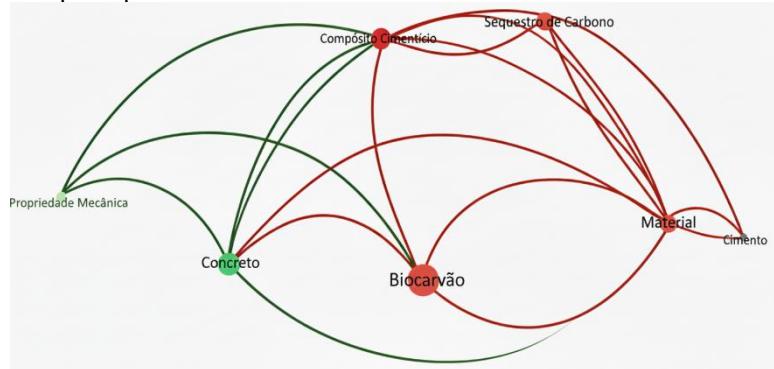
Além disso, a presença destacada de ”*carbon sequestration*” demonstra que os trabalhos também enfatizam o potencial do *biochar* como estratégia de mitigação de carbono dentro dos materiais cimentícios, reforçando o interesse crescente em soluções sustentáveis na engenharia de materiais.

Assim, a figura 5 evidencia que a literatura recente integra dois eixos principais:

- (1) desempenho mecânico e propriedades do concreto modificado com *biochar* e
- (2) sustentabilidade, captura de carbono e desenvolvimento de materiais cimentícios avançados, confirmando a expansão multidirecional das pesquisas envolvendo *biochar* aplicado ao concreto.



Figura 5: Mapa de palavras com base “biochar and concrete” e “biochar” and “concrete”.

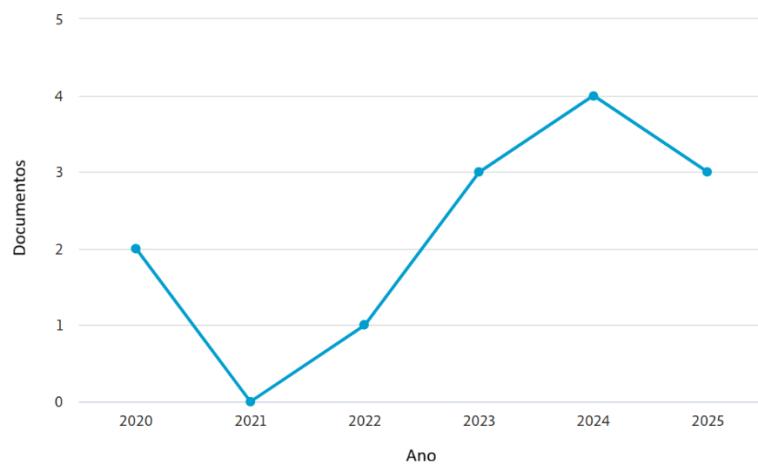


Fonte: Adaptado plataforma VOSviewer

4.4 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TERMO “BIOCHAR” AND “CIVIL ENGINEERING”

A análise bibliométrica realizada na base Scopus para o termo “*biochar*” AND “*civil engineering*” foram encontrados 15 artigos, esta análise revela uma consolidação gradual do tema dentro da engenharia civil, tanto no que se refere às aplicações em materiais quanto às investigações sobre desempenho mecânico e aspectos geotécnicos. No gráfico de evolução anual das publicações demonstra um crescimento progressivo do interesse acadêmico a partir de 2022, com aumento mais evidente em 2023 e pico em 2024 como é possível observar no figura 06.O tema passou a ganhar atenção na engenharia civil somente nos últimos anos, acompanhando a busca por soluções de baixo carbono, melhorias de desempenho mecânico e alternativas sustentáveis para agregados e aditivos. A leve queda em 2025 não compromete o padrão geral, que indica uma curva ascendente e um campo emergente em expansão, especialmente diante das demandas atuais de descarbonização da construção civil.

Figura 6. Publicações dos últimos 10 anos (de janeiro de 2015 a novembro de 2025).



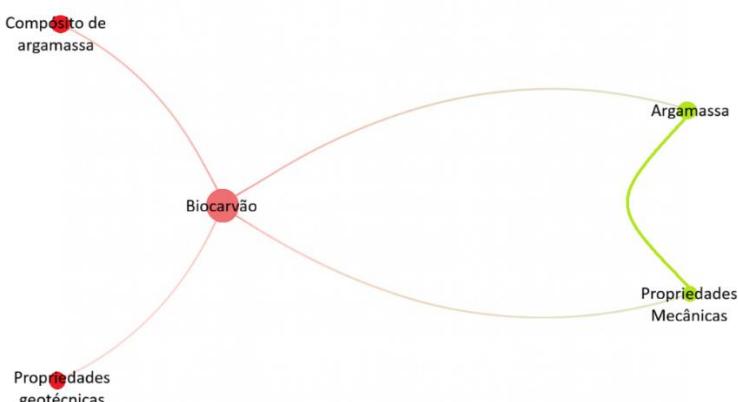
Fonte: Adaptado de Plataforma Scopus

No mapa de palavras da Figura 7 processado no *VOSviewer*, observa-se que os termos se organizam em torno de três eixos principais: biocarvão argamassa e propriedades mecânicas, indicando



que a maior parte dos estudos tem se concentrado na modificação de matrizes cimentícias e no impacto diretamente associado ao desempenho do material. A presença do cluster relacionado a propriedades geotécnicas mostra uma expansão recente do uso do *biochar* além do concreto, reforçando aplicações no comportamento dos solos.

Figura 7. Mapa de palavras termo "*biochar*" AND "*civil engineering*".

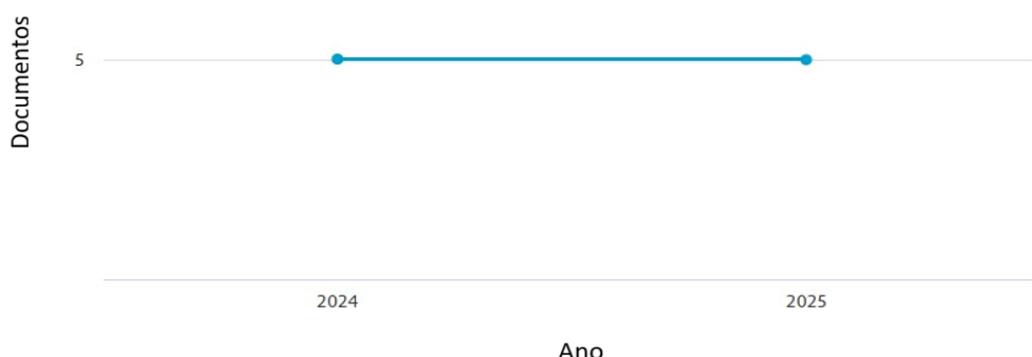


Fonte: Adpatado plataforma VOSviewer

4.5 PUBLICAÇÕES REFERENTES AO TERMO “BIOCHAR CONCRETE” AND “CARBON SEQUESTRATION”.

Seguindo a metodologia adotada, os termos “*Biochar concrete*” AND “*Carbon sequestration*”. também foram analisados considerando as publicações dos últimos dez anos. Entretanto, diferentemente dos demais grupos avaliados, esses termos apresentaram ocorrências somente nos anos de 2024 e 2025, como apresentado na figura 8. Isso indica que se trata de um tema recente na literatura, ainda em consolidação. Nos oito anos anteriores, nenhuma publicação relacionada foi identificada na base Scopus, o que reforça seu caráter emergente e o baixo volume de estudos disponíveis até o momento.

Figura 8: Evolução das publicações dos artigos nos últimos anos.



Fonte: Adaptado de Plataforma *Scopus*



Ao realizar a análise de palavras pelo *VOSviewer* foi possível identificar que, conforme mostrado na Figura 9, os termos relacionados à busca “concrete” AND “Carbon sequestration” se organizam em dois eixos principais. O primeiro é formado por *biochar*, *concrete* e *strength*, indicando que a maioria dos estudos concentra-se no efeito do *biochar* sobre a resistência do concreto. O segundo eixo conecta *biochar concrete* ao termo carbon sequestration, evidenciando o interesse da literatura em avaliar o potencial do *biochar* para contribuir no sequestro de carbono dentro de materiais cimentícios. Assim, a Figura 9 demonstra que as pesquisas combinam desempenho mecânico e sustentabilidade como focos centrais.

Figura 9. Mapa de palavras baseado nos termos “Biochar concrete” AND “Carbon sequestration”.



Fonte: Adpatado plataforma VOSviewer

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados ao longo deste trabalho evidenciam que o *biochar* tem adquirido relevância expressiva como aditivo ou substituinte parcial em materiais cimentícios, sobretudo devido à sua capacidade de alterar mecanismos fundamentais da matriz, como hidratação, formação de microestruturas e comportamento frente a agentes de degradação. A literatura analisada demonstra que, quando incorporado em teores adequados, o *biochar* promove efeitos associados ao micropreenchimento, à nucleação de produtos hidratados e ao refinamento da rede porosa, contribuindo para ganhos de resistência, redução de permeabilidade e maior estabilidade térmica. Tais mecanismos reforçam o potencial como componente funcional em concretos e argamassas.

O estado atual das pesquisas indica que as características físico-químicas do *biochar* são fortemente influenciadas pelo tipo de biomassa e pelas condições de produção, o que resulta em comportamento variável nas formulações cimentícias. Essa diversidade torna necessário o aprofundamento de estudos voltados à uma maior padronização e ao entendimento da relação entre parâmetros de síntese, propriedades estruturais e desempenho final. Do ponto de vista da Engenharia, essa interação destaca a importância de abordagens que considerem processamento, microestrutura e propriedades como elementos interdependentes.

A análise bibliométrica realizada na base *Scopus* confirma a expansão que o tema tem tido na última década. Os conjuntos de dados associados aos termos “*Biochar and Cement*” (574 publicações)



e “*Biochar and Concrete*” (417 publicações) evidenciam o *biochar* como objeto de estudo recorrente em pesquisas envolvendo compósitos cimentícios. A partir dos mapas gerados pelo *VOSviewer*, observa-se que os estudos se distribuem em sua maioria em torno de quatro eixos temáticos: desempenho mecânico, propriedades microestruturais, processos físico-químicos do cimento e sustentabilidade, com destaque para o sequestro de carbono. Tal distribuição revela a crescente do campo e a ampliação das abordagens metodológicas.

No recorte mais específico referente aos termos "biochar" AND "civil engineering", "Biochar concrete" AND "Carbon sequestration", embora o número de publicações ainda seja restrito, verifica-se o fortalecimento de uma linha de investigação voltada à diminuição de emissões e ao armazenamento de carbono em longo prazo. Essa tendência indica que o *biochar* não tem sido analisado apenas sob a perspectiva do desempenho técnico, mas também como elemento estratégico para o desenvolvimento de materiais de menor impacto ambiental.

De forma geral, a literatura evidencia avanços significativos, mas também lacunas importantes, especialmente no que se refere à padronização do material, como pode ser replicar os resultados e à necessidade de investigações em escala real.

Nesse contexto, o *biochar* desponta como material com potencial para contribuir tanto para o aprimoramento técnico dos compósitos cimentícios quanto para o aumento da pegada ambiental da construção civil. A consolidação desse campo, contudo, depende do aprofundamento das pesquisas experimentais e da harmonização de metodologias que permitam avançar da escala laboratorial para aplicações práticas, mantendo alinhamento com as demandas tanto da Engenharia e da sustentabilidade.

6 SUGESTÕES FUTURAS

Como sugestões futuras deste estudo apontam para a ampliação da abordagem bibliográfica por meio de uma etapa experimental aplicada, permitindo aprofundar a compreensão sobre o potencial do biochar em materiais cimentícios. A partir do mapeamento realizado, planeja-se conduzir a produção de biochar obtido a partir de biomassa de materiais abundantes em nosso país como biomassa de café e bagaço de cana-de-açúcar, posteriormente, incorporá-lo em matriz cimentícia para análise sistemática do comportamento deste novo compósito. Essa fase experimental possibilitará avaliar, em condições reais, os principais aspectos discutidos ao longo do trabalho, como o potencial de captura e estocagem de CO₂, as modificações microestruturais induzidas pelo biochar e seus efeitos sobre o desempenho mecânico e estrutural do concreto. Espera-se, assim, reunir evidências capazes de fortalecer o desenvolvimento de matrizes cimentícias mais sustentáveis e tecnicamente eficientes.



Dessa forma, projeta-se a consolidação de uma linha de investigação que integra sustentabilidade, inovação em engenharia de materiais e valorização de resíduos biomássicos, reforçando a relevância do biochar como alternativa emergente no contexto dos materiais cimentícios.



REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. R.; CHEN, B.; DUAN, H. Improvement effect of pyrolyzed agro-food biochar on the properties of magnesium phosphate cement. *Science of the Total Environment*, v. 718, 137422, 2020.
- BARBHUIYA, S.; DAS, B. B.; KANAVARIS, F. Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e02859, 2024.
- BOSCHIERO, B. N. Biochar: O que é e qual seu potencial de uso na Agricultura? *Agroadvance*, 11 abr. 2023.
- CHEN, Y. et al. Biochar-enhanced concrete mixes: Pioneering multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering*, v. 88, p. 109263, 2024.
- COMPLETO, V. O Concreto. Blog Concreto Compósito, 2012.
- COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. O concreto como material de construção. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE*, v. 1, n. 3, p. 49-58, 2013.
- DE GUZMAN, A. I. R. et al. Synthesis and evaluation of rice straw-derived biochar as cement replacement for concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 111, 113617, 2025.
- EE, A. W. L. et al. Circular economy for the building industry: Life cycle assessment of biochar-enhanced concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 223, p. 108537, 2025.
- EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU). European cement industry strives for Carbon Neutral Cement and Concrete along the value chain by 2050. 2020.
- GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Cement Industry Annual Review 2023. London, 2023.
- JIE, S. et al. Evaluation on performance and carbon-sequestration of spent coffee grounds hydrothermal biochar concrete under multi-factor interaction. *Construction and Building Materials*, v. 489, 142394, 2025.
- KHAN, H. et al. Sustainable multifunctional biochar-based cementitious composites for carbon sequestration, energy storage, and smart infrastructure applications: A review. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05117, 2025.
- KIRAN, G. U. et al. Impact of biochar on strength, durability, and carbon sequestration in cement based materials. *Discover Sustainability*, v. 6, 579, 2025.
- LING, Y. et al. Effect of biochar dosage and fineness on the mechanical properties and durability of concrete. *Materials*, v. 16, n. 7, 2809, 2023.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.
- MAHMOUD, A. A. et al. Evaluation of rice husk biochar influence as a partial cement replacement material on the physical, mechanical, microstructural, and radiation shielding properties of ordinary concrete. *Scientific Reports*, v. 15, 27229, 2025.



PANG, X.; QIN, Y.; WEI, P.; HUANG, C. Enhancing fire resistance: Investigating mechanical properties of biochar-infused concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 435, p. 136813, 2024.

RAÍZA, A. Fabricação do cimento; os tipos e as suas finalidades. Maringá Post, 2021.

REVATHI, S. et al. Effect of zeolite and bamboo biochar as CO₂ absorbant in concrete. *Carbon Research*, v. 3, p. 43, 2024.

SATHISHKUMAR, R.; PRAKASH, R. A review on activated carbons (AC) for CO₂ capture applications: preparation, characterisation and surface modification methods. *Fuel*, v. 405, 136521, 2026.

SILVA, J.; SOUZA, M. C. Biochar como material sustentável em concretos: revisão crítica, desempenho e tendências futuras. *Construction and Building Materials*, v. 450, e138865, 2025.

SIRICO, A. et al. Effects of biochar addition on long-term behavior of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 122, 103626, 2022.

SUN, H. et al. Effects of bamboo waste biochar on fracture behavior of cementitious materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 139, 105106, 2025.

WANG, H. et al. (Concreto, biochar e emissões de CO₂ – referência de 2025 citada junto a De Guzman e Sun).

WU, F. et al. Biochar modification enhances mechanical and durability properties of cement-based materials. *Scientific Reports*, v. 15, 22174, 2025.

YE, P. 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, 21, 2025.

ZENG, H. et al. A novel nutrient-rich biochar modified eco-concrete with simultaneously enhanced mechanical and planting performance. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05382, 2025.

ZHOU, Y.; WANG, S.; CHEN, L. Progress and prospects of biochar as concrete filler: A review. *Alexandria Engineering Journal*, v. 128, p. 306–323, 2025.

