

INCORPORAÇÃO DE BIOCHAR EM MATRIZES ÁLCALI ATIVADAS: REVISÃO DOS MEIOS DE PRODUÇÃO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XV-011>

Sabrina Luana Dias Pereira (*), Edna Possan, Alex Neves Junior

* Universidade Federal da Integração Latino-Americana – sbrnluana@gmail.com

RESUMO

Materiais álcali ativados são uma classe de materiais cimentícios que podem ser utilizados como uma alternativa ao cimento Portland e para a síntese desses produtos, é necessário que o precursor seja um material rico em sílica e alumina. O biochar é um material sólido, rico em carbono e obtido a partir do processo de pirólise, ou seja, por meio da decomposição térmica de biomassas, sabendo que alguns tipos de biomassas possuem grandes quantidades de sílica, esta é uma razão para incorporar biochar em matrizes álcali ativadas. Apesar de que já existem vários estudos de matrizes cimentícias convencionais com biochar, a sua aplicação em matrizes álcali ativadas, ainda é bem recente. Com isso, o objetivo deste artigo é o de apontar, através de uma revisão sistemática da literatura, o estado da arte sobre o uso do biochar para obtenção de matrizes álcali ativadas através da análise das matérias-primas, como o tipo de biomassa utilizada na síntese do biochar, bem como o processo de produção, as propriedades físicas e mecânicas das matrizes e as suas aplicações. Entre os artigos analisados evidenciou-se um vasto campo de pesquisa para a abordagem de matrizes álcali ativadas com biochar. Os diferentes meios de produção mostram que a área ainda carece de padronização e normatização. As matrizes compostas com biochar apresentaram excelentes propriedades como alta resistência mecânica, alta densidade e alto grau de adsorção de gases ou poluentes devido a ação combinada do material álcali ativado com o biochar. No entanto, problemas de eflorescência não foram sanados, sendo ainda, intensificados pois o biochar fornece meios de transporte pela matriz devido a sua porosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais álcali ativados, Biochar, Revisão sistemática da literatura, Propriedades.

ABSTRACT

Alkali-activated materials are a class of cementitious materials that can be used as an alternative to Portland cement. For the synthesis of these products, the precursor must be a material rich in silica and alumina. Biochar is a solid material, rich in carbon, and obtained from the pyrolysis process, that is, through the thermal decomposition of biomass. Knowing that some types of biomass have large amounts of silica, this is a reason to incorporate biochar into alkali-activated matrices. Although there are already several studies of conventional cementitious matrices with biochar, its application in alkali-activated matrices is still very recent. Therefore, the objective of this article is to point out, through a systematic review of the literature, the state of the art on the use of biochar to obtain alkali-activated matrices through the analysis of raw materials, such as the type of biomass used in the synthesis of biochar, as well as the production process, the physical and mechanical properties of the matrices and their applications. Among the articles analyzed, a vast field of research was highlighted for the approach of alkali matrices activated with biochar. The different means of production show that the area still lacks standardization and regulation. The matrices composed of biochar presented excellent properties such as high mechanical resistance, high density and high degree of adsorption of gases or pollutants due to the combined action of the alkali material activated with the biochar. However, efflorescence problems were not solved and were even intensified because the biochar provides means of transport through the matrix due to its porosity.

KEY WORDS: Alkali Activated Materials, Biochar, Systematic literature review, Properties.

INTRODUÇÃO

Materiais álcali ativados são uma classe de materiais cimentícios que podem ser utilizados como uma alternativa ao cimento Portland. São produzidos a partir de precursores, comumente subprodutos industriais como cinzas volantes, escória de alto forno, resíduos de mineração etc. (AMRAN et al., 2020) através da ativação alcalina com soluções de silicatos e hidróxidos (HARDJITO et al., 2004; YONG-JIE et al., 2023). A vantagem do uso desses materiais consiste em menor calor de hidratação, desenvolvimento de propriedades mecânicas precoces e superiores, resistência ao ataque

químico, resistência ao fogo etc. (AYDIN; BARADAN, 2012). Entretanto, fatores como a disponibilidade, o custo e o tipo de aplicação devem ser levados em conta na escolha do precursor (RANGAN, 2014).

O biochar é um material sólido, rico em carbono e obtido a partir do processo de pirólise, ou seja, por meio da decomposição térmica de biomassas, como resíduos agrícolas, podas de árvores e vegetação, resíduos orgânicos industriais etc. (BARBHUIYA; BHUSAN DAS; KANAVARIS, 2024). O biochar possui larga e reconhecida aplicação em sistemas agrícolas e controle de poluentes e, recentemente, vem sendo estudado em aplicações de compósitos à base de cimento Portland, pois contribuem com o papel de hidratação (NAVARATNAM et al., 2021).

Entretanto, a incorporação de biochar em compósitos álcali ativados é ainda mais recente e decorre da composição química do biochar, visto que, na síntese de produtos álcali ativados, é necessário que o precursor seja um material rico em sílica e alumina (CONG; CHENG, 2021; RANGAN, 2014). Com isso, a razão para incorporar biochar em matrizes álcali ativadas deriva de que alguns tipos de biomassa possuem grandes quantidades de sílica (FARGES et al., 2018). No entanto, o emprego deste material em ambas as matrizes, depende do tipo de biomassa, das condições de pirólise, das proporções de biochar adicionados ao compósito e das condições de síntese da matriz (DZOUJO et al., 2022).

O uso do biochar em materiais de construção é explorado para redução de carbono incorporado, a fim de tornar as edificações mais sustentáveis, (PICCOLO et al., 2021), visto que o biochar é uma tecnologia de recursos bio-renovável (DANISH et al., 2021). Por isso, a valorização de resíduos orgânicos transformando-os em biochar e a sua utilização no setor de construção apresenta diversos benefícios no quesito ambiental atrelado à circularidade (PRANEETH et al., 2021). A necessidade de explorar tecnologias de redução de carbono incorporado e operacional na indústria de construção civil reforça o uso de biochar por ser um produto negativo em carbono.

OBJETIVOS

O objetivo deste artigo é o de apontar, através de uma revisão sistemática da literatura, o estado da arte sobre o uso do biochar para obtenção de matrizes álcali ativadas através da análise das matérias-primas, como o tipo de biomassa utilizada na síntese do biochar, bem como o processo de produção, as propriedades físicas, químicas e mecânicas das matrizes e as suas aplicações.

METODOLOGIA

Uma pesquisa abrangente na literatura foi realizada utilizando os bancos de dados: *SciElo*, *Web of Science*, *Springer*, *Scopus* e *Science Direct* a fim de reunir informações acerca da produção de compostos álcali ativados com biochar incorporado. Buscou-se pelas palavras “*geopolymer*”, “*alkali activated materials*” e “*biochar*”. A quantidade de estudos envolvendo materiais álcalis ativados com biochar é extremamente pequena, desta forma, considerou todo o período desde o primeiro estudo disponível até o ano de produção do presente artigo, ou seja, entre 2016 e 2024. Foram analisados como critério de inclusão a presença das palavras “*geopolymer*” ou “*alkali activated materials*” e “*biochar*” nos resumos e foram excluídos os artigos repetidos, artigos de revisão e estudos com cinzas e/ou cimento Portland como matérias-primas. Como resultado, um total de 17 artigos foram selecionados e analisados para este estudo, conforme Figura 1.

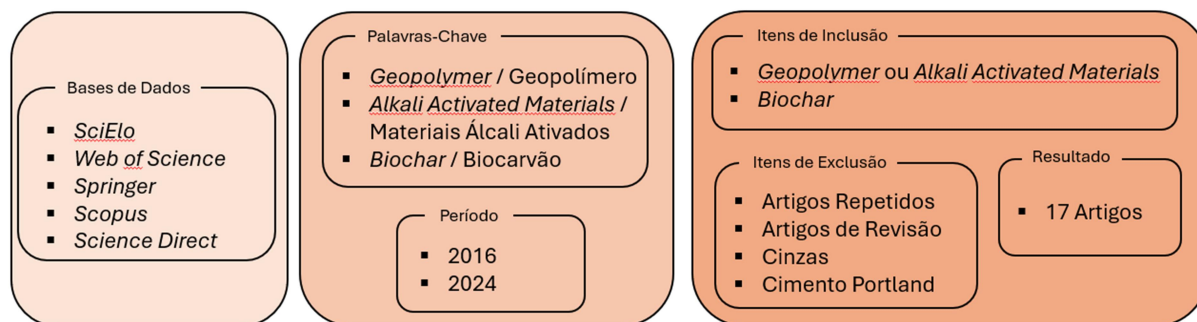


Figura 1: Parâmetros da busca bibliográfica. Fonte: Autor do trabalho.

A revisão se dedicou a identificar as matérias-primas para a síntese da matriz e a biomassa à qual o biochar foi produzido, bem como os parâmetros de pirólise (temperatura, rampa de aquecimento e tempo de residência), quantidade de matéria-prima utilizada e o procedimento de mistura. Propriedades físicas, químicas e mecânica, a formação de eflorescência e a capacidade de remoção de contaminantes relativos à aplicação dos compósitos.

RESULTADOS

Os artigos selecionados foram sintetizados e estão apresentados no Quadro 1. Onde descreve-se os precursores de cada estudo com seus respectivos álcalis que compõem a solução ativadora e aditivos incorporados à matriz, sejam líquidos ou em pó. Também é apresentado a fonte de biomassa trabalhada para formulação do biochar, bem como as condições de pirólise. Os objetivos de cada estudo são apresentados na última coluna.

Quadro 1. Síntese e materiais dos artigos de revisão. Fonte: Autor do trabalho.

Referência	Precursor	Solução ativadora	Aditivos à matriz	Fonte de biomassa e condições de pirólise	Objetivo da formulação
(DEVI; SAROHA, 2016)	O próprio biochar	NaOH	Areia, pó de sílica e carbonato de cálcio	Lodo de estação de tratamento de efluentes de fábrica de papel, pirolisado a 700° C	Verificar a viabilidade de formação de tijolos a partir do biochar, com base nas propriedades mecânicas e ambientais, assim como, avaliar o grau de imobilização de metais pesados e pentaclorofenol
(DOCTOLERO et al., 2020)	Cinzas volantes	Na ₂ SiO ₃ e NaOH a 12 Mol	Bactérias B. subtilis 1679, B. sphaericus 1272, B. megaterium 1512 e B. thuringiensis 1092	Casca de arroz	Imobilização de culturas de bactérias em biochar para aplicação em matrizes autocicatrizantes
(DZOUJO et al., 2022)	Pozolana preta natural	Na ₂ SiO ₃ e NaOH a 12 Mol	-	Bagaço de cana, carbonizadas a temperatura entre 150 e 350° C por 1 hora	Otimizar o desempenho de adsorção de azul de metileno
(EGODAGAMAGE et al., 2023)	Escória granulada de alto forno	Na ₂ SiO ₃ e NaOH	Areia	Casca de arroz; Lodo de esgoto. Pirolisado a taxa de aquecimento de 10° C/min até as temperaturas de 500°, 600° e 700° C por 60 minutos	Identificar o tipo de biochar adequado para determinar as influências no processo de hidratação e resistência à compressão do material ativado por álcali sob diferentes períodos de cura
(FARGES et al., 2018)	Metacaulim	K ₂ SiO ₄ e KOH	Sílica ativa	Palha de trigo; <i>Miscanthus</i> ; Talhadia	Caracterização físico-químicas e estruturas de diferentes biochars e viabilidade de produção de matrizes álcali ativadas e espumas a base de biochar
(GONZALEZ; SARGENT; ENNIS, 2021)	Escória granulada de alto forno	-	Solo artificial (areia seca e caulim)	Lodo de tratamento de esgoto	Utilizar lodo de tratamento de esgoto para promover a ativação alcalina da escória granulada de alto forno para aplicações no solo
(HUANG et al., 2020)	Metacaulim; Escória granulada de	Na ₂ SiO ₃ e NaOH	H ₂ O ₂ e K12 (agentes espumantes)	Lignina alcalina	Sintetizar uma membrana com biochar para degradação de tetraciclina

Referência	Precursor	Solução ativadora	Aditivos à matriz	Fonte de biomassa e condições de pirólise	Objetivo da formulação
	alto forno				em água
(HUANG et al., 2023)	Metacaulim; Escória granulada de alto forno	Na_2SiO_3 e NaOH	H_2O_2 e K12 (agentes espumantes)	Lignina alcalina	Sintetizar uma membrana com biochar para degradação de tetraciclina em água
(JEON et al., 2024)	Escória granulada moída de alto forno	Metassilicato de sódio sólido anidro	-	Madeira de Yellow Pine com pirólise a 550° C por 10 minutos	Desenvolver e avaliar a viabilidade de um eletrodo projetado para supercapacitores estruturais
(PICCOLO et al., 2021)	Metacaulim; Cinzas de fundo de incinerador municipal	Na_2SiO_3 e NaOH a 8 Mol	-	Biomassa lenhosa, aquecimento a 105° C em mufla por 24 horas	Formular materiais quimicamente ativados leves utilizando biochar
(ZHANG et al., 2021)	Metacaulim; Cinzas volantes; Cinzas pesadas	Na_2SiO_3 e NaOH	Fe_2O_3	Resíduos de madeira, convertidos a 500° C	Investigar as características adsorptivas de matrizes álcali ativadas à base de cinzas com biochar para adsorção de poluentes e imobilização de metais tóxicos pesados de águas residuais
(ZHU et al., 2022)	Metacaulim	NaOH	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Lignina	Preparação de material compósito com biochar e partículas de Fe e Cu para ativar peroximonossulfato de potássio para degradar naftaleno na água e no solo
(VAIČIUKYNIENĖ et al., 2024)	Escória granulada de alto forno	Na_2SiO_3	Fosfogesso e resíduo zeolítico do tipo faujasita	Resíduos de madeira pirolisados a 600° C durante 6 horas	Compósito de escória ativada por álcali com biochar para remoção de Pb^{2+}
(YARO et al., 2023)	Cinzas combustíveis de óleo de palma; Metacaulim; Metassilicato de sódio	Fosfato de sódio; Potássio em pó; NaOH; KOH; HCl	Ligante asfáltico; Granito triturado	Resíduos de palha de arroz	Verificar o impacto combinado de matriz álcali ativada com o biochar no desempenho do concreto asfáltico
(JAGABA et al., 2023)	Metacaulim	Fosfato de sódio; Potássio em pó; NaOH; KOH; HCl		Cinzas combustíveis de óleo de palma; resíduos de palha de arroz	Avaliar a influência do biochar de palha de arroz e de nanocompósitos álcali ativados à base de biochar na demanda química de oxigênio e no efluente de biorrefinaria agroindustrial contaminado com fenol
(BAI et al., 2024)	Cinzas volantes; Escória granulada de	Na_2SiO_3 e NaOH		Caroço de azeitona	Utilizar biochar de caroço de azeitona como um substituto de agregados e incorporação em matrizes

Referência	Precursor	Solução ativadora	Aditivos à matriz	Fonte de biomassa e condições de pirólise	Objetivo da formulação
	alto forno				para aplicações em pavimentos
(KHAMLUE et al., 2019)	Metacaulim; Óxido de alumínio (Al_2O_3)	Na_2SiO_3 e NaOH a 15 Mol	H_2O_2	Casca de coco	Estudar os efeitos da adição de biochar nas propriedades dos materiais álcali ativados, para remoção de azul de metileno

Com base nos artigos, três principais fontes de aluminossilicato são utilizadas, os quais são comumente utilizados em trabalhos com materiais álcali ativados, sendo eles, metacaulim, cinzas volantes e escória granulada de alto forno. A solução ativadora também incorpora soluções majoritariamente utilizadas em outras formulações, como o silicato de sódio e o hidróxido de sódio.

As fontes de biomassa para a síntese de biochar foram variadas, sendo entre elas, lignocelulósicas e não lignocelulósicas, como a casca de coco, caroço de azeitona, cinzas de óleo de palma, resíduos de casca de arroz (4), resíduos lenhosos (4), lignina (3), lodo de estação de tratamento (3), palha de trigo, *miscanthus*, talhadia, bagaço de cana.

Método de produção dos compósitos

Entre os artigos analisados, foi analisado a variedade dos procedimentos para preparo das matrizes incorporando biochar, devido a inexistência de uma metodologia padrão ou normas para fabricação desses compósitos. Essa variação é derivada principalmente, em relação à aplicação de cada produto, havendo abertura para as diversas possibilidades de formulação de misturas.

No entanto, algumas etapas são similares, por exemplo, na maioria das misturas, os materiais em pó (precursores, biochar, areia) são misturados manualmente a seco. Assim como a preparação dos ativadores alcalinos, hidróxido e silicato, são misturados juntos antes de se juntar aos materiais em pó. Por ser uma solução exotérmica, ela é deixada esfriar até a temperatura ambiente, entre 2 e 24 horas (DZOUJO et al., 2022). A água só é adicionada quando necessário. E ao fim é adicionado outros componentes específicos conforme cada estudo, como CaCO_3 (DEVI; SAROHA, 2016), agentes espumantes (HUANG et al., 2020, 2023), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ZHU et al., 2022) e esporos de bactérias (DOCTOLERO et al., 2020).

Os traços são misturados até que se possa obter uma consistência uniforme, para isso, a maioria utiliza um misturador mecânico (EGODAGAMAGE et al., 2023), variando o tempo de mistura entre 2 e 5 minutos. Alguns autores também promoviam métodos de adensamento, com vibração em mesa por 45 segundos (EGODAGAMAGE et al., 2023), ou compactados mecanicamente por 1 minuto (DZOUJO et al., 2022) e compactadas em camadas (três) com 25 golpes cada (BAI et al., 2024) para argamassas.

As misturas eram conformadas em corpos de prova cúbicos (DOCTOLERO et al., 2020; FARGES et al., 2018), metálicos (BAI et al., 2024; EGODAGAMAGE et al., 2023; ZHANG et al., 2021) ou plásticos (KHAMLUE et al., 2019; PICCOLO et al., 2021) e em maioria, selados com plástico. E curados entre 25 e 100° C por 24 a 72 horas (BAI et al., 2024; DEVI; SAROHA, 2016; DOCTOLERO et al., 2020; DZOUJO et al., 2022; JEON et al., 2024; ZHANG et al., 2021; ZHU et al., 2022), após, são geralmente mantidos em condições ambientes, muitas vezes selados em plásticos até as datas designadas para os ensaios físicos, químicos e mecânicos.

Outras características de produção dos compósitos incluía uma fase de extinção da reação química entre precursor e solução ativadora, emergindo as amostras em acetona por 2 horas (DZOUJO et al., 2022) e lavando as amostras para retirada do excesso de NaOH e assim, evitar que os íons Na^+ reaja com o CO_2 e forme eflorescência (KHAMLUE et al., 2019).

Entre os percentuais de biochar incrementados ou substituindo o precursor nas matrizes, variaram até 10% (EGODAGAMAGE et al., 2023; GONZALEZ; SARGENT; ENNIS, 2021; ZHANG et al., 2021), até 50% (VAIČIUKYNIENĖ et al., 2024; YARO et al., 2023), até 70% (JEON et al., 2024; PICCOLO et al., 2021) e 100% (DEVI; SAROHA, 2016).

Aplicação de matrizes álcali ativadas com biochar incorporado

O foco da aplicação dos materiais álcali ativados produzidos com biochar, tem sido, até o momento, na indústria química, mais propriamente na remoção de agentes contaminantes da água e do solo, através do processo de adsorção, visto que, ambos os materiais possuem essa propriedade. Evidenciando uma dupla vantagem de melhores capacidades de remediação de poluentes e gestão de resíduos (DZOUJO et al., 2022).

Na área de adsorção de substâncias contaminantes, tijolos de biochar derivado de lodo de estação de tratamento de efluentes da fábrica de celulose e papel foram utilizados com sucesso para adsorção de pentaclorofenol de efluentes (DEVI; SAROHA, 2016). Assim como, membranas à base de metacaulim e escória com biochar de lignina e agentes espumantes (H_2O_2 e K_2) foram eficientes para a remoção tetraciclina (HUANG et al., 2020, 2023). Na degradação de naftaleno, catalisadores à base de metacaulim e biochar de lignina carregado com nanopartículas de Fe e Cu foram eficazes na degradação do composto presente na água e no solo (ZHU et al., 2022).

Além da tetraciclina e do naftaleno, a remoção do corante azul de metileno tem sido muito estudada, e os resultados evidenciaram que o biochar é um excelente material para a adsorção deste composto, utilizando biochar de bagaço de cana e de casca de coco (DZOUJO et al., 2022; KHAMLUE et al., 2019). Bem como, na imobilização de metais pesados, onde a utilização do compósito com a adição de biochar de resíduos de madeira e lodo de estação de tratamento melhorou significativamente a adsorção, assim como para o encapsulamento dos seguintes metais pesados: Cr, Cu, Ni, Cd, Pd, Zn, Pb (DEVI; SAROHA, 2016; ZHANG et al., 2021).

Entre outras aplicações, a composição de material álcali ativado e biochar pode envolver aplicações de autocicatrização utilizando culturas de bactérias, ou seja, nos estudos de Doctolero et al. (2020), matrizes à base de cinzas volantes com biochar de casca de arroz como imobilizador de culturas de bactérias, apresentou a vedação de fissuras no sistema de autocicatrização, conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, comprovada por ensaios de DRX e MEV, e pelas melhorias nas propriedades mecânicas com a vedação das fissuras induzidas na matriz.

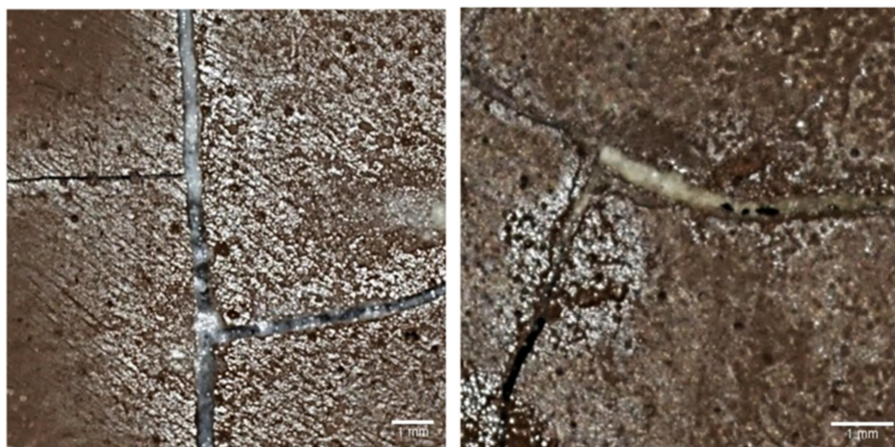


Figura 2: Autocicatrização de matrizes álcali ativadas com biochar a partir de culturas de bactérias. Fonte: (DOCTOLERO et al., 2020).

Outro estudo realizou a aplicação para formulação de capacitores. Onde o aumento da quantidade de biochar à base de madeira, proporcionou aos capacitores à base de escória, um aumento significativo no valor da capacitância, aliado à estrutura porosa que aumenta a área superficial do eletrodo (JEON et al., 2024). Por fim, materiais álcali ativados à base de escória com biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto foram analisados na substituição do cimento comum para estabilização de solos, se mostrando adequados e promissores (GONZALEZ; SARGENT; ENNIS, 2021).

Porosidade, densidade e área superficial

Matrizes álcali ativadas exibem excelentes propriedades, físicas, mecânicas, químicas e térmicas (CONG; CHENG, 2021), que são influenciadas diretamente por qualquer e toda perturbação no sistema, seja o tipo ou relações de materiais, quantidades ou relações de óxidos, seja pelas condições de fabricação ou cura, (DUXSON et al., 2007), portanto, todas as características dos materiais álcali ativados não são aplicadas a todas as formulações

A porosidade, por exemplo, é uma característica intrínseca de todos os materiais, ela se apresenta na matriz álcali ativada com poros que podem variar de macro a poros moleculares (CHEN et al., 2022). De acordo com os processos de cura e os tipos de matérias-primas, esses poros podem ser do tipo aberto ou fechado. E conforme o aumento do volume de poros fechados, maior é a capacidade de resistência da matriz (AREDES et al., 2015).

Nos artigos analisados, as amostras de Piccolo et al. (2021), à base de metacaulim com biochar de fonte lenhosa, por exemplo, apresentaram característica de alta porosidade. Cujas matrizes utilizando apenas metacaulim, evidenciaram uma porosidade de 47%, e com a substituição de 70% do precursor por biochar, essa porcentagem caiu para 42%. Essa característica provém do preenchimento dos poros da matriz com biochar, enquanto ele mesmo é poroso. O mesmo foi confirmado por Khamlue et al. (2019), com metacaulim e biochar de casca de ovo, onde a porosidade, o tamanho e a quantidade de poros diminuíram conforme o aumento do teor de biochar. Conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com a variação do teor de biochar de 0 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.a**), 10% (**Erro! Fonte de referência não encontrada.b**), 20% (**Erro! Fonte de referência não encontrada.c**), e 30% (**Erro! Fonte de referência não encontrada.d**), a porosidade diminuiu de 67% (0%) para 45% (30%) e o tamanho dos poros diminuiu de 107 μm com 0% de biochar para 59 μm com 30% de biochar. Entretanto, a maior frequência de distribuição de poros se encontrava na faixa de 20-30 μm .

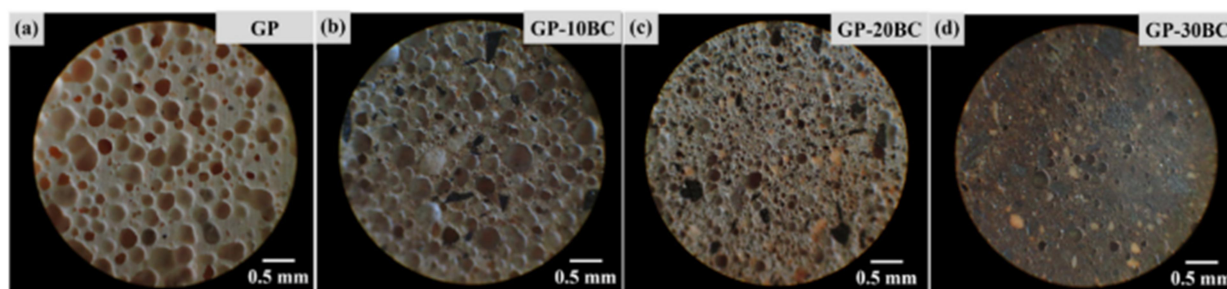


Figura 3: Variações de porosidade com o incremento de biochar. Fonte: (KHAMLUE et al., 2019).

Apesar da influência na porosidade, o aumento do teor de biochar nas análises de Piccolo et al. (2021) não interferiu nos valores de densidade de amostras. Entretanto, nos resultados de Khamlue et al. (2019), a densidade aumentou à medida que o teor de biochar aumentou, de 0,8 g/cm^3 com 0% de biochar para 1,25 g/cm^3 com 30% de biochar. Em relação a área superficial, amostras de metacaulim e biochar tem característica de alta superfície específica, que se mostrou crescente conforme o aumento da porcentagem de biochar (PICCOLO et al., 2021).

Ambas as características de área superficial e volume de poros é evidenciado por Dzoujo et al. (2022), visto que a área superficial e o volume total de poros das matrizes aumentaram com o aumento da taxa de incorporação de biochar de 0 a 10% na matriz de 4,34 m^2/g para 5,00 m^2/g e 6,02 para 10 ($\times 10^{-3}$) cm^3/g , respectivamente. Com 20% de substituição, a superfície específica diminuiu de 5,00 para 3,00 m^2/g .

Resistência à compressão

A matriz álcali ativada apresenta resistências mecânicas elevadas (AMRAN et al., 2020), que são influenciadas principalmente pelas matérias-primas utilizadas e as condições de cura (CONG; CHENG, 2021). Para os processos de cura, comumente, empregam-se altas temperaturas. No caso, o mero aumento na temperatura de síntese é suficiente para aumentar o nível de ordenação dos ligantes álcali ativados (CRIADO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2005; DUXSON et al., 2007), ou seja, aumentando a temperatura de cura, acelera a reação e encurta o tempo de pega (HARDJITO et al., 2004; KIM; LEE, 2020), aumenta a mobilidade dos íons Na^+ e OH^- e leva ao desenvolvimento de cristais de aluminossilicato de sódio extremamente densos, responsáveis pela elevada resistência inicial (JINDAL et al., 2023; ROVNANÍK, 2010; SAJAN et al., 2021).

Ou seja, conforme a mudança dos parâmetros de síntese, as propriedades da matriz são alteradas. Com isso, Devi e Saroha, 2016 estudaram a resistência à compressão, de matrizes formuladas apenas com biochar de lodo de estação de tratamento de efluentes, conforme o efeito da molaridade do hidróxido alcalino (NaOH) entre 5 e 20 Mol, a porcentagem de água da mistura, entre 5 e 20%, quanto a quantidade de CaCO_3 , entre 0,5 e 2,0g e conforme a temperatura de cura, entre 40 e 100° C.

Para o efeito da concentração de NaOH, o aumento, de 5 para 20 Moles proporcionou o aumento da resistência, devido ao aumento da quantidade de Na^+ para a dissolução do aluminossilicato presente no biochar, que é responsável pela dissolução de espécies químicas, proporcionando maior grau de ativação alcalina (YAO et al., 2009). Este aumento foi mais notável entre 5 e 15 Mol, sendo que de 15 a 20 Mol nenhuma resistência adicional foi obtida (DEVI; SAROHA, 2016).

Em relação a dosagem de água, a concentração entre 5 e 15% promoveram uma melhor ordenação e consequente aumento da resistência, porém, acima de 15%, a água começou a afetar a estrutura, criando poros maiores e enfraquecendo a matriz. Já em relação ao teor de CaCO_3 , foi observado que conforme ocorre o aumento do CaCO_3 , a resistência mecânica também aumenta, já que ele atua como um agente de cimentação e que a sua finura consiga

preencher os poros, resultando em amostras pouco porosas. Por fim, a ação junto ao NaOH é capaz de aumentar a alcalinidade, potencializando a dissolução de Si e Al e promovendo o aumento do grau de polimerização e da resistência mecânica (DEVI; SAROHA, 2016).

Com relação a influência da temperatura, a resistência mecânica aumentou com o aumento de temperatura de cura até 80° C e nenhum aumento adicional acima disso, pois levou a formação de um gel que dificulta a dissolução da sílica e da alumina, diminuindo a resistência, favorece a evaporação rápida da água, ocasionando uma polimerização incompleta (DEVI; SAROHA, 2016). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a variação da dosagem do NaOH em diferentes temperaturas, os teores de 15 e 20 Mol se sobrepõem, evidenciando a melhor resistência à compressão para a dosagem de 15 Mol em todas as temperaturas, principalmente a 80° C. As amostras de Bai et al. (2024), a base de cinzas volantes e escória, quando curadas em elevadas temperaturas também resultaram no desenvolvimento acelerado da resistência, incluindo as matrizes com biochar de caroço de azeitona. Visto que a alta temperatura acelera o ganho de resistência inicial.

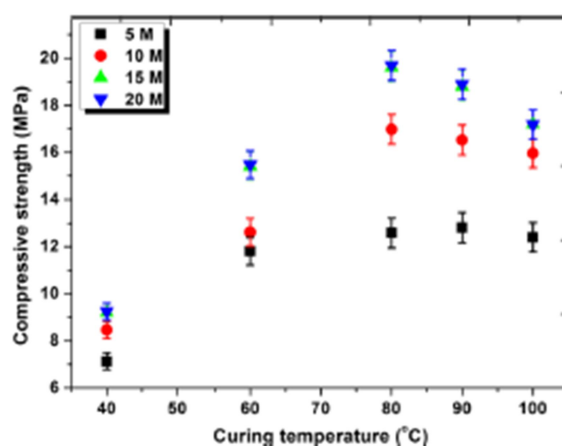


Figura 4: Efeito de NaOH com a cura em alta temperatura na resistência à compressão da matriz álcali ativada com biochar. Fonte: (DEVI; SAROHA, 2016).

A variação do teor de biochar nas matrizes também afeta as propriedades de resistência, ou seja, pastas de metacaulim, cinzas volantes e cinzas pesadas com incremento de 8% de biochar de resíduos de madeira obtiveram um aumento da resistência mecânica, cerca de 40,8 MPa com o aumento do teor de biochar, comparado a 34,5 MPa nas amostras sem biochar (ZHANG et al., 2021). Corroborado por Prabahar et al. (2021), onde a resistência à compressão da maioria das pastas álcali ativadas por escória aumentou ligeiramente quando o biochar foi adicionado, com porcentagens de substituição abaixo de 2%. E diferentemente dos teores de substituição de cimento Portland por biochar, que ficam abaixo de 5-10%, estudos de substituição em matrizes álcali ativadas tem chegado a altos teores. Por exemplo, a substituição de metacaulim por 40% de biochar de palha de trigo e *miscanthus* obteve resistência à compressão média de cerca de 12 MPa (FARGES et al., 2018).

E conforme a variação de idade, a resistência à compressão também é crescente. Assim sendo, para as misturas à base de escória com a incorporação de 2% de biochar de casca de arroz, a resistência à compressão aumentou conforme o aumento da idade das amostras, com resultado de 16,5% (26,1 MPa), 13,5% (32,8 MPa), 7,4% (43,8 MPa) e 12,2% (50,6) aos 3, 7, 28 e 56 dias respectivamente, em relação ao ensaio de controle. Isso devido a capacidade do biochar em absorver a água livre, que causaria poros, levando assim à densificação da matriz, resultando no melhor desenvolvimento da resistência mecânica (EGODAGAMAGE et al., 2023).

Aliado às condições de cura, a cura por 28 dias em condições ambientes promoveu uma melhor ligação e melhor interconexão das partículas de biochar e com isso uma superfície mais lisa e com microfissuras mais estreitas foi obtida em comparação a cura de 20° C por 7 dias. Elevando a temperatura a 40° C a superfície tornou-se excepcionalmente lisa e a matriz mais densa em 7 e 28 dias (BAI et al., 2024).

Eflorescência

O excesso dos sais metálicos Na^+ e K^+ livres na matriz álcali ativada, provenientes da solução alcalina, podem reagir com o CO_2 do ambiente, formando Na_2CO_3 e KCO_2 , ou comumente eflorescências. Por exemplo, no estudo de Piccolo et al. (2021), as amostras com ambos os precursores, metacaulim e cinzas pesadas, com percentuais de substituição por biochar à base de lenha, eram compactas e apresentavam uma superfície lisa e porosa, porém, com a presença de eflorescências que deixaram a matriz com o aspecto esbranquiçado, conforme a Figura 5. Neste mesmo estudo, a

quantidade de eflorescência progrediu conforme o aumento do teor de biochar, devido ao aumento da porosidade e permeabilidade da matriz, permitindo a migração desses sais (PICCOLO et al., 2021).

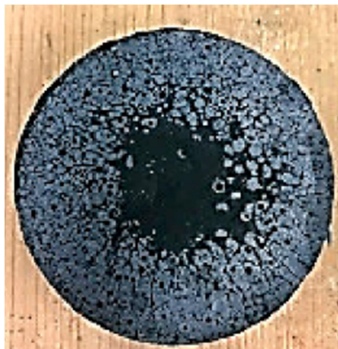


Figura 5: Presença de eflorescência (carbonato de sódio) na superfície do corpo de prova. Fonte: (PICCOLO et al., 2021).

Capacidade de remoção de contaminantes

Devido ao grau de porosidade, produtos álcali ativados e o próprio biochar possuem afinidade na remoção e no encapsulamento de compostos contaminantes (AMBAYE et al., 2021; SIYAL et al., 2018). Por exemplo, nas misturas à base de escória granulada nos estudos de (VAIČIUKYNIENĖ et al., 2024), a eficiência de adsorção de Pb^{2+} apenas do biochar de resíduos de madeira atingiu 44,9%, e os compósitos álcali ativado/biochar atingiram de 70,5 a 79,0%, sendo 224,5 mg/g para o biochar e 352,5 mg/g a 395,0 mg/g para os compósitos. Esse potencial é devido a capacidade de sorção combinada, à composição mineral e a microestrutura dos sorventes.

Nos testes de remoção de naftaleno, a matriz pura de metacaulim obteve o percentual de 4,37%, em contrapartida, a inclusão de biochar de lignina na matriz promoveu a remoção de 30,98%, evidenciando que o biochar pode melhorar a adsorção de materiais, alterando a estrutura compacta e aumentando a porosidade do material (ZHU et al., 2022).

Na remoção de tetraciclina, o material álcali ativado e o biochar de lignina ofereceu uma remoção rápida e eficiente, cerca de 80% foi degradado em 5 horas e o potencial máximo de degradação pela matriz poderia ser de 92,48% após 11 horas. Os testes de ciclos repetidos evidenciaram que mesmo após 5 ciclos, a remoção de tetraciclina ainda conferia valores acima de 80%, dado que, o potencial de remoção deste material é devido à grande área superficial, a alta porosidade e os abundantes grupos funcionais superficiais (HUANG et al., 2020). E na imobilização de azul de metileno, matrizes de metacaulim com biochar de casca de coco conseguiram reduzir até 80% o teor de corante (KHAMLUE et al., 2019).

Dzoujo et al. (2022), utilizando pozolana por ativação alcalina com teores de substituição de biochar de bagaço de cana, para adsorção de corante azul de metileno de efluentes industriais, mostrou-se eficiente com a capacidade de adsorção de 455,46 mg de corante, por grama de biochar, em traços com apenas 10% de substituição. Nas análises de Khamlue et al. (2019), para a remoção deste mesmo composto, atingiu a capacidade de 60-80% da remoção do poluente em matriz à base de metacaulim com substituição de 30% por biochar de casca de coco.

Na remoção e imobilização de metais pesados através do teste de lixiviação, Devi e Saroha (2016) estudou seis tipos de metais pesados, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb e Cd nos tijolos de biochar de lodo de estação de tratamento de esgoto em relação ao incremento de $CaCO_3$. Conforme ocorreu o aumento $CaCO_3$, diminuiu o potencial de lixiviação, dessa forma, o menor teor de lixiviação foi obtido com 2,0 g de carbonato de cálcio.

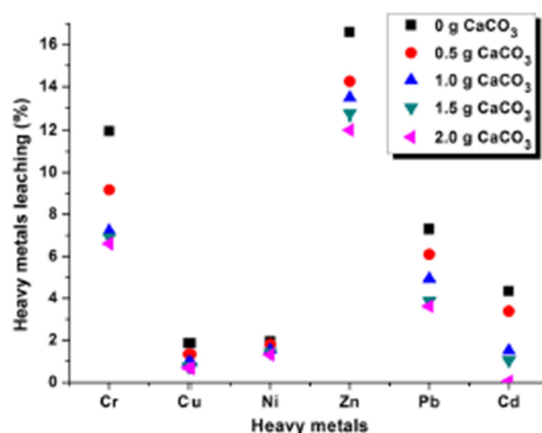


Figura 6: Percentual de remoção de metais pesados em relação à quantidade de carbonato de cálcio. Fonte: (DEVI; SAROHA, 2016).

A razão devido a minimização da lixiviação decorreu da presença de compostos de cálcio que ajudam a imobilizar metais pesados na matriz. Entre os metais pesados, seguindo a ordem de menor para o maior teor de lixiviação foi a seguinte: Cu < Ni < Cd < Pb < Cr < Zn, conforme Figura 6. Consequentemente, a avaliação de risco estabeleceu que os metais pesados imobilizados no tijolo a base de biochar não apresenta risco de contaminação ao ambiente.

Outro estudo na área de remoção de contaminantes, a imobilização de Pb, Ni e Cu aumentou com o aumento do teor de biochar de resíduos de madeira na matriz à base de metacaulim, cinzas volantes e cinzas pesadas com aplicação resultou num aumento do potencial de imobilização, chegando a 99,95% com 8% de biochar (ZHANG et al., 2021).

CONCLUSÕES

A presente revisão analisou 17 artigos correspondentes à produção de matrizes álcali ativadas com biochar que, contemplavam vários tipos de precursores e soluções ativadoras, bem como, diversos biochars de diferentes biomassas incorporadas nas matrizes. No mais, a pequena quantidade de estudos a cerca desse produto pleiteia que, ainda há um campo de pesquisa muito grande para a abordagem de compósitos com biochar.

As matrizes compostas com biochar apresentaram diferentes características de porosidade, densidade e área superficial, com isso, a depender da aplicação, os materiais podem ter alta resistência mecânica devido à baixa porosidade, alta densidade e alto grau de adsorção de gases ou poluentes devido à alta área superficial. Conforme algumas amostras foram testadas, ficou evidente a capacidade de remoção de metais pesados e poluentes, ou seja, o preparo das matrizes com biochar mantém as diversas propriedades do biochar. Apesar das excelentes propriedades, uma característica comum dos materiais álcali ativados e que foi intensificada com o biochar, foi a formação de eflorescência. No entanto, conforme algumas amostras foram testadas, ficou evidente a capacidade de remoção de metais pesados e poluentes, ou seja, o preparo das matrizes com biochar mantém as diversas propriedades do biochar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMBAYE, T. G. et al. **Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater**. International Journal of Environmental Science and Technology. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 1 out. 2021.
2. AMRAN, Y. H. M. et al. **Clean production and properties of geopolymer concrete; A review**. Journal of Cleaner Production, v. 251, 1 abr. 2020.
3. AREDES, F. G. M. et al. **Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer**. Ceramics International, v. 41, n. 6, p. 7302–7311, 25 Fev. 2015.
4. AYDIN, S.; BARADAN, B. **Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars**. Materials and Design, v. 35, p. 374–383, mar. 2012.
5. BAI, Y. et al. **Geopolymer stabilization of carbon-negative gasified olive stone biochar as a subgrade construction material**. Construction and Building Materials, v. 442, 6 set. 2024.
6. BARBHUIYA, S.; BHUSAN DAS, B.; KANAVARIS, F. **Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability**. Case Studies in Construction Materials, v. 20, 1 Jul. 2024.
7. CHEN, S. et al. **Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review**. Construction and Building Materials, v. 328, 8 mar. 2022.

8. CONG, P.; CHENG, Y. **Advances in geopolymer materials: A comprehensive review.** Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 8, n. 3, p. 283–314, 25 Maio 2021.
9. CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products.** Fuel, v. 84, n. 16, p. 2048–2054, Nov. 2005.
10. DANISH, A. et al. **Reusing biochar as a filler or cement replacement material in cementitious composites: A review.** Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 20 set. 2021.
11. DEVI, P.; SAROHA, A. K. **Risk assessment and technical feasibility of usage of paper mill sludge biochar-based exhausted adsorbent for geopolymeric brick formation.** Environmental Science and Pollution Research, v. 23, n. 21, p. 21641–21651, 1 Nov. 2016.
12. DOCTOLERO, J. Z. S. et al. **Self-healing biogeopolymers using biochar-immobilized spores of pure-and co-cultures of bacteria.** Minerals, v. 10, n. 12, p. 1–17, 1 Dez. 2020.
13. DUXSON, P. et al. **Geopolymer technology: The current state of the art.** Journal of Materials Science, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 19 Dez. 2007.
14. DZOUJO, H. T. et al. **Synthesis of pozzolan and sugarcane bagasse derived geopolymer-biochar composites for methylene blue sequestration from aqueous medium.** Journal of Environmental Management, v. 318, 15 set. 2022.
15. EGODAGAMAGE, H. et al. **Effective use of biochar as an additive for alkali-activated slag mortar production.** Construction and Building Materials, v. 370, 17 mar. 2023.
16. FARGES, R. et al. **Insulating foams and dense geopolymers from biochar by-products.** Journal of Ceramic Science and Technology, v. 9, n. 2, p. 193–200, 1 jun. 2018.
17. GONZALEZ, J.; SARGENT, P.; ENNIS, C. **Sewage treatment sludge biochar activated blast furnace slag as a low carbon binder for soft soil stabilization.** Journal of Cleaner Production, v. 311, 15 ago. 2021.
18. HARDJITO, D. et al. **On the development of fly ash-based geopolymer concrete.** ACI Materials Journal, v. 101, p. 467–472, 2004.
19. HUANG, J. et al. **In-situ synchronous carbonation and self-activation of biochar/geopolymer composite membrane: Enhanced catalyst for oxidative degradation of tetracycline in water.** Chemical Engineering Journal, v. 397, 1 out. 2020.
20. HUANG, J. et al. **In situ preparation of highly graphitized N-doped biochar geopolymer composites for efficient catalytic degradation of tetracycline in water by H₂O₂.** Environmental Research, v. 219, 15 Fev. 2023.
21. JAGABA, A. H. et al. **Biochar-based geopolymer nanocomposite for COD and phenol removal from agro-industrial biorefinery wastewater: Kinetic modelling, microbial community, and optimization by response surface methodology.** Chemosphere, v. 339, 1 out. 2023.
22. JEON, I. K. et al. **Biochar-geopolymer composite for structural capacitors.** Materials Letters, v. 371, 15 set. 2024.
23. JINDAL, B. B. et al. **Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application.** Environmental Science and Pollution Research. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 1 fev. 2023.
24. KHAMLUE, P. et al. **The effects of Biochar additive on the properties of Geopolymer materials.** Key Engineering Materials, v. 798, p. 273–278, 2019.
25. KIM, B.; LEE, S. **Review on characteristics of metakaolin-based geopolymer and fast setting.** Journal of the Korean Ceramic Society, v. 57, n. 4, p. 368–377, 8 abr. 2020.
26. NAVARATNAM, S. et al. **Residual stress-strain relationship for the biochar-based mortar after exposure to elevated temperature.** Case Studies in Construction Materials, v. 14, 1 jun. 2021.
27. PICCOLO, F. et al. **Synthesis and characterization of biochar-based geopolymer materials.** Applied Sciences (Switzerland), v. 11, n. 22, 1 Nov. 2021.
28. PRABAHAR, J. et al. **The Effect of Biochar on the Properties of Alkali-Activated Slag Pastes.** Construction Materials, v. 2, n. 1, p. 1–14, 23 Dez. 2021.
29. PRANEETH, S. et al. **Biochar admixed lightweight, porous and tougher cement mortars: Mechanical, durability and micro computed tomography analysis.** Science of the Total Environment, v. 750, 1 Jan. 2021.
30. RANGAN, V. **Geopolymer concrete for environmental protection.** The Indian Concrete Journal, p. 41–59, 2014.
31. ROVNANÍK, P. **Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 7, p. 1176–1183, Jul. 2010.
32. SAJAN, P. et al. **Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer.** Cleaner Materials, v. 1, 1 Dez. 2021.
33. SIYAL, A. A. et al. **A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes.** Journal of Environmental Management. Academic Press, 15 out. 2018.

34. VAIČIUKYNIENĖ, D. et al. **Sorption properties of Pb²⁺ ions from water by alkali activated slag/biochar composites.** Biomass Conversion and Biorefinery. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024.
35. YAO, X. et al. **Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry.** Thermochimica Acta, v. 493, n. 1–2, p. 49–54, 10 set. 2009.
36. YARO, N. S. A. et al. **Optimizing biochar-based geopolymer composites for enhanced water resistance in asphalt mixes: an experimental, microstructural, and multi-objective analysis.** Journal of Engineering and Applied Science, v. 70, n. 1, 1 Dez. 2023.
37. YONG-JIE, H. et al. **Strength optimization and key factors correlation of one-part fly ash/ladle furnace slag (FA/LFS) geopolymer using statistical approach.** Journal of Building Engineering, v. 63, 1 Jan. 2023.
38. ZHANG, X. et al. **Synergistic effects of iron (Fe) and biochar on lightweight geopolymers when used in wastewater treatment applications.** Journal of Cleaner Production, v. 322, 1 nov. 2021.
39. ZHU, Y. et al. **A low-cost and eco-friendly powder catalyst: Iron and copper nanoparticles supported on biochar/geopolymer for activating potassium peroxydisulfate to degrade naphthalene in water and soil.** Chemosphere, v. 303, 1 set. 2022.