

COMO OS MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS PODEM CONTRIBUIR PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

HOW ALKALI-ACTIVATED MATERIALS CAN CONTRIBUTE TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT

JESUS, Aedjota Matos de¹
 BRANDÃO, Luiz Felipe Alencar²
 AGUIAR NETO, Sabino Alves de³
 PICANÇO, Marcelo de Souza⁴

Resumo: A deterioração do meio ambiente e o aumento das emissões de gases de efeito estufa demandam a adoção de construções e materiais de construção sustentáveis. A reciclagem de resíduos em novos produtos é um elemento chave para a consecução do desenvolvimento sustentável e da economia circular, dada a interdependência dos aspectos ambientais, econômicos e sociais envolvidos. Os Materiais álcali-ativados (MAAs) são cada vez mais estudados devido às suas propriedades ecológicas e capacidade de utilizar vários resíduos como matéria-prima. Embora haja muitos estudos sobre os MAAs, pouco se sabe sobre como eles podem contribuir para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esta revisão bibliográfica sistemática avalia o potencial de contribuição dos MAAs na indústria da construção civil para atingir os ODS. Com base nos artigos indexados no Web of Science, foram considerados o modo de produção, as propriedades, características e perspectivas de aplicação na engenharia civil. A revisão identificou direta e indiretamente que os MAAs podem contribuir para atingir 16 das 17 metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas para os ODS.

Palavras-chave: geopolímero; sustentabilidade; construção civil.

Abstract: The deterioration of the environment and the increase in greenhouse gas emissions demand the adoption of sustainable buildings and construction materials. Recycling waste into new products is a key element for achieving sustainable development and circular economy, given the interdependence of the environmental, economic, and social aspects involved. Alkali-activated materials (AAMs) have been increasingly studied due to their ecological properties and ability to use various waste materials as raw materials. Although there are many studies on AAMs, little is known about how they can contribute to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). This systematic literature review assesses the potential contribution of AAMs in the construction industry to achieve the SDGs. Based on articles indexed in the Web of Science, the production mode, properties, characteristics, and prospects of application in civil engineering were considered. The review identified that AAMs can directly and indirectly contribute to achieving 16 of the 17 goals established by the United Nations for the SDGs.

Keywords: geopolymer; sustainability; civil construction.

¹ Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA) – Universidade Federal de Rondônia (UNIR), - aedjota.jesus@unir.br

² Doutorando em Engenharia Civil na UFPA - luis.brandao@ananindeua.ufpa.br

³ mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA) – Universidade do Estado do Pará (UEPA) - sabino.neto@unifesspa.edu.br

⁴ Doutorado em Geologia e Geoquímica pela Universidade Federal do Pará, Brasil (UFPA) – Universidade Federal do Pará (UFPA) - marcelosp@ufpa.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem sido impulsionada a adotar soluções sustentáveis para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU na Agenda 2030. Entre as soluções, a redução das emissões de gases do efeito estufa é um dos desafios mais relevantes, considerando que a produção de cimento Portland é a principal fonte de emissões da indústria. Dados indicam que a produção de uma tonelada de cimento Portland emite cerca de 0,79 tonelada de CO₂, e em 2019, a produção mundial de cimento Portland gerou aproximadamente 3,24 bilhões de toneladas de CO₂. Além disso, espera-se um aumento de 50% na produção de cimento até 2050, o que pode agravar ainda mais a emissão de gases poluentes (MISHRA; SARSAIYA, GUPTA, 2022; SOOMRO; TAM; EVANGELISTA, 2023).

A sustentabilidade na construção civil pode ser alcançada de três maneiras: redução do consumo de energia bruta, redução das emissões poluentes e diminuição do consumo de recursos naturais não renováveis (COPPOLA et al., 2018; POU DYAL; ADHIKARI, 2021). No entanto, os cimentos alternativos, como os materiais álcali-ativados, surgem como uma solução promissora para a construção sustentável. Esses cimentos apresentam propriedades compatíveis com o cimento Portland, como resistência mecânica e durabilidade, e ainda emitem menos CO₂ e demandam menos energia em seu processo de produção (PROVIS, 2017; WU et al., 2019; GÖKÇE; TUYAN; NEHDI, 2021).

Material álcali-ativado (MAA) é um termo amplo e engloba uma variedade de materiais, incluindo polímeros inorgânicos, geopolímeros, materiais ativados por álcalis, cimentos álcali-ativados, cerâmica alcalina, geocimento entre outros (VAN DEVENTER et al., 2010; BERNAL; PROVIS, 2014). Embora haja uma variedade de terminologias utilizadas para descrever esses materiais, é importante destacar que todos eles são sintetizados utilizando a mesma tecnologia de ativação alcalina, que envolve um matéria-prima com elevado teor de sílica e alumina e um ativador alcalino (DUXSON et al., 2007).

Os MAAs são ainda mais vantajosos ambientalmente por permitirem a incorporação de resíduos em seu processo de produção. Embora o metacaulim seja o principal precursor na produção desses cimentos (ABABNEH; MATAKKAH; AQEL; 2020), diversos resíduos podem ser utilizados, como os provenientes de termoelétricas (BAJPAI et al., 2020), siderúrgicas (MEHTA *et al.*, 2020), processamento de minérios (HERTEL; PONTIKES, 2020), agroindústrias (SOUSA et al., 2022), tratamento de água (BOURZIK et al., 2022), entre outros (WU *et al.*, 2019).

Apesar das perspectivas promissoras do uso de MAAs na mitigação dos impactos ambientais na construção civil, ainda existem desafios práticos que precisam ser superados (ASSI et al., 2021; FAROOQ et al., 2021). É importante avaliar a aplicabilidade desses materiais na indústria da construção e entender como eles podem contribuir para alcançar os ODS (SHEHATA et al., 2022). Neste sentido, esta pesquisa tem como avaliar o potencial de contribuição dos MAAs na indústria da construção civil para alcançar os ODS estabelecidos pelas Nações Unidas, por meio da análise de sua aplicabilidade prática na mitigação dos impactos ambientais, sociais e econômicos.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática dos artigos indexado no *Web of Science*, que é reconhecida como uma fonte confiável de pesquisa em engenharia civil. A busca bibliográfica foi realizada em janeiro de 2023 e incluiu artigos científicos publicados em inglês.

Foram utilizados os termos indexados na língua inglesa, uma vez que possui maior abrangência e alcance. Para tanto, foram utilizados dois grupos: o primeiro associado aos materiais álcali-ativados (*alkali-activated* e *geopolymer*), enquanto o segundo, relacionado desenvolvimento sustentável (*sustainable development* e *sustainability*). Para realizar a busca, foram utilizados operadores booleanos AND e OR, tal que o operador AND foi utilizado entre os grupos, ao passo que o operador OR foi utilizado entre os sinônimos de cada grupo. Neste sentido, a linguagem de busca utilizada se deu pela seguinte expressão: ("*alkali-activated*" OR "*geopolymer*") AND ("*sustainable development*" OR "*sustainability*").

Após a busca inicial, os artigos foram refinados por meio da análise do título, resumo e palavras-chave. Foram selecionados apenas os artigos que apresentavam campo de pesquisa aplicada em engenharia civil. Em seguida, os artigos selecionados foram lidos na íntegra, e as informações relevantes foram extraídas e sintetizadas, comparando os dados encontrados pelos autores e relacionados com os ODS.

3. CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS PARA OS ODS

Os 17 ODS foram anunciados pela Organização das Nações Unidas (ONU) no final de 2015, como um plano para transformar o mundo nas áreas de pessoas, prosperidade e planeta até 2030. A Agenda 2030 da ONU aborda uma ampla variedade de questões relacionadas ao desenvolvimento econômico, social e ambiental, tais como água, saneamento, bem-estar, educação de qualidade, fome, pobreza, igualdade de gênero, mudanças climáticas, energia acessível, meio ambiente, paz e justiça social. Diversos estudos têm sido realizados para mostrar o papel de diferentes processos e/ou materiais na conquista dos ODS, e, portanto, é de grande relevância investigar como os MAAs aplicados à construção civil podem contribuir para alcançar esses objetivos (TSALIS et al., 2020; SHEHATA et al., 2022).

Os MAAs têm sido apontados como uma alternativa promissora na construção civil sustentável. Esses materiais apresentam vantagens ambientais em relação aos materiais tradicionais, como a redução de emissões de CO₂ e o aproveitamento de resíduos industriais. Além disso, podem contribuir para a promoção da eficiência energética na construção e para a melhoria da qualidade das edificações (OMER; NOGUCHI, 2020). Dessa forma, os principais achados de como os MAAs podem contribuir para alcançar os ODS para o avanço do desenvolvimento sustentável na indústria da construção são apresentados a seguir.

3.1. ODS 1: Erradicação da pobreza

As construções convencionais que utilizam concreto de cimento Portland apresentam elevado custo, especialmente para as famílias mais carentes (OMER; NOGUCHI, 2020). O uso de MAAs para construção pode ainda enfrentar obstáculos econômicos a serem investigados, contudo, tais materiais apresentam potencial para contribuir com a erradicação da pobreza em várias maneiras, haja vista que são materiais de construção mais acessíveis e econômicos em comparação a alguns materiais convencionais, como o cimento Portland (MCLELLAN *et al.*, 2011; SHAMSAEI *et al.*, 2021). Portanto, o uso de materiais álcali-ativado pode tornar a construção mais barata e acessível a comunidades de baixa renda, o que pode levar a melhorias na habitação e na infraestrutura local. Além disso, a produção de MAAs pode envolver a utilização de resíduos industriais ou subprodutos, o que pode gerar oportunidades de emprego e renda para comunidades carentes, por meio de uma economia circular (NODEHI; TAGHVAAEE, 2022).

3.2. ODS 2: Fome zero e agricultura sustentável

A ODS 2 tem como objetivo erradicar a fome e promover a agricultura sustentável até 2030. O uso de MAAs na construção pode contribuir para alcançar esse objetivo, pois esses

materiais podem ser produzidos a partir de subprodutos industriais e/ou resíduos, tais como escórias, cinzas volantes, rejeitos de mineração e outros materiais ricos em sílica e alumínio, que normalmente são descartados no meio ambiente (WU *et al.*, 2019). Assim, a produção de MAAs pode, portanto, reduzir a quantidade de resíduos depositados em aterros e contribuir para a preservação do meio ambiente.

Além disso, o uso de MAAs pode ajudar a reduzir a fome, uma vez que esses materiais são mais acessíveis e econômicos do que o cimento Portland, o que pode levar a uma redução de custos na construção de infraestrutura agrícola, como armazéns, silos e outras estruturas, contribuindo para aumentar a disponibilidade e acessibilidade de alimentos (MCLELLAN *et al.*, 2011). A produção de MAAs também pode gerar novos postos de trabalho e aumentar a renda das comunidades locais, especialmente em áreas rurais, onde a agricultura é uma atividade econômica importante (KHEIMI *et al.*, 2022; NODEHI; TAGHVAEE, 2022). Dessa forma, o uso de MMA pode ter um impacto positivo na ODS 2 e contribuir para a promoção da agricultura sustentável e da segurança alimentar.

3.3. ODS 3: Saúde e bem-estar

Os MAAs podem contribuir para a ODS 3 - Saúde e bem-estar, principalmente devido à sua baixa emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) e à redução do uso de materiais de construção tóxicos. Os COVs, como formaldeídos, são liberados por alguns materiais de construção e podem afetar a qualidade do ar interno, causando alergias, doenças respiratórias e até mesmo câncer (QUE *et al.*, 2013). Além disso, a substituição de materiais tradicionais, como o cimento Portland, pelo MAAs pode reduzir a exposição a sílica, que pode causar doenças respiratórias graves, como a tuberculose e silicose (REES; MURRAY, 2020).

O uso de MAAs na construção também pode contribuir para melhorar o conforto térmico e acústico dos edifícios, promovendo um ambiente mais saudável e confortável para as pessoas que utilizam esses espaços (STOLZ; BOLUK; BINDIGANAVILE, 2018; NOVAIS *et al.*, 2020). Os MAAs também podem ser utilizados na fabricação de materiais de construção para ambientes hospitalares e laboratoriais, por exemplo, devido à sua alta durabilidade, resistência a produtos químicos e propriedades antibacterianas. Essas propriedades contribuem para a promoção da saúde e prevenção de infecções (SGARLATA *et al.*, 2021). Portanto, o uso de MAAs na construção pode contribuir para a ODS 3 através da redução da poluição do ar, promoção do conforto térmico e acústico, prevenção de doenças respiratórias e promoção da saúde em ambientes hospitalares e laboratoriais.

3.4. ODS 4: Educação de qualidade

O uso de MAAs pode contribuir para a ODS 4 (Educação de qualidade) por meio da construção e melhorias nas instalações físicas para educação. A construção de escolas e outros edifícios educacionais com esses materiais pode ser mais acessível e econômica do que com materiais tradicionais, como o cimento Portland, possibilitando a construção de mais escolas em regiões onde o acesso à educação é limitado (OMER; NOGUCHI, 2020; MCLELLAN *et al.*, 2011). Além disso, esses materiais também podem ser utilizados na construção de edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes, que podem fornecer um ambiente de aprendizado mais saudável e produtivo para estudantes e professores (WU *et al.*, 2019). Ademais, a construção de escolas com esses materiais pode servir como uma oportunidade para educar as comunidades locais sobre práticas sustentáveis de construção e como o uso desses materiais pode contribuir para um futuro mais sustentável.

3.5. ODS 5: Igualdade de gênero

A indústria da construção é amplamente dominada por homens e as mulheres são sub-representadas, principalmente devido à discriminação e hostilidade (LEKCHIRI; KAMM, 2020). No entanto, o uso de MAAs na construção pode ajudar a promover a igualdade de gênero, já que as construções com MAAs são relativamente leves e, conseqüentemente, exige menor trabalho braçal e oferece uma oportunidade para as mulheres trabalharem na produção e aplicação dos materiais (ALBEGMPRLI; AL-QAZZAZ; REJEB, 2012). Além disso, o uso de MAAs na construção pode levar a uma construção mais rápida e eficiente, devido ao uso da impressão 3D, por exemplo (GÖKÇE; TUYAN; NEHDI, 2021; RAZA; ZHONG; KHAN, 2022). Isso pode liberar tempo para outras atividades, como a educação e a formação de mulheres, o que, conseqüentemente, aumenta suas oportunidades de emprego e renda e contribui para a promoção da igualdade de gênero.

3.6. ODS 6: Água potável e saneamento

Os MAAs podem ter um impacto positivo na ODS 6 de diversas maneiras. Primeiramente, esses materiais podem ser usados para encapsular algumas substâncias tóxicas em sua matriz, como sais de chumbo e estanho, sulfetos e fosfatos, e até mesmo radioativos, como urânio e rádio (DAVIDOVITS, 2002; SHI; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2006; ZHANG *et al.*, 2022). Isso é fundamental para a preservação e uso sustentável dos recursos hídricos, pois evita a lixiviação desses agentes nocivos para o solo e as águas subterrâneas, prevenindo a contaminação desses recursos.

Os MAAs apresentam grande potencial para contribuir com a promoção da água potável, uma vez que podem ser utilizados no tratamento de água e águas residuais. É possível produzir filtros permeáveis a partir desses materiais, que apresentam eficiência na subtração e troca catiônica de íons de amônia, tornando-se adequados para o tratamento de efluentes. Os MAAs também podem ser utilizados na desinfecção biológica e alcalinização da água, contribuindo para a remoção de impurezas e melhoria da qualidade da água (LUHAR *et al.*, 2021). Além disso, os MAAs possuem propriedades antibacterianas que podem ser usadas para o tratamento de água, melhorando sua qualidade e tornando-a mais segura para consumo humano (SGARLATA *et al.*, 2021). Dessa forma, o uso de MAAs na construção pode contribuir para a melhoria do acesso à água potável e saneamento, assim, ajudar a alcançar a ODS 6.

3.7. ODS 7: Energia limpa e acessível

A avaliação do ciclo de vida da construção civil revela que essa indústria é responsável por consumir pelo menos 43% de toda a energia de uma nação, e há tendência de aumento no consumo de energia durante a fabricação de materiais de construção, como o cimento Portland (ZHANG *et al.*, 2015). Em contrapartida, a produção de concreto álcali-ativado demanda 80% menos energia, quando comparado com a produção de cimento Portland (VAN DEVENTER *et al.*, 2010). A produção de cimento álcali-ativado a partir de resíduo de mineração consome até 33% da energia que seria empregada para produção de cimento Portland (JAMIESON *et al.*, 2015). Portanto, o uso de MAAs na construção civil pode ser visto como uma alternativa sustentável para a redução do consumo de energia pela indústria da construção, contribuindo para o alcance da ODS 7 de energia limpa e acessível, além de possibilitar a disponibilidade de mais energia para outras indústrias.

Além dos MAAs serem uma alternativa mais sustentável do ponto de vista energético em relação ao cimento Portland, também emitem menos gases de efeito estufa durante a produção. Pesquisas sobre o ciclo de vida dos MAAs têm demonstrado que sua produção emite menos de um terço de CO₂ na atmosfera do que qualquer produto derivado do cimento Portland. (MOSESON; MOSESON; BARSOUM, 2012; PROVIS, 2018; LUUKKONEN *et al.*, 2018). Isso significa que o uso desses materiais pode reduzir os custos de produção na construção civil e aumentar a eficiência energética.

3.8. ODS 8: Trabalho decente e crescimento econômico

A indústria da construção civil é uma importante fonte de empregos e contribui significativamente para a economia de um país, pois além de demandar intensiva mão de obra, é responsável por impulsionar diversos setores da economia (SILVA FILHO, 2016). Tendo em vista que o desenvolvimento da construção civil é crucial para o crescimento econômico e social de uma nação, a utilização de MAAs nesta indústria contribuir para promoção do trabalho decente e crescimento econômico.

Uma maneira de impulsionar o crescimento econômico é por meio da economia circular, e os MAAs podem contribuir significativamente para essa abordagem. A economia circular dos MAAs é baseada em suas diversas aplicações nos setores da construção e meio ambiente, que permitem o desenvolvimento de novos materiais a partir de resíduos reciclados, como aqueles provenientes de termoelétricas, siderúrgicas, processamento de minérios, agroindústrias e tratamento de água, entre outros. A partir disso, é possível criar novos modelos de negócios que promovam a circularidade dos materiais, aumentem a eficiência energética e o aproveitamento de recursos nos processos produtivos, além de gerar empregos em diversos setores, como a reciclagem de resíduos que podem ser utilizados na produção de MAAs (SHEHATA *et al.*, 2022; NODEHI; TAGHVAAEE, 2022).

3.9. ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura

As propriedades de elevada resistência inicial e durabilidade, tornam os MAAs adequados para a produção de estruturas pré-moldadas em grande escala, que podem ser construídas em um curto espaço de tempo sem risco de ser danificada durante o transporte e operação. Isso torna os MAAs uma alternativa competitiva ao cimento Portland para produção de concreto, podendo ser utilizado em projetos de construção em todo o mundo (AMRAN *et al.*, 2020; GÖKÇE; TUYAN; NEHDI, 2021). Inclusive a produção de elementos estruturais pré-moldados já foi realizada em condições de campo para demonstrar ainda mais a viabilidade do concreto álcali-ativado para aplicações em larga escala comparáveis ao concreto convencional de cimento Portland (REVATHI *et al.*, 2022).

Além disso, o MAA apresenta desempenho mecânico e trabalhabilidade adequado para aplicação na infraestrutura rodoviária e aeroportuária, como para construção e reparo de pavimento de rodovias e de pista de pouso e decolagem de aeronaves (BADKUL *et al.*, 2022; GLASBY *et al.*, 2015). A literatura já reconhece os MAA como uma alternativa tecnicamente competitiva em relação ao cimento Portland, tendo em vista suas propriedades que possibilitam sua eficiente substituição em projetos de engenharia (PROVIS, 2018; WU *et al.*, 2019;

NODEHI; TAGHVAAE, 2022). Nesse contexto, a adoção de MAA na construção civil e em obras de infraestrutura pode representar um potencial de inovação e competitividade para o setor de construção da engenharia civil.

3.10. ODS 10: Redução das desigualdades

O uso de MAAs na construção civil pode gerar empregos em setores como reciclagem de resíduos precursores de MAAs e em sua produção (NODEHI; TAGHVAAE, 2022). Isso pode ajudar a reduzir a desigualdade social, proporcionando oportunidades de emprego para pessoas em comunidades marginalizadas ou com poucas oportunidades econômicas.

Além disso, a utilização de MAAs pode ajudar a reduzir a desigualdade territorial, promovendo o desenvolvimento sustentável de áreas rurais e periféricas. Isso porque muitos dos resíduos reciclados usados como precursores para MAAs são produzidos nesses locais (QAIDI *et al.*, 2022a; QAIDI *et al.*, 2022b). Dessa forma, o uso de MAAs pode ajudar a valorizar e utilizar recursos locais, promovendo a descentralização e o desenvolvimento regional.

Por fim, é importante destacar que a implementação de MAAs na construção civil pode contribuir para a redução da desigualdade ambiental, ao promover a adoção de práticas mais sustentáveis e menos impactantes para o meio ambiente (TSALIS *et al.*, 2020). Isso pode beneficiar especialmente as comunidades mais vulneráveis, que muitas vezes sofrem mais com os efeitos da poluição e das mudanças climáticas.

3.11. ODS 11: Cidades e comunidades sustentáveis

Os MAAs possuem potencial para contribuir com o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, sendo uma alternativa economicamente viável e ambientalmente adequada ao cimento Portland, que é responsável por uma grande parcela das emissões de gases do efeito estufa geradas pela indústria da construção. A produção de uma tonelada de cimento Portland emite aproximadamente 0,79 toneladas de CO₂ na atmosfera, enquanto a produção de MAAs representa apenas 20% desse valor (MISHRA; SARSAIYA, GUPTA, 2022; PROVIS, 2018). Nessa perspectiva, a produção de um metro cúbico de concreto com cimento Portland emite cerca de 381 kg de CO₂, ao passo que a produção com material álcali-ativado emite apenas 210 kg (ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2018). O uso de MAAs pode, portanto, reduzir significativamente a pegada de carbono das construções, contribuindo para a criação de cidades e comunidades mais sustentáveis.

Além disso, o uso de MAAs na construção pode levar à melhoria da qualidade de vida nas cidades e comunidades, uma vez que esses materiais têm propriedades que possibilitam a construção de edifícios mais resistentes e duráveis (AMRAN *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2022). Isso significa que a manutenção e reparação de construções seriam reduzidas, o que pode levar a economias financeiras para governos locais e indivíduos, além de reduzir o desperdício de materiais de construção. Por essas razões, a implementação de MAAs pode contribuir para a construção de cidades e comunidades mais sustentáveis e resilientes.

3.12. ODS 12: Consumo e produção responsáveis

Os MAAs apresentam um grande potencial para contribuir com a redução da utilização de recursos naturais, como a exploração de pedreiras e minas para obtenção do cimento Portland. Isso se deve ao fato de que os MAAs podem ser produzidos a partir de resíduos, evitando assim a exploração de jazidas naturais. Por exemplo, escórias de alto-forno, cinzas volantes, resíduos de construção e demolição e lama vermelha, podem ser utilizados na produção de MAAs (KHEIMI *et al.* 2022; ROBAYO-SALAZAR; RIVERA, 2017; QAIDI *et al.*, 2022b). Assim, os MAA não só representam uma forma de uso eficiente dos recursos naturais como também gestão de resíduos. Isso significa que os resíduos deixam de ser depositados em aterros ou descartados no meio ambiente, sendo utilizados como matéria-prima para produção de novos materiais. Essa prática representa uma forma de gestão de resíduos eficiente e alinhada com os princípios da economia circular, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e para a diminuição da quantidade de resíduos gerados.

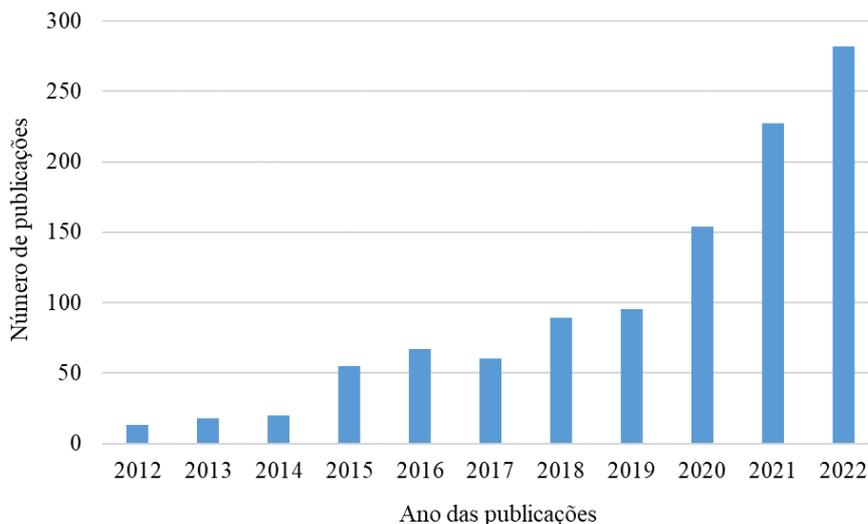
Além de promover uma menor emissão de CO₂ na atmosfera, ao utilizar MAAs na construção civil, é possível reduzir a quantidade de resíduos gerados na obra, uma vez que esses materiais têm elevada durabilidade e resistência mecânica e permitem uma melhor dosagem, evitando desperdícios e retrabalhos (AMRAN *et al.*, 2020; REVATHI *et al.*, 2022). Levando em consideração que os materiais de construção produzidos a partir de MAAs são relativamente mais leves e resistentes, é possível obter uma economia significativa nos custos de transporte, resultando em emissões de CO₂ reduzidas (NASSER; MOHAMMED; ALI, 2020; AZEVEDO *et al.*, 2020). Isso abre perspectivas para construção de estruturas com maior vida útil, reduzindo significativamente a geração de resíduos e a necessidade de demolição e reconstrução. Dessa forma, a produção e uso de MMA se alinham aos princípios da sustentabilidade, promovendo um uso mais eficiente dos recursos naturais e minimizando os impactos ambientais negativos associados à indústria da construção.

3.13. ODS 13: Ação contra a mudança global do clima

A produção do cimento Portland é responsável por cerca de 8% das emissões antropogênicas globais de gases do efeito estufa, tornando-se imperativo implementar mudanças significativas na química dos materiais de construção e na sua síntese, a fim de reduzir tais emissões. Os MAAs, especialmente quando derivados de resíduos industriais, podem reduzir as emissões de CO₂ em cerca de 80%, proporcionando, ainda, a valorização desses resíduos (VAN DEVENTER *et al.*, 2010). Dessa forma, o uso de MAAs na construção civil pode contribuir significativamente para o combater a mudança global do clima.

Uma das medidas adotadas para combater as alterações climáticas e seus impactos é aumentar a conscientização sobre a mitigação e redução do impacto da construção civil no meio ambiente. Um indicador disso é o crescente número de publicações científicas que abordam o uso de MAAs como alternativa sustentável na construção civil, como evidenciado na figura 1. Esse aumento na produção científica é uma indicação da relevância dos MAAs para o desenvolvimento sustentável.

Figura 1 – Número de publicações científicas da base de dados *Web of Science* dos últimos dez anos que relacionam os materiais álcali-ativados com o desenvolvimento sustentável.



A publicação científica é uma poderosa ferramenta de conscientização, uma vez que fornece informações atualizadas e relevantes à sociedade sobre diversos temas, incluindo as contribuições dos MAAs para o desenvolvimento sustentável. Isso ajuda a aumentar a conscientização sobre o assunto, o que, por sua vez, pode influenciar a tomada de decisões informadas e o desenvolvimento de políticas públicas baseadas em evidências científicas.

3.14. ODS 14: Vida na água

Uma forma de enfrentar os impactos da acidificação dos oceanos e garantir a conservação e uso sustentável dos oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável é através do uso de MAAs na construção civil. A acidificação dos oceanos é causada pelo aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, que é absorvido pela água do mar. Quando o CO₂ reage com a água, forma-se ácido carbônico, aumentando a acidez da água do mar. Como a produção de MAAs emite muito menos CO₂ do que a produção de cimento Portland, a adoção desses materiais na construção civil pode contribuir para a redução da acidificação dos oceanos e mares (PACHECO-TORGAL, 2015; PORANEK *et al.*, 2022).

Os MAAs podem ser produzidos a partir de resíduos industriais, como cinzas volantes, lama vermelha e escórias metalúrgicas, que são geralmente dispostos em aterros ou lixões, podendo causar contaminação do solo e dos recursos hídricos (VAN DEVENTER, 2010; ZHANG *et al.*, 2022). Ao utilizar esses resíduos como matéria-prima para produção de materiais de construção, reduz-se a necessidade de extração de recursos naturais, como areia e pedra, bem como evita que substâncias tóxicas dos resíduos sejam lixiviadas, o que podem afetar os ecossistemas costeiros.

3.15. ODS 15: Vida na terra

A produção de MAAs a partir de resíduos industriais é uma abordagem que contribui para a redução do desperdício e da poluição ambiental. Além disso, esses materiais apresentam propriedades que permitem reduzir o consumo de recursos naturais, como a água, e minimizar as emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem pode promover melhorias na biodiversidade, na economia de água e recursos naturais, e contribuir para a proteção das florestas, entre outros benefícios ambientais (OMER; NOGUCHI, 2020; PROVIS, 2018). A produção de MAAs pode ser usada com uma forma eficiente de gestão de resíduos, auxiliando no cumprimento do princípio de “cidade de resíduo zero”. Como sua produção tem a capacidade de imobilizar grandes quantidades de resíduos nocivos e tóxicos, isso evita que contaminação e desertificação do solo, bem como a perda de biodiversidade terrestre (DAVIDOVITS, 2002; SHI; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2006; ROBAYO-SALAZAR; VALENCIA-SAAVEDRA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2020).

Complementarmente, a produção e utilização de MAAs pode contribuir para combater a desertificação e reverter a degradação dos solos, pois a produção desses materiais não requer a extração de recursos naturais do solo e, portanto, não causa a degradação do solo (VAN DEVENTER, 2010; ZHANG *et al.*, 2022). Por fim, a utilização desses materiais na construção

civil pode ajudar a travar a perda da biodiversidade, pois reduz o impacto ambiental da construção e contribui para a preservação dos ecossistemas terrestres.

3.16. ODS 17: Parcerias e meios de implementação

Os MAAs podem contribuir para fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável, uma vez que sua produção e uso envolvem a colaboração entre vários setores, como a indústria, a academia e o governo. Uma forma de fazer isso é por meio de parcerias fortes podem ser desenvolvidas por meio de construções verdes, seguras e saudáveis utilizando MAAs (SHEHATA *et al.*, 2022). Além disso, a adoção de MAAs pode requerer a implementação de políticas públicas que incentivem sua produção e uso em larga escala, bem como a colaboração entre países para a troca de informações e tecnologias relacionadas a esses materiais (WU *et al.*, 2019; NODEHI; TAGHVAEE, 2022).

Alguns países possuem normas e diretrizes que regulam o uso de materiais de construção, incluindo os MAAs, baseando-se em critérios de desempenho e segurança. Na União Europeia, por exemplo, os geopolímeros são classificados como "substâncias mistas" e estão sujeitos à legislação REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) e CLP (*Classification, Labelling and Packaging*) (PROVIS; BERNAL, 2014). Na Austrália, há regulamentações governamentais específicas em nível local para o uso de MAAs em pavimentação de rodovias e na produção de painéis pré-fabricados (VAN DEVENTER; PROVIS; DUXSON, 2012). Essas experiências comprovam a viabilidade desses materiais em larga escala e podem estimular a criação de políticas públicas voltadas ao seu uso na engenharia civil, fortalecendo a parceria global para o desenvolvimento sustentável. Portanto, o uso de MAAs pode contribuir para a promoção da colaboração mais ampla e efetiva entre setores e países em direção a um futuro mais sustentável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de revisão bibliográfica sistemática, este estudo discutiu o potencial de contribuição dos MAAs na indústria da construção civil para alcançar os ODS, tal que relacionou aplicabilidade prática desses materiais na mitigação dos impactos ambientais. Foi possível de relacionar direta e indiretamente como os MAAs podem contribuir para atingir 16 metas dos 17 ODS estabelecidas pelas ONU. A seguir, resume e destaca as principais características e propriedades dos MAAs que foram discutidos e relacionados às metas do desenvolvimento sustentável nesta revisão:

- A produção de MAAs requer uma menor quantidade de energia e gera uma quantidade reduzida de gases do efeito estufa, quando comparado com o cimento Portland. Isso contribui com as ações para combater as alterações climáticas e os seus impactos;
- A utilização dos MAAs como aglomerantes na construção civil se apresenta como uma alternativa relativamente econômica, capaz de fomentar a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis e de fácil acesso para a população. Dessa forma, os MAAs podem contribuir para a erradicação da pobreza e para a promoção de cidades sustentáveis, alinhando-se com os objetivos do desenvolvimento sustentável;
- Os MAAs têm a capacidade de serem produzidos a partir de resíduos industriais e agroindustriais, oferecendo assim novas oportunidades de emprego e renda para as comunidades, através da economia circular e fortalecimento da economia. Essa abordagem também contribui para o gerenciamento adequado dos resíduos, evitando a exploração desnecessária de recursos naturais, promovendo assim uma economia mais sustentável e voltada para o consumo e produção conscientes;
- Os MAAs possuem propriedades de elevada resistência e durabilidade que se assemelham ou até mesmo excedem as propriedades do cimento Portland convencional. Como resultado, é possível construir estruturas com maior longevidade e com menor geração de resíduos, contribuindo para o desenvolvimento da indústria, inovação e infraestrutura;
- As propriedades de isolamento acústico e térmico dos MAAs permitem a construção de edifícios com elevado desempenho térmico e acústico, proporcionando ambientes internos confortáveis e saudáveis. Essa característica contribui para a promoção da saúde e do bem-estar dos usuários desses espaços, e pode ser considerada uma vantagem sustentável e inovadora na indústria da construção;
- Os MAAs apresentam propriedades de filtração e desinfecção, o que possibilita a sua utilização no tratamento de águas e efluentes. Essa aplicação contribui para a promoção da água potável e saneamento de forma sustentável, atendendo às necessidades de saúde pública e de proteção ao meio ambiente;
- Devido à sua capacidade de imobilizar uma grande variedade de substâncias nocivas e tóxicas em sua matriz, os MAAs apresentam potencial para prevenir a contaminação do solo e dos recursos hídricos, contribuindo para o gerenciamento adequado dos resíduos e a conservação da biodiversidade. Assim, esses materiais

podem promover a agricultura sustentável e a preservação da vida e dos ecossistemas terrestres e aquáticos.

Entretanto, ainda há desafios a serem enfrentados pelos MAAs, especialmente no que diz respeito à necessidade de políticas públicas que regulamentem seu uso e comercialização na construção.

REFERÊNCIAS

- ABABNEH, Ayman; MATALKAH, Faris; AQEL, Ruba. Synthesis of kaolin-based alkali-activated cement: carbon footprint, cost and energy assessment. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 8367-8378, 2020.
- AMRAN, YH Mugahed et al. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119679, 2020.
- ASSI, Lateef N. *et al.* Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121477, 2020.
- AZEVEDO, Afonso. R. G. et al. Potential use of ceramic waste as precursor in the geopolymerization reaction for the production of ceramic roof tiles. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101156, 2020.
- BADKUL, Aishwarya et al. A comprehensive study on the performance of alkali activated fly ash/GGBFS geopolymer concrete pavement. **Road Materials and Pavement Design**, v. 23, n. 8, p. 1815-1835, 2022.
- BAJPAI, Rishabh et al. Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120147, 2020.
- BERNAL, Susan A.; PROVIS, John L. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 4, p. 997-1008, 2014.
- BOURZIK, Oumaima et al. Study of the effects of drinking water treatment sludge on the properties of Class F fly ash-based geopolymer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 58, p. 87668-87679, 2022.
- COPPOLA, Luigi et al. Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction - Part 1. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, v. 16, n. 3, p. 186-202, 2018.
- DAVIDOVITS, Joseph. Environmentally driven geopolymer cement applications. In: **Proceedings of 2002 Geopolymer Conference**. Melbourne. Australia. 2002.
- DUXSON, Peter et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2917-2933, 2007.
- FAROOQ, Furqan *et al.* Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124762, 2021.
- GLASBY, Tom et al. EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. **Concrete**, v. 2015, p. 1-9, 2015.
- GÖKÇE, H. S.; TUYAN, M.; NEHDI, M. L. Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124483, 2021.

HERTEL, Tobias; PONTIKES, Yiannis. Geopolymers, inorganic polymers, alkali-activated materials and hybrid binders from bauxite residue (red mud) - Putting things in perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120610, 2020.

JAMIESON, Evan et al. Comparison of embodied energies of Ordinary Portland Cement with Bayer-derived geopolymer products. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 112-118, 2015.

KHEIMI, Marwan et al. Waste Material via Geopolymerization for Heavy-Duty Application: A Review. **Materials**, v. 15, n. 9, p. 3205, 2022.

LEKCHIRI, Siham; KAMM, Jesse D. Navigating barriers faced by women in leadership positions in the US construction industry: a retrospective on women's continued struggle in a male-dominated industry. **European Journal of Training and Development**, v. 44, n. 6/7, p. 575-594, 2020.

LUHAR, Ismail et al. A state-of-the-art review on innovative geopolymer composites designed for water and wastewater treatment. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7456, 2021.

LUUKKONEN, Tero et al. One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21-34, 2018.

MCLELLAN, Benjamin C. *et al.* Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9-10, p. 1080-1090, 2011.

MEHTA, Ankur et al. Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119548, 2020.

MISHRA, Umesh Chandra; SARSAIYA, Surendra; GUPTA, Amita. A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 13, p. 18440-18451, 2022.

NASSER, Ibtisam F.; MOHAMMED, Thaeer Jasim; ALI, Manolia Abed AL-Wahab. Production of Lightweight Geopolymer Concrete Roof Flatness Tiles. **Journal of Southwest Jiaotong University**, v. 55, n. 5, 2020.

NODEHI, Mehrab; TAGHVAEE, Vahid Mohamad. Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 165-196, 2022.

NODEHI, Mehrab; TAGHVAEE, Vahid Mohamad. Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 165-196, 2022.

NOVAIS, Rui M. et al. Multifunctional cork–alkali-activated fly ash composites: A sustainable material to enhance buildings' energy and acoustic performance. **Energy and Buildings**, v. 210, p. 109739, 2020.

OMER, Mohamed A. B.; NOGUCHI, Takafumi. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101869, 2020.

PACHECO-TORGAL, Fernando. Introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. In: **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Woodhead Publishing, 2015. p. 1-16.

PORANEK, Nikolina et al. MSWIBA Formation and Geopolymerisation to Meet the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) and Climate Mitigation. **Buildings**, v. 12, n. 8, p. 1083, 2022.

POUDYAL, Lochana; ADHIKARI, Kushal. Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 4, p. 100024, 2021.

PROVIS, John L.; VAN DAVENTER, Jannie S.J. Geopolymers and other alkali-activated materials. In: HEWLETT, Peter; LISKA, Martin (Ed.). **Lea's Chemistry of cement and concrete**. 5. ed. Editora: Elsevier, 2019.

PROVIS, John L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40-48, 2018.

PROVIS, John L.; BERNAL, Susan A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.

QAIDI, Shaker M. A. et al. A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 350, p. 128892, 2022a.

QAIDI, Shaker M. A. et al. Sustainable utilization of red mud waste (bauxite residue) and slag for the production of geopolymer composites: A review. **Case Studies in Construction Materials**, p. e00994, 2022b.

QUE, Ze-Li *et al.* Assessment on emission of volatile organic compounds and formaldehyde from building materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 49, p. 36-42, 2013.

RAZA, Muhammad Huzaifa; ZHONG, Ray Y.; KHAN, Mahram. Recent advances and productivity analysis of 3D printed geopolymers. **Additive Manufacturing**, p. 102685, 2022.

REES, David; MURRAY, Jill. Silica, silicosis and tuberculosis. **Occupational Health Southern Africa**, v. 26, n. 5, p. 266-276, 2020.

REVATHI, Tamasi *et al.* Adoption of alkali-activated cement-based binders (geopolymers) from industrial by-products for sustainable construction of utility buildings-A field demonstration. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104450, 2022.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael A.; VALENCIA-SAAVEDRA, William; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Construction and demolition waste (CDW) recycling—As both binder

and aggregates—In alkali-activated materials: A novel re-use concept. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5775, 2020.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andrés; RIVERA, Jhonathan Fernando; DE GUTIÉRREZ, Ruby Mejía. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 130-138, 2017.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael et al. Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 103-111, 2018.

SGARLATA, Caterina et al. Antibacterial properties and cytotoxicity of 100% waste derived alkali activated materials: slags and stone wool-based binders. **Frontiers in Materials**, v. 8, p. 689290, 2021.

SHAMSAEI, Ezzatollah et al. Pathways to commercialisation for brown coal fly ash-based geopolymer concrete in Australia. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4350, 2021.

SHEHATA, Nabila *et al.* Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. **Science of the Total Environment**, v. 836, p. 155577, 2022.

SHI, Caijun; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. **Journal of hazardous materials**, v. 137, n. 3, p. 1656-1663, 2006.

SILVA FILHO, Luís Abel. Labour market and turnover in the industrial employment in the Brazilian Northeast region. **Investigación Económica**, v. 75, n. 295, p. 203-230, 2016.

SOOMRO, Mahfooz; TAM, Vivian WY; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. Production of cement and its environmental impact. In: **Recycled Concrete**. Woodhead Publishing, 2023. p. 11-46.

SOUSA, Leila Nóbrega et al. Effect of non-calcined sugarcane bagasse ash as an alternative precursor on the properties of alkali-activated pastes. **Molecules**, v. 27, n. 4, p. 1185, 2022.

STOLZ, Jonathan; BOLUK, Yaman; BINDIGANAVILE, Vivek. Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 24-32, 2018.

TSALIS, Thomas A. et al. New challenges for corporate sustainability reporting: United Nations' 2030 Agenda for sustainable development and the sustainable development goals. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 27, n. 4, p. 1617-1629, 2020.

VAN DEVENTER, Jannie S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, p. 145-155, 2010.

VAN DEVENTER, Jannie S. J.; PROVIS, John L.; DUXSON, Peter. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymers. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 89-104, 2012.

VAN DEVENTER, Jannie Stephanus Jakob et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, p. 145-155, 2010.

WU, Yanguang et al. Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 930-949, 2019.

ZHANG, Nan et al. Experimental studies on the durability and leaching properties of alkali-activated tailings subjected to different environmental conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 130, p. 104531, 2022.

ZHANG, Yan et al. China's energy consumption in the building sector: A life cycle approach. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 240-251, 2015.