

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS: UM PANORAMA ATUAL

ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF ALKALI-ACTIVATED CEMENTS: A CURRENT OVERVIEW

Gabriele Gomes Silva ¹
Kalebe Kelvy Freire Ferreira²
Luis Felipe Alencar Brandão ³
Sabino Alves de Aguiar Neto⁴
Marcelo de Souza Picanço ⁵
Aedjota Matos Jesus⁶

1. Discente do curso Técnico em Química no Instituto Federal de Rondônia
E-mail: gabrielegomesfreire52@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1209322887281928>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8080-4269>

2. Graduando de Engenharia Civil da Universidade Federal de Rondônia
E-mail: kalebekelvyfreire@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8669952486049925>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5345-510X>

3. Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará
E-mail: luisfelipe2357@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1087177611634286>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5421-5256>

4. Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará
E-mail: sabino.neto@itec.ufpa.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7079838279336495>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-2425>

5. Doutor em Geologia e Geoquímica pela Universidade Federal do Pará
E-mail: marcelosp@ufpa.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4535052395600357>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7313-1229>

6. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará
Universidade Federal de Rondônia
E-mail: aedjota.jesus@unir.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4491352727871170>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0670-6966>

RESUMO: A crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis na construção civil, setor responsável por uma parcela dessas emissões. O cimento Portland, amplamente utilizado, contribui com 5% a 8% das emissões globais de CO₂ devido ao seu processo produtivo. Diante desse cenário, os cimentos álcali-ativados emergem como solução viável, pois reduzem as emissões de CO₂ e permitem a incorporação de resíduos industriais como precursores. Este estudo revisa a Avaliação do Ciclo de Vida dos cimentos álcali-ativados, analisando suas categorias de impacto ambiental, os diferentes tipos de materiais álcali-ativados e o papel dos ativadores alcalinos na sustentabilidade do processo. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica qualitativa e descritiva, abrangendo artigos publicados entre 2020 e 2025. Os resultados apontam que os cimentos álcali-ativados podem reduzir o potencial de aquecimento global em até 40%, além de mitigar impactos como acidificação terrestre (35%), eutrofização (30%) e toxicidade humana (26%). No entanto, os ativadores alcalinos convencionais, como silicato de sódio e hidróxido de sódio, ainda apresentam impactos ambientais, sendo responsáveis por até 85% das emissões associadas. A substituição desses ativadores por resíduos ricos em sílica e álcalis, como lama vermelha e cinzas agroindustriais, demonstra potencial para reduzir impactos e custos de produção. Conclui-se que a otimização dos processos produtivos e a adoção de ativadores alcalinos alternativos são estratégias necessárias para viabilizar a aplicação dos cimentos álcali-ativados em larga escala, consolidando-os como alternativa sustentável ao cimento Portland.

Palavras-chave: cimentos álcali-ativados; avaliação do ciclo de vida; sustentabilidade; impacto ambiental; geopolímeros.

ABSTRACT: Growing concerns about greenhouse gas emissions have driven the search for sustainable alternatives in the construction industry, which is responsible for a portion of these emissions. Portland cement, which is widely used, contributes 5% to 8% of global CO₂ emissions due to its production process. In this scenario, alkali-activated cements emerge as a viable solution, as they reduce CO₂ emissions and allow the incorporation of industrial waste as precursors. This study reviews the Life Cycle Assessment of alkali-activated cements, analyzing their environmental impact categories, the different types of alkali-activated materials, and the role of alkaline activators in the sustainability of the process. The research was conducted through a qualitative and descriptive literature review, covering articles published between 2020 and 2025. The results indicate that alkali-activated cements can reduce global warming potential by up to 40%, in addition to mitigating impacts such as terrestrial acidification (35%), eutrophication (30%) and human toxicity (26%). However,

conventional alkaline activators, such as sodium silicate and sodium hydroxide, still have environmental impacts, being responsible for up to 85% of associated emissions. Replacing these activators with waste rich in silica and alkalis, such as red mud and agro-industrial ash, demonstrates the potential to reduce impacts and production costs. It is concluded that the optimization of production processes and the adoption of alternative alkaline activators are necessary strategies to enable the application of alkali-activated cements on a large scale, consolidating them as a sustainable alternative to Portland cement.

Keywords: alkali-activated cements; life cycle assessment; sustainability; environmental impact; geopolymers.

INTRODUÇÃO

A conscientização acerca do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), principais catalisadores das mudanças climáticas, promoveu a necessidade de implementar práticas sustentáveis em diferentes setores socioeconômicos. Dentre esses setores, destaca-se a construção civil, na qual o cimento Portland é o principal agente das emissões globais de GEE (Zhao *et al.*, 2013). Estima-se que, para produzir uma tonelada de cimento, se produza, em média, 0,87 toneladas de GEE (Penadés-Plà *et al.*, 2017).

A produção desse cimento é responsável por 5% a 8% das emissões globais de CO₂ (Munir *et al.*, 2023), o que impacta a concentração de GEE na atmosfera e contribui para o aquecimento global. Diante desse cenário, têm-se buscado medidas para reduzir os impactos ambientais causados pela indústria cimenteira (Scrivener; John; Gartner, 2018). Uma alternativa promissora são os cimentos álcali-ativados, cuja produção gera uma menor emissão de CO₂ e possibilita a utilização de diversos resíduos industriais como precursores (Ghadir *et al.*, 2021).

Os cimentos álcali-ativados, como os geopolímeros, são produzidos por meio da ativação alcalina de precursores ricos em aluminossilicatos, como metacaulim, cinzas volantes, escória granulada de alto forno e lama vermelha (Munir *et al.*, 2023). Esses ligantes apresentam propriedades mecânicas e durabilidade comparáveis ao cimento Portland (Amari *et al.*, 2024).

A eficiência mecânica dos materiais produzidos com cimento álcali-ativado tem se mostrado competitiva em relação ao cimento Portland, de modo que os concretos álcali-ativados atingem resistências superiores a 60 MPa (Tripathy; Acharya, 2024; Patrisia *et al.*, 2022). Além disso, os cimentos álcali-ativados têm apresentado menor permeabilidade a agentes agressivos, uma vez que melhoram a proteção contra cloretos e sulfatos, o que reduz custos de manutenção e prolonga a vida útil das estruturas (Wang *et al.*, 2022; Munir *et al.*, 2023).

Devido à compatibilidade técnica e menores emissões de CO₂, os cimentos álcali-ativados tornam-se uma alternativa sustentável comparados ao cimento Portland. Porém, apesar de possuírem perspectivas promissoras de redução de impactos ambientais, esses materiais ainda podem gerar impactos ao longo de seu ciclo de vida. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método utilizado para analisar os impactos ambientais associados à produção desses ligantes. Por meio da ACV, é possível mensurar os efeitos ao longo do ciclo de vida dos materiais (Zhang *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, este artigo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a ACV aplicada aos cimentos álcali-ativados, tendo como base a literatura disponível. Para isso, buscou-se enfatizar suas categorias de impacto ambiental, os diferentes tipos de materiais álcali-ativados obtidos e os impactos ambientais referentes aos ativadores alcalinos utilizados na produção dos cimentos álcali-ativados.

METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, centrada na análise de artigos coletados, e possui um caráter descritivo. A escolha dessa abordagem justifica-se pela natureza do estudo, que busca analisar o ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados. Nesse sentido, a estratégia de pesquisa empregada é a revisão bibliográfica, uma vez que se concentra na investigação de um tema específico, o que permite a análise crítica e a síntese de conhecimentos previamente publicados (Günther, 2006).

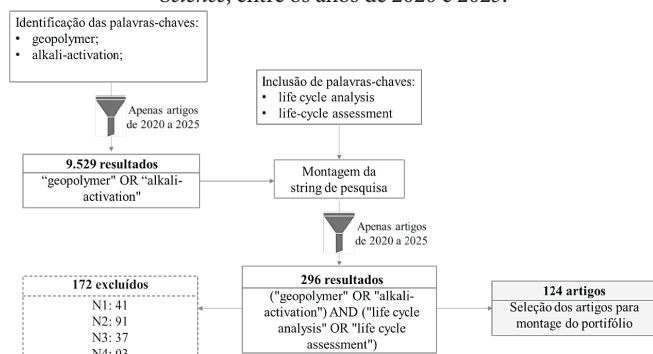
Para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica, foram selecionados artigos indexados na *Web of Science*, com foco nas publicações disponíveis no período compreendido nos últimos cinco anos (entre 01/01/2020 e 01/01/2025). A definição desse intervalo temporal visa abranger estudos atualizados e, conseqüentemente, a produção científica mais recente sobre o tema.

A busca foi realizada com os termos indexados na língua inglesa, uma vez que possui maior abrangência e alcance, no qual foram utilizados dois grupos: o primeiro associado aos geopolímeros (*geopolymer e alkali-activation*), enquanto o segundo, relacionado ao ciclo de vida (*life cycle analysis e life-cycle assessment*). Para realizar a busca, foram utilizados operadores booleanos AND (e) e OR (ou). O operador AND foi empregado entre os grupos, enquanto o operador OR foi utilizado entre os sinônimos de cada grupo, o que resultou em quatro termos de busca (*strings* de pesquisa). Neste contexto, a linguagem de busca utilizada foi definida pela seguinte expressão: ("*geopolymer*" OR "*alkali-activation*") AND ("*life cycle analysis*" OR "*life cycle assessment*").

Adotaram-se como critérios de inclusão artigos originais que abordassem a temática específica e tivessem sido publicados em inglês ou português entre 2020 e 2025. Como critério de exclusão, foram considerados: (N1) artigos não alinhados com o objeto de estudo, (N2) artigos de revisão, (N3) artigos que não tratavam sobre cimentos álcali-ativados e (N4) artigos indisponíveis. A seleção dos artigos foi realizada a partir da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, excluindo-se os artigos que não atenderam aos critérios estabelecidos, inclusive aqueles duplicados.

A Figura 1 apresenta a estrutura das etapas de busca e filtragem dos artigos encontrados na *Web of Science*, bem como a obtenção de respostas das buscas realizadas. Observa-se que, a partir das strings de busca, foram encontrados 296 artigos, dos quais 124 foram selecionados e 172 foram excluídos após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

Figura 1 - Esquemática do processo de busca por artigos referentes à avaliação do ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados na *Web of Science*, entre os anos de 2020 e 2025.



Fonte: autores, 2025.

Os artigos selecionados para composição do portfólio foram exportados para uma Planilha Google para triagem e, posteriormente, os dados foram tratados e compilados.

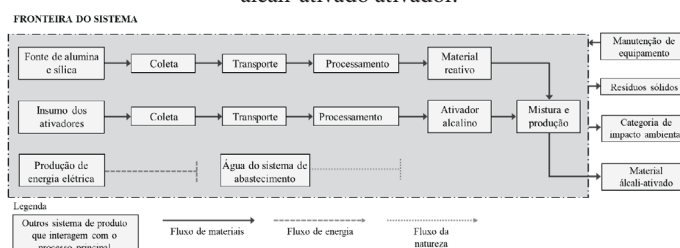
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visão geral da ACV dos cimentos álcali-ativados

A ACV é um método utilizado para analisar os impactos ambientais ao longo das etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até sua disposição final (Alvarado *et al.*, 2024). Essa metodologia permite quantificar os impactos ambientais associados à produção de materiais específicos. Estudos de Garces *et al.* (2021) sobre a ACV de cimentos álcali-ativados evidenciaram suas vantagens ambientais em relação ao cimento Portland.

A Figura 2 apresenta a fronteira do sistema com os principais processos considerados na ACV dos cimentos álcali-ativados, que abrange desde a coleta, transporte e processamento dos insumos até as etapas envolvidas na transformação química e energética para obtenção do produto final. O insumo básico deve ser uma fonte de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), também denominado de aluminossilicato, que se torna reativa após o processamento térmico por meio da calcinação para, então, reagir com os ativadores alcalinos (Esparham *et al.*, 2023).

Figura 2 - Definição da fronteira do sistema de ACV de produto para produção de matérias álcali-ativados a partir de cimento álcali-ativado ativador.



Fonte: autores, 2025.

Na ACV dos cimentos álcali-ativados, os sistemas de produto que interagem com o processo principal possuem fluxos específicos, os quais são dependentes das condições de produção do produto final. A produção de energia e abastecimento de água são exemplos de sistemas de produto que possuem os impactos ambientais e recursos necessários para a produção dos materiais auxiliares, como o ativador e as matérias-primas, que variam conforme os parâmetros de fabricação do cimento álcali-ativado (Amari *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023).

Na produção de cimentos álcali-ativados, as fontes de SiO_2 e Al_2O_3 são denominadas precursores, que podem ser derivadas de resíduos industriais, como escórias de alto-forno, um subproduto da fabricação do ferro (Colangelo *et al.*, 2021), cinzas de mineração e resíduos de pedreiras (Alhassan *et al.*, 2023). Além disso, fontes naturais, como zeólitas e argilas calcinadas, também podem ser utilizadas na produção desses cimentos (Alghamdi *et al.*, 2024).

Os estudos sobre a ACV dos cimentos álcali-ativados permitem identificar as principais categorias de impacto ambiental associadas ao seu processo produtivo, o que viabiliza a análise dos efeitos ambientais resultantes. Com base na revisão bibliográfica, foram identificadas dez categorias de impacto ambiental na ACV desses cimentos, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Apresentação das 10 categorias de impactos ambientais relacionados à produção dos cimentos álcali-ativados.

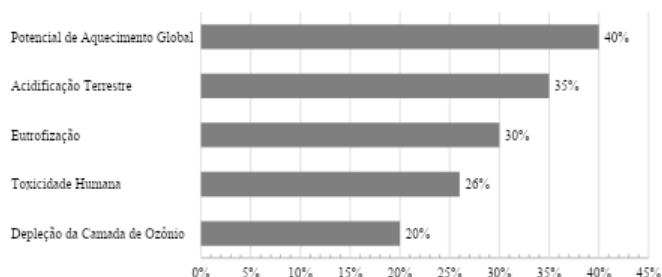
Categorias de impactos ambientais	Características
Potencial de aquecimento global	Relacionado às emissões de CO_2 e outros gases de efeito estufa na produção e uso de materiais álcali-ativados. Consta-se que à temperatura de calcinação dos cimentos álcali-ativados é inferior que a utilizada na produção do cimento Portland (Esparham <i>et al.</i> , 2023).
Esgotamento de recursos fósseis	Impacto associado ao uso de insumos como ativadores alcalinos (ex.: hidróxido de sódio e silicato de sódio), utilizados na ativação alcalina dos cimentos álcali-ativados, que demandam alto consumo de energia durante o seu preparo (Shi <i>et al.</i> , 2021).

Categorias de impactos ambientais	Características
Formação de ozônio fotoquímico	Refere-se ao impacto ambiental causado por emissões que contribuem para a formação de ozônio troposférico, prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. Na produção de cimentos álcali-ativados, o uso de ativadores alcalinos está associado à formação de ozônio fotoquímico (Abdulkareem <i>et al.</i> , 2021).
Esgotamento da camada de ozônio	Refere-se ao impacto ambiental decorrente do uso de substâncias químicas com potencial de degradação da camada de ozônio. As soluções alcalinas empregadas na produção de cimentos álcali-ativados apresentam um impacto 159% superior nessa categoria em comparação ao cimento Portland (Meshram; Kumar, 2022).
Acidificação terrestre e aquática	Impacto causado pela liberação de compostos como óxidos de enxofre e nitrogênio, que são hidratantes para chuvas ácidas. A principal vantagem dos geopolímeros é a ausência de emissão direta desses óxidos, que são gerados pela calcinação do clínquer no cimento Portland e contribuem para a formação de chuva ácida (Patrisia <i>et al.</i> , 2022).
Eutrofização de ecossistemas aquáticos	Resultado do excesso de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, liberados no ambiente, causando excesso de algas e afetando a qualidade da água. A vantagem dos cimentos álcali-ativados sobre o cimento Portland está na redução da liberação de nutrientes que podem contribuir para o crescimento de algas nos ecossistemas aquáticos (Mir <i>et al.</i> , 2022).
Toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre e marinha	Refere-se aos impactos decorrentes da liberação de substâncias químicas prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Os ativadores alcalinos contribuem para essa categoria devido ao elevado consumo de energia em sua produção e às emissões associadas (Shi <i>et al.</i> , 2021).
Consumo de energia e recursos não renováveis	A análise do consumo energético na produção de geopolímeros evidencia seu impacto na disponibilidade de recursos naturais. Um dos principais benefícios dos cimentos álcali-ativados é a eliminação da calcinação do clínquer, etapa de alto consumo de combustíveis fósseis na produção do cimento Portland (Danish <i>et al.</i> , 2024).
Pegada de carbono	Medição das emissões totais de carbono ao longo da produção e do ciclo de vida dos materiais. A produção dos cimentos álcali-ativados reduz a pegada de carbono, uma vez que elimina a necessidade de calcinação do calcário, principal fonte de emissão de CO ₂ no processo convencional (Alvarado <i>et al.</i> , 2024).
Destruição de recursos naturais e uso de matérias-primas virgens	Relacionada à remoção de novos insumos em vez do uso de materiais reciclados ou resíduos industriais. Os cimentos álcali-ativados apresentam vantagem em relação ao cimento Portland nessa categoria, pois possibilitam o uso de resíduos industriais como matéria-prima (Wang <i>et al.</i> , 2022).

Fonte: autores, 2025.

A Figura 3 apresenta a redução dos impactos ambientais em cinco categorias associadas à produção de cimentos álcali-ativados, em comparação ao cimento Portland. Entre elas, destacam-se a diminuição do potencial de aquecimento global (40%) e da acidificação terrestre (35%). Além disso, observam-se reduções nos impactos relacionados à eutrofização (30%), à toxicidade humana (26%) e ao esgotamento da camada de ozônio (20%).

Figura 3 - Reduções médias em diferentes categorias de impacto ambiental avaliadas neste estudo.



Fonte: autores, 2025.

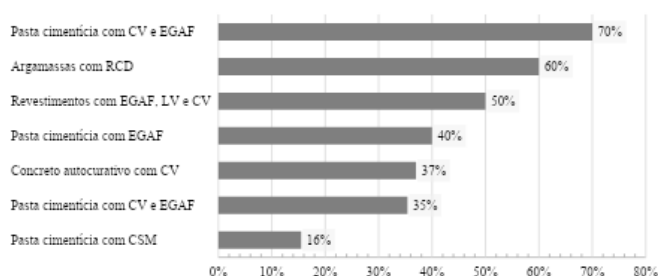
Os cimentos álcali-ativados emitem menos GEE durante sua produção, o que resulta em uma redução de 40% no potencial de aquecimento global (Amari *et al.*, 2024). No que se refere à acidificação terrestre, o uso de vidro residual como ativador alcalino permitiu uma redução de 35% nessa categoria de impacto ambiental (Bianco, Tomos; Vinai, 2021). Além disso, a incorporação de cinza volante (CV) na produção dos cimentos álcali-ativados reduziu a eutrofização em 30% (Tripathy; Acharya, 2024).

A toxicidade humana associada à produção do cimento Portland pode ser reduzida em 26% com o uso de CVs e escória granulada de alto-forno (EGAF) para a produção dos cimentos álcali-ativados (Meshram; Kumar, 2022). Já a depleção da camada de ozônio apresenta uma redução média de apenas 20% nos impactos associados à produção desses cimentos (Zhang *et al.*, 2023).

Embora os cimentos álcali-ativados apresentem vantagens ambientais, sua produção ainda gera impactos em outras categorias, como o consumo de recursos fósseis, devido à necessidade de insumos alcalinos, como o hidróxido de sódio (NaOH), cuja fabricação demanda elevada quantidade de energia (Raza; Khan; Zhong, 2024). Além disso, o processamento e o transporte das matérias-primas podem contribuir para emissões adicionais de GEE (Patrisia *et al.*, 2022).

Diante disso, considerando que o potencial de aquecimento global associado às emissões de GEE é uma das principais categorias de impacto ambiental identificadas nessa revisão, este estudo buscou avaliar a redução das emissões de CO₂ na produção de cimentos álcali-ativados formulados com diferentes resíduos, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Reduções médias das emissões de CO₂ promovidas devido ao uso de resíduos na produção de matérias álcali-ativados.



Fonte: autores, 2025.

Garces *et al.* (2021) reportaram uma redução de 37% nas emissões de CO₂ na produção de concreto autocurativo com CV, atribuída à adição de microcápsulas contendo ativadores alcalinos. Amari *et al.* (2024) identificaram uma redução de 40% nas emissões durante a produção de cimentos álcali-ativados à base de EGAF, uma vez que o uso desse subproduto minimiza a demanda por recursos naturais brutos. Além disso, a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de argamassas reduziu as emissões de GEE em 60%, devido ao menor consumo energético no processo produtivo (Kul *et al.*, 2023).

A produção de cimentos álcali-ativados à base de CV e EGAF pode reduzir as emissões de CO₂ entre 35% (Danish *et al.*, 2024) e 70% (Meshram; Kumar, 2022). O uso de EGAF, lama vermelha (LV), metacaulim e CV na produção de revestimentos de cimentos álcali-ativados reduziu as emissões em 50% (Wang *et al.*, 2022). Além disso, a incorporação de cinzas de sabugo de milho (CSM) em cimentos álcali-ativados para reparo de fissuras resultou em uma redução de 16% nas emissões (Xiong, Cundy; Guo, 2024).

Papel dos ativadores alcalinos no impacto ambiental

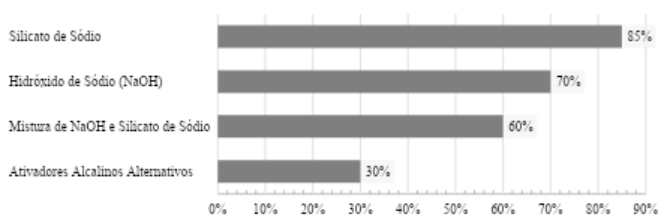
Os ativadores alcalinos são empregados na conversão de precursores de aluminossilicatos em um ligante endurecido. Dentre eles, os mais utilizados são o NaOH, o hidróxido de potássio (KOH), o silicato de sódio (Na₂SiO₃) e o silicato de potássio (K₂SiO₃), obtidos por meio de processos químicos industriais (Bourzik *et al.*, 2023). Entretanto, o uso desses compostos, como o Na₂SiO₃ e o NaOH, contribui majoritariamente para as categorias de impactos ambientais (Baykara; Riofrio; Cornejo; 2024).

Estudos de Ghadir *et al.* (2021) e Esparham *et al.* (2023) indicam que esses componentes impactam categorias como esgotamento da camada de ozônio e acidificação terrestre. Mir *et al.* (2023) relataram que os ativadores representam até 45% do GEE total dos cimentos álcali-ativados, o que torna necessário a busca por alternativas mais sustentáveis, como o uso de resíduos alcalinos ou ativadores com menor impacto ambiental.

Portanto, uma solução de menor impacto ambiental é o uso de ativadores alcalinos alternativos, visto que possuem menor contribuição para o ciclo de vida da produção dos cimentos álcali-

ativados, conforme mostra a Figura 5. Enquanto os ativadores alcalinos à base de Na₂SiO₃ contribuem com 85% do impacto no ciclo de vida (Tripathy; Acharya, 2024), os ativadores alcalinos alternativos representam apenas 30% (Fernando *et al.*, 2022).

Figura 5 - Contribuições média dos ativadores alcalinos no ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados.



Fonte: autores, 2025.

Os ativadores alcalinos alternativos possuem a vantagem de serem obtidos a partir de resíduos gerados de diferentes processos industriais. Estudos conduzidos por Choo *et al.* (2016) demonstraram que a lama vermelha, resíduo gerado da extração do alumínio bauxita, é rica em sílica e apresenta um pH entre 9,7 e 12,8, condições adequadas para a ativação alcalina dos cimentos álcali-ativados.

Os resíduos também podem ser provenientes das agroindústrias, como a palha da cana-de-açúcar, a qual também apresenta um elevado teor de sílica (Moraes *et al.*, 2018). Outro resíduo agroindustrial utilizado para a produção de ativador alcalino alternativo é a cinza de sabugo de milho, que reduziu as emissões de GEE em 16% e minimizou a dependência de ativadores alcalinos (Xiong, Cundy; Guo, 2024).

A incorporação de resíduos de origem natural ou industrial na formulação de ativadores alcalinos auxilia na redução de impactos ambientais associados aos ativadores alcalinos convencionais (Luca *et al.*, 2023). Além disso, a destinação adequada desses resíduos viabiliza a implementação da economia circular, cuja abordagem tem como objetivo a redução do desperdício e preservação de recursos (Monteiro *et al.*, 2023).

Além de reduzir as categorias de impacto ambiental, o uso de ativadores alcalinos alternativos se torna uma solução para otimizar os custos de produção dos cimentos álcali-ativados (Mir *et al.*, 2023). A substituição parcial de ativadores alcalinos por subprodutos industriais reduz a necessidade de adquirir ativadores alcalinos produzidos por meio de processos químicos industriais (Tripathy; Acharya, 2024).

Amari *et al.* (2024) indicaram que, devido às despesas associadas aos ativadores alcalinos, os custos de produção dos concretos álcali-ativados variam entre \$430 e \$445/m³, valores mais de 50% superiores aos do concreto convencional (\$283/m³). No entanto, Sandanayake; Law; Sargent, (2022) destacam que a redução das emissões de CO₂ e o reaproveitamento de resíduos podem tornar esses materiais mais viáveis economicamente a longo prazo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se uma análise da ACV dos cimentos álcali-ativados, com ênfase nas categorias de impacto ambiental e nos efeitos do uso de ativadores alcalinos em sua produção. Destaca-se que os resíduos industriais, como CV e EGAF, os resíduos de mineração, como a LV, e os resíduos agroindustriais, como a palha da cana-de-açúcar, têm sido empregados tanto como precursores quanto como insumos para ativadores alcalinos na fabricação de materiais álcali-ativados.

Dessa forma, a incorporação dos resíduos na ACV dos cimentos álcali-ativados representa uma técnica promissora para a redução das categorias de impacto ambiental, como na redução de 40% do potencial de aquecimento global, 35% da acidificação terrestre e 26% da toxicidade humana. Portanto, o uso de resíduos no ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados promove a sustentabilidade ambiental na cadeia produtiva desses materiais.

Na ACV dos cimentos álcali-ativados, a literatura tem apontado que a produção e transporte dos ativadores alcalinos são responsáveis por até 85% das emissões dos GEE. Isso ocorre porque os insumos dos ativadores alcalinos convencionais, como Na_2SiO_3 e NaOH , demandam processos químicos industriais com elevado consumo de energia e emissão de GEE. Todavia, esse impacto pode ser reduzido com o uso de ativadores alcalinos alternativos, como a base de resíduos ricos em álcalis (lama vermelha, por exemplo) ou com elevado teor de SiO_2 (cinzas de resíduos de agroindústrias, por exemplo).

A substituição dos ativadores alcalinos convencionais por ativadores alternativos pode promover redução de 40% das emissões de GEE durante a produção dos cimentos álcali-ativados. Complementarmente, essa técnica pode viabilizar uma nova cadeia da economia circular e reduzir os custos de produção dos cimentos álcali-ativados.

No entanto, apesar dos avanços nas pesquisas sobre cimentos álcali-ativados, ainda há uma lacuna na análise da ACV desses materiais quando aplicados à construção civil. Os estudos ainda se limitam a pastas cimentícias, compósitos, concretos, entre outros, que não foram aplicados de fato como um produto da construção civil. Além disso, se faz necessário investigar o desempenho dos cimentos álcali-ativados produzidos com ativadores alcalinos alternativos a longo prazo, bem como a influência desses ativadores no custo final e nas demais categorias de impacto ambiental. Esses novos estudos podem auxiliar na viabilidade e na promoção sustentável da indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, M.; HAVUKAINEN, J.; NUORTILA-JOKINEN, J.; HORTTANAINEN, M. *Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise*. **Journal of Cleaner Production**, v. 323, p. 129169, 2021.
- ALGHAMDI, H.; SHOUKRY, H.; ABDEL-GAWWAD, H.A.; HOSSAIN, M.U.; ABADEL, A.A.; ELTAWIL, K.A.; YOUSSEF, A.S. *Development of Limestone Calcined Clay Cement-Based Lightweight Bricks Incorporating Waste Rockwool: A Step into Leading the Way in Low-Carbon Bricks*. **Buildings**, v. 14, n. 12, p. 3937, 2024.
- ALHASSAN, M.; ALKHAWALDEH, A.; BETOUSH, N.; ALKHAWALDEH, M.; HUSEIEN, G.F.; AMAIREH, L.; ELREFAE, A. *Life cycle assessment of the sustainability of alkali-activated binders*. **Biomimetics**, v. 8, n. 1, p. 58, 2023.
- ALVARADO, A.; BAYKARA, H.; RIOFRIO, A.; CORNEJO, M.; MERCHAN-MERCHAN, W. *Preparation, characterization, electrical conductivity, and life cycle assessment of carbon nanofibers-reinforced Ecuadorian natural zeolite-based geopolymer composites*. **Heliyon**, v. 10, n. 6, 2024.
- AMARI, S.; DARESTANI, M.; MILLAR, G.J.; SAMALI, B.; STROUNINA, E. *Engineering and life cycle assessment (LCA) of sustainable zeolite-based geopolymer incorporating blast furnace slag*. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 440, 2024.
- BAYKARA, H.; RIOFRIO, A.; CORNEJO, M. *Preparation, characterization, and environmental impact analysis of natural Ecuadorian zeolite tuff-based silicoaluminophosphate geopolymer*. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 137126, 2024.
- BIANCO, I.; TOMOS, B.A.D.; VINAI, R. *Analysis of the environmental impacts of alkali-activated concrete produced with waste glass-derived silicate activator—A LCA study*. **Journal of cleaner production**, v. 316, p. 128383, 2021.
- BOURZIK, O.; BABA, K.; AKKOURI, N.; MESHRAM, R.B.; BOUYAKHSASS, R.; NOUNAH, A. *Life cycle assessment and thermophysical properties of a fly ash-based geopolymer containing drinking water treatment sludge*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 56, p. 118989-119000, 2023.
- CHOO, H.; LIM, S.; LEE, W.; LEE, C. *Compressive strength of one-part alkali activated fly ash using red mud as alkali supplier*. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 21-28, 2016.

- COLANGELO, F.; FARINA, I.; TRAVAGLIONI, M.; SALZANO, C.; CIOFFI, R.; PETRILLO, A. *Eco-efficient industrial waste recycling for the manufacturing of fibre reinforced innovative geopolymer mortars: Integrated waste management and green product development through LCA*. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127777, 2021.
- DANISH, A.; TORRES, A.S.; MORO, C.; SALIM, M.U. *Hope or hype? Evaluating the environmental footprint of reclaimed fly ash in geopolymer production*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 205, p. 107564, 2024.
- ESPARHAM, A.; VATIN, N.I.; KHARUN, M.; HEMATIBAHAR, M. *A study of modern eco-friendly composite (geopolymer) based on blast furnace slag compared to conventional concrete using the life cycle assessment approach*. **Infrastructures**, v. 8, n. 3, p. 58, 2023.
- FERNANDO, S.; GUNASEKARA, C.; LAW, D.W., NASVI, M.C.M.; SETUNGE, S.; DISSANAYAKE, R.; ROBERT, D. *Environmental evaluation and economic analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated bricks*. **Environmental impact assessment review**, v. 95, p. 106784, 2022.
- GARCES, J.I.T.; DOLLENTE, I.J.; BELTRAN, A.B.; TAN, R.R.; PROMENTILLA, M.A.B. *Life cycle assessment of self-healing geopolymer concrete*. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100147, 2021.
- GHADIR, P.; ZAMANIAN, M.; MAHBUBI-MOTLAGH., SABERIAN, M., LI, J.; RANJBAR, N. *Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: a comparative study*. **Transp Geotech 31: 100639** [em linha]. 2021.
- GÜNTHER, H. *Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão?*. **Psicologia: teoria e pesquisa**, v. 22, p. 201, 2006.
- KUL, A.; OZEL, B.F.; OZCELIKCI, E.; GUNAL, M.F.; ULUGOL, H.; YILDIRIM, G.; SAHMARAN, M. *Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste*. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107546, 2023.
- LUCA, A.; ANTONIO, G.; GIADA, L.S.; MANUELA, L.F.C.; ROSA, M. *Life cycle assessment of a new industrial process for sustainable construction materials*. **Ecological Indicators**, v. 148, p. 110042, 2023.
- MESHARAM, R.B.; KUMAR, S. *Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymer cement manufacturing with Portland cement in Indian context*. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 6, p. 4791-4802, 2022.
- MIR, N.; KHAN, S.A.; KUL, A.; SAHIN, O.; OZCELIKCI, E.; SAHMARAN, M.; KOC, M. *Construction and demolition waste-based self-healing geopolymer composites for the built environment: An environmental profile assessment and optimization*. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130520, 2023.
- MONTEIRO, L.; FERAILLE, A.; SALIBA, J.; YANEZ-GODOY, H.; SAIYOURI, N. *Life cycle analysis of sediment valorization by means of geopolymerization from laboratory to industrial scale*. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134598, 2024.
- MORAES, J.C.B.; FONT, A.; SORIANO, L.; AKASAKI, J.L.; TASHIMA, M.M.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. *New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator*. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 611-621, 2018.
- MUNIR, Q.; ABDULKAREEM, M.; HORTTANAINEN, M.; KÄRKI, T. *A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete*. **Science of The Total Environment**, v. 865, p. 161230, 2023.
- PATRISIA, Y.; LAW, D.W.; GUNASEKARA, C.; WARDHONO, A. *Life cycle assessment of alkali-activated concretes under marine exposure in an Australian context*. **Environmental impact assessment review**, v. 96, p. 106813, 2022.
- PENADÉS-PLÀ, V.; MARTÍ, J.V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. *Life-cycle assessment: A comparison between two optimal post-tensioned concrete box-girder road bridges*. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1864, 2017.
- RAZA, M.H.; KHAN, M.; ZHONG, RY. *Strength, porosity and life cycle analysis of geopolymer and hybrid cement mortars for sustainable construction*. **Science of The Total Environment**, v. 907, p. 167839, 2024.
- SANDANAYAKE, M.; LAW, D.; SARGENT, P. *A new framework for assessing the environmental impacts of circular economy friendly soil waste-based geopolymer cements*. **Building and environment**, v. 210, p. 108702, 2022.
- SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. **Cement and concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

SHI, X.; ZHANG, C.; LIANG, Y.; LUO, J.; WANG, X.; FENG, Y.; LI, Y.; WANG, Q.; ABOMOHRa, A.E.F. *Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymer concrete. **Materials***, v. 14, n. 23, p. 7375, 2021.

TRIPATHY, A.; ACHARYA, P.K. *Strength, life cycle analysis, embodied energy and cost-sensitivity assessment of sugarcane bagasse ash-based ternary blends of geopolymer concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering***, v. 28, n. 3, p. 591-610, 2024.

WANG, A.; FANG, Y.; ZHOU, Y.; WANG, C.; DONG, B.; CHEN, C. *Green protective geopolymer coatings: Interface characterization, modification and life-cycle analysis. **Materials***, v. 15, n. 11, p. 3767, 2022.

XIONG, G.; CUNDY, A.; GUO, X. *Utilization of corn cob ash (CCA) to prepare geopolymer grout: Reaction mechanism, crack repair effectiveness and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production***, v. 476, p. 143741, 2024.

YUAN, B.; LIANG, J.; HUANG, X.; HUANG, Q.; ZHANG, B.; YANG, G.; WANG, Y.; YUAN, J.; WANG, H.; YUAN, P. *Eco-efficient recycling of engineering muck for manufacturing low-carbon geopolymers assessed through LCA: exploring the impact of synthesis conditions on performance. **Acta Geotechnica***, p. 1-21, 2024.

ZHANG, J.; FERNANDO, S.; LAW, D.W.; GUNASEKURA, C.; SETUNGE, S.; SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G. *Life cycle assessment for geopolymer concrete bricks using brown coal fly ash. **Sustainability***, v. 15, n. 9, p. 7718, 2023.

ZHAO, M.N.; GONG, X.Z.; SHI, F.F.; MING, H.F. *Life cycle assessment of ready-mixed concrete. In: **Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd***, 2013. p. 234-238.