COMPARATIVO ECONÔMICO E AMBIENTAL ENTRE CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO LCA E LCC.

Economic and Environmental Comparison between Alkali-Activated Cement and Portland Cement Using LCA and LCC.

Andreza Frare
Instituto Federal de Santa Catarina | São Carlos, SC | andreza.frare@ifsc.edu.br

Bruna Letícia Batista Cordeiro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Guarapuava, PR | brunaabatistacordeiro15@gmail.com

Allan Guimarães Borçato
Instituto Federal de Santa Catarina | Florianópolis, SC | allan.borcato@ifsc.edu.br

Marcell Mariano Corrêa Maceno
Universidade Federal do Paraná | Curitiba, PR | marcell.maceno@gmail.com

Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Universidade Federal do Paraná | Curitiba, PR | medeiros.ufpr@gmail.com

Dyorgge Alves Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Guarapuava, PR | dyorggesos@gmail.com

Caroline Angulski da Luz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Guarapuava, PR | angulski@hotmail.com

Resumo

As indústrias de cimento geram impactos ambientais significativos devido às emissões de CO_2 e à extração mineral. Para reduzir esses impactos, pesquisas têm investigado o cimento ativado alcalinamente, que não utiliza clínquer e é mais sustentável. Este estudo visa avaliar o ciclo de vida, impactos ambientais e custos do CAA em comparação ao cimento Portland CP II - E, seguindo as normas ISO 14040 e utilizando o software Simpro e o método ReCiPe 2016. A viabilidade econômica foi analisada com base nos preços comerciais em Curitiba. Os resultados mostraram que o CAA é mais sustentável que o CP II - E em todas as categorias, especialmente em relação à emissão de gases de efeito estufa e à extração de recursos naturais. Além disso, o CAA apresentou um custo de 33,71% do custo do CP II.

Palavras-chave: Cimento álcali-ativado; Cimento Portland; Avaliação do Ciclo de Vida; Análise de Custos; IMPACT 2002.

ABSTRACT

Cement industries are responsible for significant environmental impacts due to CO_2 emissions and mineral extraction. To reduce these impacts, research has explored alternatives such as alkali-activated cement, which does not use clinker, making it more sustainable. This study aims to evaluate the life cycle, environmental impacts, and costs of alkali-activated cement compared to Portland cement (CP II - E), following ISO 14040 standards. The data was processed using the Simpro software and the ReCiPe 2016 analysis method. Economic viability was assessed based on the commercial prices of raw materials in Curitiba, Brazil. The results showed that alkali-activated cement can be considered a more sustainable material than CP II - E in all categories, especially regarding greenhouse gas emissions and resource extraction. Additionally, alkali-activated cement had a cost corresponding to 33.71% of the CP II cost.

Keywords: Alkali-activated cement, Portland cement, Life Cycle Assessment, Cost analysis, IMPACT 2002.

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland (CP) foi uma das principais fontes industriais de emissões de CO_2, liberando aproximadamente 0,87 a 0,94 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento produzido, o que representou cerca

de 7% das emissões globais. No Brasil, essa indústria foi responsável por 2,3% das emissões de CO_2 (GCCA, 2021). Como alternativa, o cimento álcali-ativado (CAA) foi desenvolvido a partir de resíduos industriais, como cinzas volantes e escória de alto-forno (IPCC, 2014). Embora apresentasse vantagens em relação ao CP, como maior resistência e durabilidade, sua falta de padronização dificultou sua adoção em larga escala, tornando-se necessária uma maior pesquisa sobre seu ciclo de vida para validar seus benefícios (JUENGER et al., 2011).

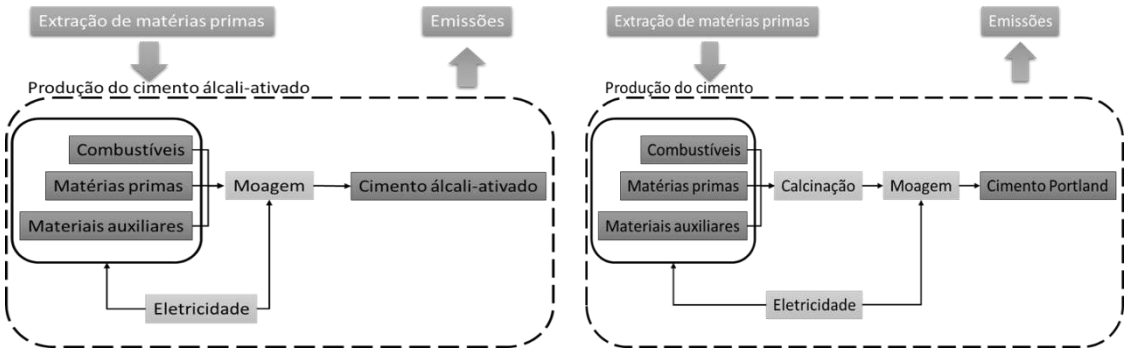
A análise do ciclo de vida (ACV) foi fundamental para avaliar os impactos ambientais dos materiais de construção, considerando o uso de recursos naturais e as emissões de CO_2 (BRE, 2013). Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar os impactos ambientais do cimento álcali-ativado em comparação com o cimento Portland, por meio da ACV, seguindo as diretrizes da ISO 14040 e da BRE 15804, a fim de verificar sua viabilidade como uma alternativa sustentável na construção civil.

2 METODOLOGIA

O estudo utilizou o cimento Portland CP II-E, que continha até 34% de escória de alto-forno, assumindo o limite máximo permitido pela NBR 16697 (2018). Para fins de comparação, foi considerado o CAA, composto exclusivamente por escória de alto-forno e ativado com 5% de hidróxido de sódio (FRARE et al., 2024).

O estudo seguiu a ISO 14040 e comparou o ciclo de vida do cimento álcali-ativado e do cimento Portland. A unidade funcional considerada foi um metro cúbico de concreto, com composição equivalente para ambos os cimentos. A avaliação dos impactos ambientais baseou-se em um fluxo de referência de uma tonelada de material produzido. A Figura 1 apresentou os sistemas de produtos analisados e seus limites.

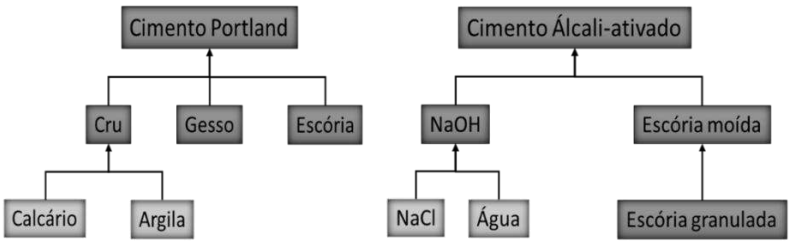
Figura 1: Sistema de produção para o CAA e o CP II – E.



O escopo abrangeu desde a extração da matéria-prima até o produto final, incluindo a produção de combustíveis, calcinação e moagem do clínquer, mas excluiu o transporte ao consumidor. A análise considerou que os diferentes cimentos possuíam durabilidade semelhante, embora seu desempenho pudesse variar conforme a microestrutura e as condições de exposição. Devido à dificuldade de quantificação desses fatores, foi adotado um ciclo simplificado (HABERT; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011).

O processo que precedeu a análise de inventário para a inserção de dados no software LCA foi o desenvolvimento de uma árvore de produtos, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Árvore de produtos (CAA e CP II – E)



O cimento Portland CP II-E (34% de escória) foi composto por calcário (1.650 kg/t), argila (400 kg/t), gesso (40 kg/t) e escória (340 kg/t), com um consumo energético total de 109.129,17 kJ/t. Já o CAA utilizou apenas escória (1.000 kg/t), demandando 210.312 kJ/t para moagem. Além disso, sua ativação alcalina exigiu 450 kg de água, 1.060 kg de cloreto de sódio e 10.044 kJ/t de energia para eletrólise (EUROCHLOR, 2019). A

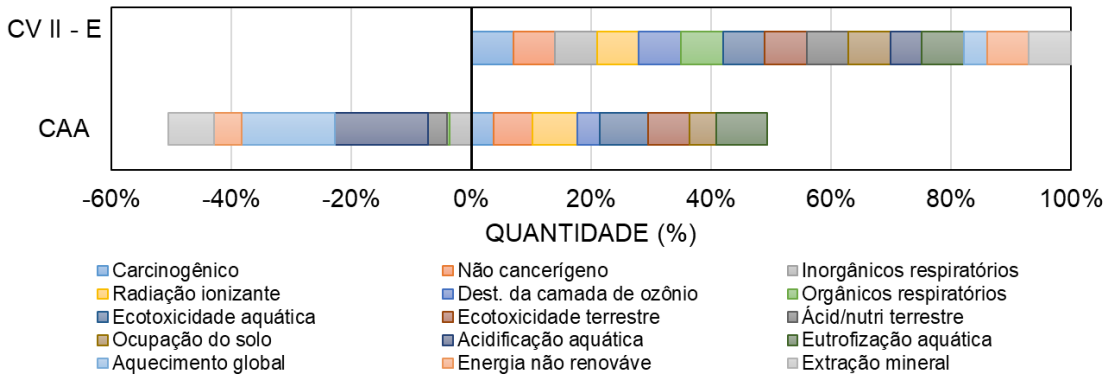
avaliação do ciclo de vida foi realizada no software Simapro, utilizando o método IMPACT 2002+, que analisou os impactos ambientais em quatro categorias: saúde humana, qualidade do ecossistema, consumo de recursos e mudança climática (JCR, 2010).

O estudo de custos focou nas etapas de extração e produção do cimento, sem considerar a durabilidade ao longo do tempo. O CP II-E teve custos de R$ 363,00/t para o calcário, R$ 88,00/t para a argila e R$ 36,50/t para o gesso, enquanto a escória não teve custo registrado. Os custos energéticos variaram entre R$ 0,23 e R$ 15,97/t de cimento. Para o CAA, a moagem da escória apresentou um custo de R$ 33,65/t, e a produção de hidróxido de sódio via eletrólise custou R$ 146,25/t, com consumo energético de 10.044 kJ/t. Os custos dos materiais foram baseados em valores médios do mercado paranaense, especificamente da região de Curitiba, considerando cotações locais. O custo da energia foi calculado com base na tarifa média nacional de eletricidade (R$ 0,576/kWh) (ANEEL, 2020).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 3 foi obtida a partir dos dados analisados no software Simapro e se refere à caracterização dos impactos ambientais causados pelos dois tipos de cimento comparados.

Figura 3: Caracterização dos impactos ambientais



De modo geral, o CAA apresentou impactos significativamente menores do que o cimento Portland em todas as categorias analisadas, com destaque para acidificação aquática, aquecimento global e extração de minerais, que registraram diferenças de 175,3%, 155,7% e 148,9%, respectivamente.

A acidificação aquática ocorre devido à emissão de CO_2, que se dissolve na água do mar, formando ácido carbônico e reduzindo o pH, impactando a vida marinha e os seres humanos. O CAA, por não passar pelo processo de calcinação, reduziu essas emissões e seus impactos (ALVES, 2014).

Além disso, o CAA apresentou menor impacto no aquecimento global, pois utiliza escória de alto-forno, um subproduto industrial, dispensando a extração de novas matérias-primas e reduzindo os impactos ambientais (McLellan et al., 2011). No entanto, por ser um material mais fino, o CAA pode gerar problemas de saúde, como dificuldades respiratórias e dermatológicas devido à liberação de partículas suspensas.

Os resultados da Análise do Ciclo de Vida (ACV) demonstraram que o CAA apresentou uma pegada de carbono 94,73% menor que o CP II-E, com valores de 121,25 kg CO_2-eq/t contra 2.300,5 kg CO_2-eq/t, reforçando sua vantagem ambiental.

Em termos econômicos, o CAA teve um custo de produção mais baixo, de R$ 181,63/t contra R$ 530,22/t para o CP II-E, devido ao uso de resíduos e menor consumo de energia. No entanto, o estudo não considerou os impactos da vida útil e manutenção dos materiais, sendo necessário aprofundar estudos sobre a durabilidade e os custos de manutenção do CAA.

4 CONCLUSÕES

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é fundamental para avaliar os impactos ambientais dos materiais, identificando as principais categorias responsáveis pela degradação ambiental. O software Simapro auxilia na comparação dos impactos dos materiais aglutinantes e na escolha de alternativas mais sustentáveis.

O CAA apresentou menor impacto ambiental em relação ao cimento Portland CP II-E, especialmente nas emissões de gases de efeito estufa, pois dispensa a calcinação. Sua pegada de carbono embutida, calculada pelo método ReCiPe 2016, foi de 2.300,5 kg CO_2-eq/t para o CP II-E e 121,25 kg CO_2-eq/t para o CAA, resultando em uma redução de 94,73%. Além disso, o CAA teve um custo de produção 66,22% menor, demonstrando sua viabilidade econômica. No entanto, o estudo focou apenas no processo de produção, sem avaliar a durabilidade dos materiais, tornando necessária uma análise mais aprofundada para validar seus benefícios a longo prazo

REFERÊNCIAS

Alves, B. G. R., 2014. Efeitos da Acidificação Oceânica nos Processos Biogeoquímicos em Sedimentos Costeiros: Experimentos In Situ e de Laboratório. Tese de Doutorado. Oceanografia Biológica. Instituto Oceanográfico - USP. São Paulo.

ANEEL. National Electric Energy Agency. (2020). Consumer Tariffs. Tariff Ranking. Available At: Https://Www.Aneel.Gov.Br/Ranking-Das-Tarifas.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16697:2018 – Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

_____. EB-208: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BRE. Building Research Establishment, 2012. Regras de Categoria de Produto para Declaração Ambiental de Produto Tipo III de Produtos de Construção para a EN 15804: 2012. Watford: BRE, 2013.

Ciroth, A.; Hunkeler, D.; Klopffer, W.; Swarr, T.; Pesonen, H., 2011. Life Cycle Costing - Um Código de Prática. Mensagens-chave e Avaliação Crítica. LCA XI Chicago.

EUROCHLOR. The European Chlor-Alkali Industry: an electricity intensive sector exposed to carbon leakage. Brussels: EuroChlor, 2019.

Frare, A.; Luz, C. A.; Medeiros, M. H. F.; Pereira Filho, J. I. 2024 Estudo das relações SiO_2/Al_2O_3 e CaO/SiO_2 em cimentos álcali-ativados. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 17, n. 3, p. e17313, 2024.

GCCA. Indústria global de cimento e concreto anuncia roteiro para alcançar emissões inovadoras de CO_2 “Net zero” até 2050. 2021.

Habert, G.; D’espinose De Lacaillerie, J. B.; Roussel, N., 2011. Uma Avaliação Ambiental da Produção de Concreto à Base de Geopolímero: Revisão das Tendências de Pesquisa Atuais. Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 11, p. 1229-1238.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva.

JCR. Centro Conjunto de Pesquisa - JRC, 2011. Análise das Metodologias Existentes de Avaliação de Impacto Ambiental para Uso na Avaliação do Ciclo de Vida: Documento de Base. (Manual ILCD).

Juenger, M. C. G. et al., 2011 Avanços em Ligantes Cementícios Alternativos. Cement and Concrete Research, 1232–1243.

McLellan et al., B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G. D. Corder., 2011. Custos de Carbono e Emissões para Pastas de Geopolímero Comparadas ao Cimento Portland Comum. Journal of Cleaner Production, 19 (9-10), pp. 1080 – 1090.