

Avaliação do ciclo de vida de concretos com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha

Life cycle assessment of concretes with partial replacement of Portland cement by red ceramic waste

Aldo Ribeiro de Carvalho, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

aldorcarvalho@outlook.com

Marcela Martins Carrara, Engenheira Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

marcelamartinscarrara@gmail.com

Laura Coura Soranço, Engenheira Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

laura.soranco@estudante.ufjf.br

Thaís Mayra de Oliveira, Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.

thais.mayra@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – [02]

Resumo

O presente estudo realiza uma Avaliação do Ciclo de Vida para quantificar os impactos ambientais associados à produção de concretos com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV). Foram analisadas três misturas: concreto de referência (REF), RCV10% e RCV25%, por meio do software SimaPro 10.2.0.0 e da base de dados Ecoinvent 3, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044. Os resultados indicaram reduções nas emissões de CO₂ de 9% e 23% para RCV10% e RCV25%, respectivamente. Além de diminuições de 6% e 8% (RCV10%) e de 16% e 19% (RCV25%) para eutrofização marinha e acidificação terrestre. Conclui-se que o RCV é um material cimentício suplementar promissor, capaz de reduzir os impactos ambientais do cimento Portland e contribuir para a inserção do setor de construção civil no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, em especial os de nº 9, 11, 12, 13 e 15.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Cerâmica Vermelha; Cimento Portland; Pozolana

Abstract

The present study performs a Life Cycle Assessment (LCA) to quantify the environmental impacts associated with the production of concretes in which Portland cement is partially replaced by red ceramic waste (RCV). Three mixtures were analyzed: reference concrete (REF), RCV10%, and RCV25%, using the SimaPro 10.2.0.0 software and the Ecoinvent 3 database, in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards. The results indicated reductions in CO₂ emissions of 9% and 23% for RCV10% and RCV25%, respectively, as well as decreases of 6% and 8% (RCV10%) and 16% and 19% (RCV25%) in marine eutrophication and terrestrial acidification, respectively. It is concluded that RCW is a promising supplementary cementitious material capable of reducing the environmental impacts associated with Portland cement production and contributing to the alignment of the construction sector with the United Nations Sustainable Development Goals, particularly Goals 9, 11, 12, 13, and 15.

Keywords: Life Cycle Assessment; Red Ceramic Waste; Portland Cement; Pozzolan

1. Introdução

O setor da construção civil é um dos principais responsáveis por impactos ambientais, em razão da elevada geração de resíduos e das significativas emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que esse setor contribua com aproximadamente 37% das emissões globais (UNEP, 2021) e consuma cerca de 40% das mais de 90 bilhões de toneladas de matérias-primas extraídas anualmente (Valentini, 2023), evidenciando sua elevada dependência de recursos naturais não renováveis. Nesse contexto, o concreto de cimento Portland destaca-se como o segundo material mais consumido no mundo, sendo que a produção de cimento responde por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), principalmente devido ao elevado teor de clínquer (Carvalho *et al.*, 2023). As etapas mais emissoras desse processo incluem a extração e transporte de matérias-primas, a moagem para obtenção da farinha crua, o pré-aquecimento e a queima em forno rotativo (Cai *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, diversas pesquisas têm buscado reduzir o impacto ambiental do cimento Portland, seja por meio da modificação do clínquer, da sua substituição parcial por materiais cimentícios suplementares ou da substituição total por ligantes alternativos, como os geopolímeros ácidos e alcalinos (Carvalho *et al.*, 2023; Carvalho *et al.*, 2025). Esses materiais podem apresentar comportamento pozolânico, reagindo com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formando compostos com propriedades cimentantes (ABNT, 2014). Entre os materiais investigados, destacam-se cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço, escórias granuladas de alto-forno, resíduos industriais e agrícolas, lama vermelha sinterizada, cinzas de resíduos sólidos urbanos e resíduos cerâmicos vermelhos (RCV), que têm demonstrado potencial como substitutos parciais do clínquer (Shahas, Girija e Nazer, 2023; Medina *et al.*, 2018; Li e Jiang, 2020; Liu *et al.*, 2023; Kleib *et al.*, 2021; Jain, Gupta e Chaudhary, 2022; Hoppe Filho *et al.*, 2021).

Especificamente em relação ao RCV, estudos indicam resultados promissores quanto ao desempenho mecânico e à reatividade pozolânica. Pavesi, Rohden e Garcez (2021) avaliaram substituições de 5%, 10%, 20% e 40% do cimento Portland em concretos estruturais, sem prejuízo à resistência à compressão. De forma complementar, Carvalho *et al.* (2025)

observaram atividade pozolânica significativa para teores de 10% e 25%, com índice de desempenho de 98% e resistência à cal de 6,3 MPa. Além disso, os concretos com RCV apresentaram melhor desempenho após exposição a altas temperaturas (400 °C e 600 °C), destacando-se a mistura com 10% de substituição. Devido à sua composição, o RCV pode ser classificado como um aluminossilicato com potencial de aplicação também em sistemas geopoliméricos. Apesar desses avanços, Jain, Gupta e Chaudhary (2022) identificaram apenas 12 estudos sobre o uso do RCV em concretos convencionais, indicando que a maioria das pesquisas concentra-se em análises mecânicas, com teores de substituição entre 8% e 30% e ganhos de resistência entre 4% e 6%.

Entretanto, ainda há uma lacuna relevante na literatura quanto à avaliação comparativa dos impactos ambientais associados ao uso de diferentes teores de RCV em substituição ao cimento Portland, especialmente sob a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A maioria dos estudos prioriza propriedades mecânicas, sem uma análise ambiental sistemática que permita quantificar os benefícios dessa substituição.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente os impactos ambientais da produção de concretos convencionais e de concretos com substituição parcial do cimento Portland por RCV em teores de 10% e 25%. Para isso, é realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida utilizando o software SimaPro 10.2.0.0 e a base de dados Ecoinvent 3, adotando a abordagem cradle-to-gate e considerando 1 m³ de concreto como unidade funcional. Como principal contribuição, o estudo fornece uma análise ambiental detalhada e comparativa entre diferentes níveis de substituição, ampliando os resultados previamente apresentados por Carvalho (2025) e oferecendo subsídios para a aplicação mais sustentável do RCV na construção civil.

2. Metodologia

A ACV foi conduzida para o concreto de referência (REF) e para as misturas com 10% (RCV10%) e 25% (RCV25%) de substituição do cimento Portland por RCV. As modelagens foram realizadas no software SimaPro 10.2.0.0, utilizando a base de dados Ecoinvent 3, com o sistema de alocação “Cut-off por classificação” e processos unitários. Os limites do sistema seguiram a abordagem cradle-to-gate (do berço ao portão), em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, considerando como unidade funcional a produção de 1 m³ de concreto (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

A avaliação de impacto foi realizada pelo método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09, que traduz os fluxos de inventário em categorias de impacto ambiental intermediárias (midpoints), como aquecimento global, acidificação, eutrofização e toxicidade. A escolha do nível midpoint se justifica por sua maior robustez científica e menor incerteza em comparação aos indicadores de endpoint, permitindo uma análise mais detalhada e menos agregada dos impactos ambientais. A perspectiva hierárquica (H) foi adotada por representar um cenário intermediário, amplamente aceito na literatura, baseado em consensos científicos e

horizontes de tempo realistas, equilibrando abordagens mais conservadoras (I) e mais otimistas (E).

Os insumos foram definidos com base no traço experimental adotado por Carvalho et al. (2026), priorizando-se conjuntos de dados representativos do contexto brasileiro. Na ausência de dados regionais, utilizaram-se datasets globais ou “rest of world” (RoW), prática comum em estudos de ACV quando há limitação de dados locais, garantindo a completude do inventário. Foram considerados os seguintes processos do Ecoinvent:

- Cimento, CP V RS {BR} | mercado de cimento, CP V RS | *Cut-off*, U
- Químico orgânico {GLO} | mercado de produtos químicos, orgânicos | *Cut-off*, U
- Fábrica de mistura de concreto {GLO} | Mercado de fábrica de mistura de concreto | *Cut-off*, U
- Brita, triturado {BR} | mercado de cascalho, triturado | *Cut-off*, U
- Óleo lubrificante {RoW} | Mercado de óleo lubrificante | *Cut-off*, U
- Areia {BR} | Mercado de areia | *Cut-off*, U
- Aço, de baixa liga, laminado a quente {GLO} | Mercado de aço, de baixa liga, laminado a quente | *Cut-off*, U
- Borracha sintética {GLO} | Mercado de borracha sintética | *Cut-off*, U
- Água da torneira {BR} | Mercado de água da torneira | *Cut-off*, U
- Diesel, queimado em máquina de construção {GLO} | Mercado de diesel, queimado em máquina de construção | *Cut-off*, U
- Eletricidade, média tensão {BR} | Grupo de mercado de eletricidade, média tensão | *Cut-off*, U
- Sucata de aço {RoW} | Mercado de sucata de aço | *Cut-off*, U
- Resíduos de concreto {RoW} | Mercado de resíduos de concreto | *Cut-off*, U
- Resíduos de óleo mineral {RoW} | Mercado de óleos minerais usados | *Cut-off*, U
- Resíduos de borracha, não especificados {RoW} | mercado de resíduos de borracha, não especificados | *Cut-off*, U
- Águas residuais da produção de concreto {RoW} | Mercado de águas residuais da produção de concreto | *Cut-off*, U

Algumas simplificações de modelagem foram adotadas e são justificadas a seguir. A areia manufaturada foi modelada como areia natural de rio, uma vez que o processo produtivo da empresa Petra Agregados (Matias Barbosa – MG) consiste essencialmente em britagem

adicional, cujo consumo energético é considerado equivalente, em termos de ordem de grandeza, ao da extração por dragagem. Dessa forma, essa aproximação não compromete a representatividade dos resultados, sobretudo em análises comparativas.

Os aditivos químicos não foram considerados no inventário devido à indisponibilidade de datasets específicos no Ecoinvent e à sua baixa fração em massa no concreto, o que implica contribuição marginal nos impactos globais. Essa omissão é frequentemente adotada na literatura quando os dados são limitados e o efeito esperado é pouco significativo.

Por fim, ressalta-se que as escolhas metodológicas e simplificações adotadas foram mantidas consistentes para todas as misturas analisadas, garantindo a comparabilidade entre os cenários e a confiabilidade da análise ambiental comparativa proposta neste estudo.

3. Resultados e análises

A Figura 1, apresenta a ACV comparativa dos concretos analisados, evidenciando que a substituição parcial do cimento Portland por RCV reduz os impactos ambientais em todas as misturas avaliadas. De forma geral, observa-se uma relação direta entre o teor de substituição e a magnitude da redução dos impactos.

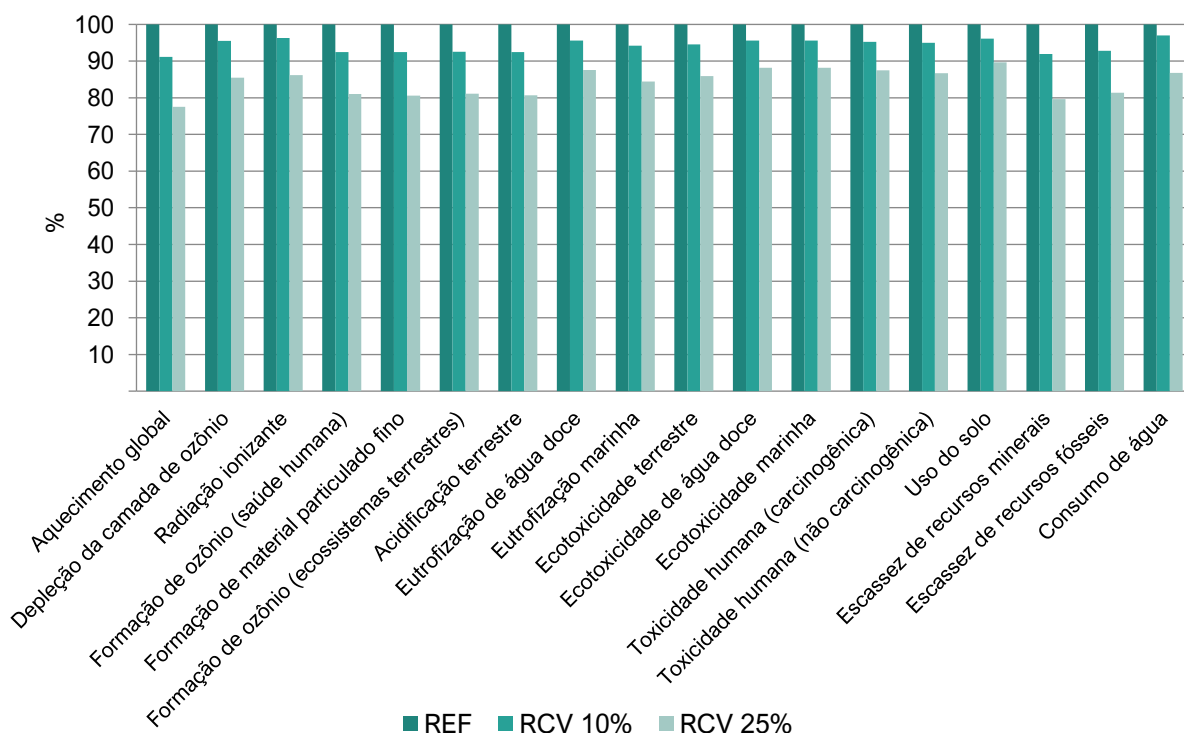


Figura 1: Comparação entre o impacto do concreto em diferentes categorias. Fonte: Autores (2025).

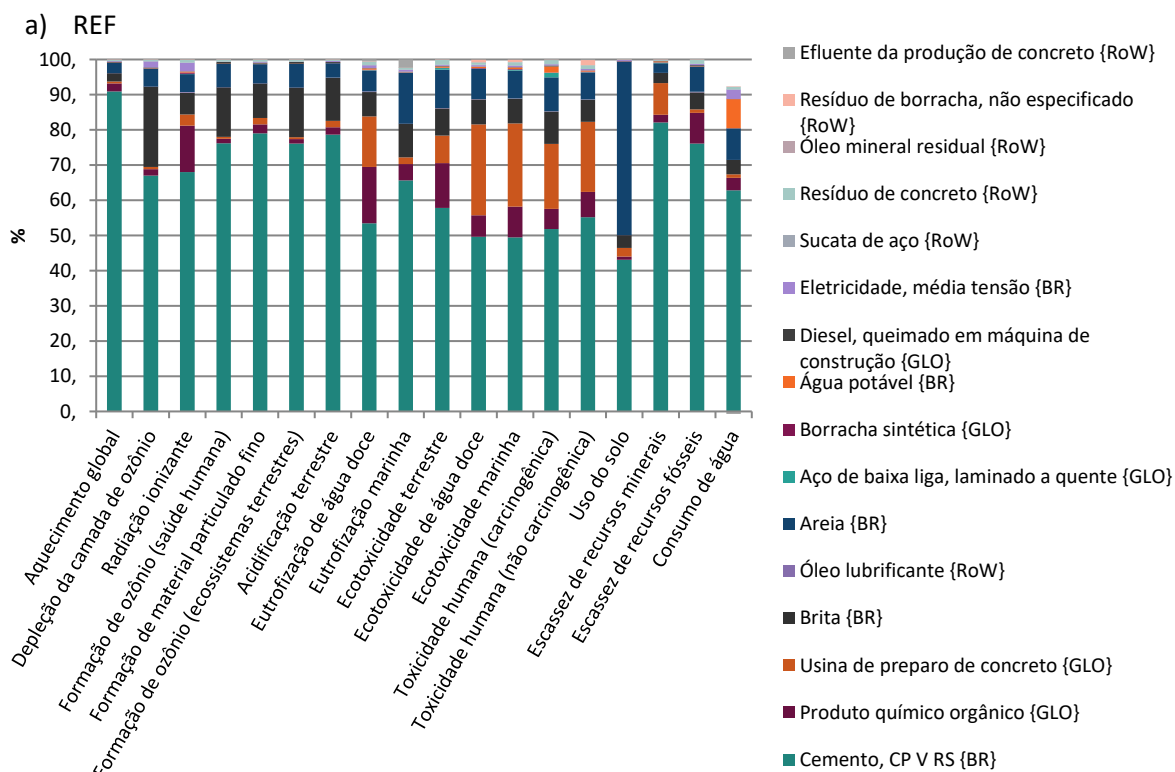
O concreto com 25% de substituição (RCV25%) apresentou o melhor desempenho ambiental, com reduções mais expressivas na maioria das categorias, especialmente em

aquecimento global, formação de material particulado fino, acidificação terrestre, ecotoxicidade (terrestre, marinha e de água doce), toxicidade humana, escassez de recursos minerais e fósseis e consumo de água. Em termos quantitativos, a redução das emissões de CO₂ atingiu aproximadamente 23% em relação ao concreto de referência (REF). Resultados semelhantes foram observados para acidificação terrestre e eutrofização marinha, com reduções de até 19% e 16%, respectivamente.

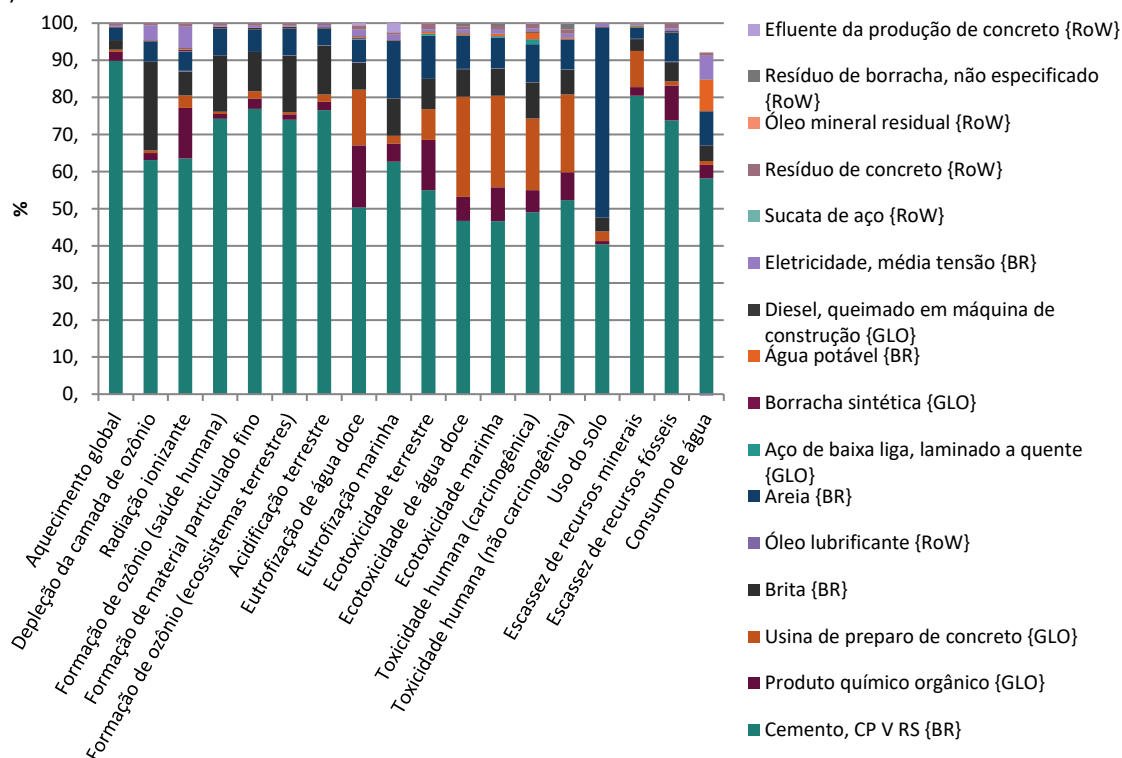
A mistura com 10% de substituição (RCV10%) também apresentou melhorias ambientais consistentes, porém menos pronunciadas, com redução de aproximadamente 9% nas emissões de CO₂ e ganhos mais modestos nas demais categorias. Esses resultados indicam que, embora ambas as substituições sejam ambientalmente vantajosas, o aumento do teor de RCV potencializa os benefícios ambientais.

As categorias de destruição do ozônio estratosférico e radiação ionizante apresentaram reduções menos significativas em ambos os teores de substituição. Esse comportamento pode estar associado às etapas de beneficiamento do RCV, que demandam consumo energético e influenciam cadeias produtivas relacionadas a essas categorias.

A análise do inventário, apresentada na Figura 2, confirma que o cimento Portland permanece como o principal contribuinte para os impactos ambientais, sobretudo nas categorias relacionadas a emissões atmosféricas e esgotamento de recursos. A redução do teor de clínquer nos concretos com RCV é, portanto, o principal fator responsável pela melhoria do desempenho ambiental. Como consequência, outros insumos, como aço, agregados, diesel e eletricidade, passam a apresentar maior contribuição relativa, o que reforça a necessidade de estratégias complementares de mitigação.



b) RCV10%



c) RCV25%

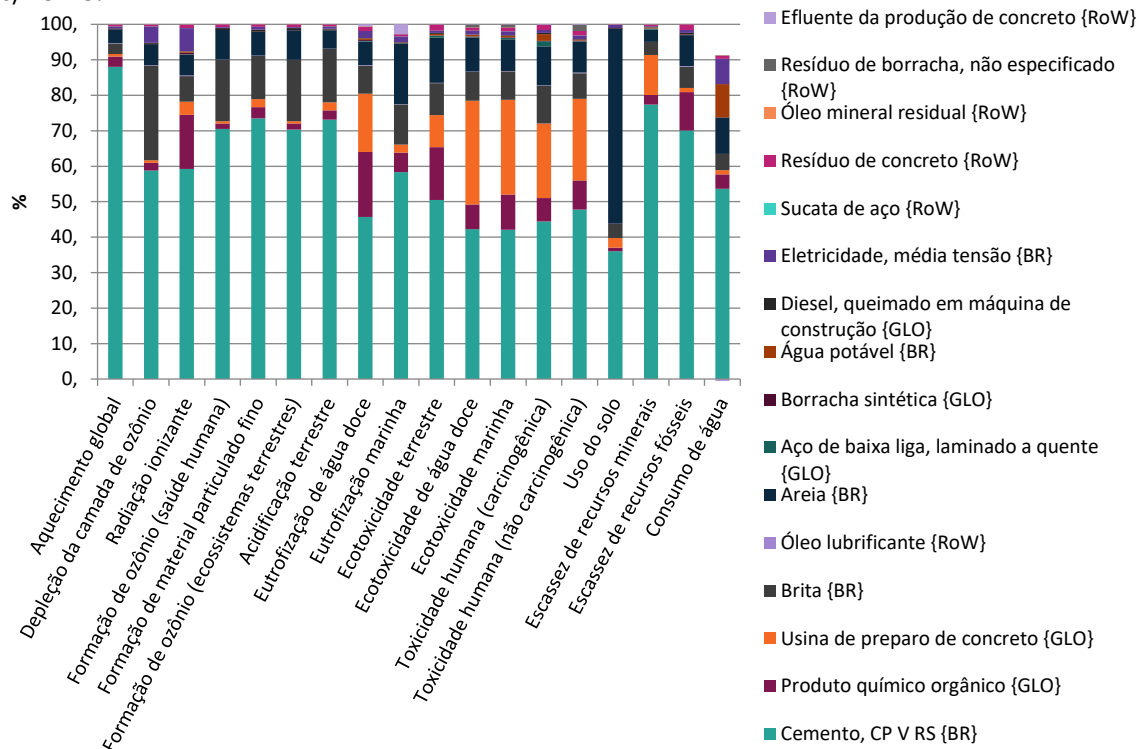


Figura 2: Impacto de componentes e produção de concretos; a) CTRL, b) RCW10%, C) RCW25%. Fonte: Autores (2025).

Os resultados obtidos estão em consonância com os achados de Carvalho et al. (2025) que demonstraram a viabilidade técnica do uso de RCV quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade. O presente estudo avança ao incorporar a dimensão ambiental, evidenciando que a substituição parcial do cimento também contribui para a redução de impactos ao longo do ciclo de vida.

Sob a perspectiva da sustentabilidade, os resultados reforçam o papel do RCV como um material estratégico para a promoção da economia circular na construção civil. A reutilização de resíduos cerâmicos reduz a demanda por matérias-primas virgens e minimiza a disposição em aterros, contribuindo diretamente para a mitigação de impactos ambientais e para a descarbonização do setor.

Esse potencial está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente aqueles relacionados à indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), cidades sustentáveis (ODS 11), consumo e produção responsáveis (ODS 12) e ação climática (ODS 13). No entanto, os resultados também indicam que a maximização dos benefícios ambientais depende de abordagens integradas, que incluam a melhoria da eficiência energética, o uso de fontes renováveis e a otimização dos processos produtivos.

Dessa forma, a incorporação de RCV em concretos não apenas melhora o desempenho ambiental do material, mas também representa uma estratégia efetiva de transição para um modelo produtivo mais circular, de baixo carbono e eficiente no uso de recursos.

4. Considerações Finais

O cimento Portland é um dos principais contribuintes para as emissões de CO₂ no setor da construção, reforçando a necessidade de sua substituição parcial por materiais cimentícios suplementares. Nesse contexto, o presente estudo realizou uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), comparando o concreto convencional com misturas em que 10% e 25% do cimento Portland foram substituídos por resíduo de cerâmica vermelha (RCV).

Os resultados evidenciaram que a incorporação do RCV contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais do concreto, especialmente nas categorias de aquecimento global, acidificação terrestre e escassez de recursos fósseis e minerais. A substituição de 25% do cimento apresentou o melhor desempenho ambiental global, com reduções expressivas nas emissões de CO₂ e menor consumo de energia.

Além disso, a análise reforça o potencial do RCV como material cimentício suplementar, alinhado aos princípios do desenvolvimento sustentável e à descarbonização do setor da construção. A utilização desse resíduo reduz o impacto ambiental da produção de cimento, favorece a destinação sustentável dos resíduos cerâmicos e contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas pela indústria da construção civil. Assim, este estudo evidencia que o reaproveitamento do RCV constitui uma alternativa técnica viável.

Os resultados também evidenciam a necessidade de políticas públicas voltadas à valorização e ao reaproveitamento de resíduos na construção civil, como incentivos fiscais, metas de substituição obrigatória e apoio à infraestrutura de reciclagem, de modo a ampliar o alcance das práticas de economia circular e reduzir a dependência de matérias-primas virgens. Assim, este estudo consolida evidências científicas de que o aproveitamento do RCV é uma estratégia tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, além de destacar que políticas públicas eficazes são fundamentais para a consolidação de uma construção civil circular, de baixo carbono e socialmente responsável.

Referências

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2014.
- CAI, T. et al. Effects of nanosilica on supersulfated cements of different clinker-activation degree. **Construction and Building Materials**, 365, 15 February 2023.
- CARVALHO, A. R. D. et al. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, out./dez. 2023. 217-239.
- CARVALHO, A. R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, 3 November 2023. 133078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>.
- CARVALHO, A. R. D. et al. Effects of red ceramic waste on the thermomechanical properties of concrete and its life cycle assessment. **Materials and Structures**, 02 December 2025. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02880-x>.
- CARVALHO, A. R. D. et al. Exploratory literature review and scientometric analysis of artificial intelligence applied to geopolymeric materials. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 1 April 2025. 110210. Doi:10.1016/j.engappai.2025.110210.
- CARVALHO, A. R. D. et al. **Influência dos resíduos de cerâmica vermelha nas propriedades termomecânicas do concreto**. IX Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção. Belo Horizonte: ANTAC. 2025.
- HOPPE FILHO, J. et al. Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, 16 August 2021. 123653. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123653>.
- ISO. **14040:2006 - Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Geneva, Switzerland. 2006a.
- ISO. **14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. Geneva, Switzerland. 2006b.
- JAIN, P.; GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. A literature review on the effect of using ceramic waste as supplementary cementitious materials in cement composites on workability and compressive strength. **Materials Today: Proceedings**, n. 65, 2022. 871-876.
- KLEIB, J. et al. Production of Portland cement clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. **Case Studies in Construction Materials**, 15, 17 July 2021.
- LI, C.; JIANG, L. Utilization of limestone powder as an activator for early-age strength improvement of slag concrete. **Construction and Building Materials**, n. 253, 2020.

- LIU, S. et al. Development of novel mineral admixtures for sulphoaluminate cement clinker: The effects of wet carbonation activated red mud. **Journal of Building Engineering**, 23 January 2023.
- MEDINA, C. et al. Design and characterisation of ternary cements containing rice husk ash and fly ash. **Construction and Building Materials**, 2018. 65-76.
- PAVESI, T. B.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R. Supporting circular economy through the use of red ceramic waste as supplementary cementitious material in structural concrete. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2021. 2278-2296.
- SHAHAS, S.; GIRIJA, K.; NAZER, M. Evaluation of pozzolanic activity of ternary blended supplementary cementitious material with rice husk ash and GGBS. **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- UNEP, U. N. E. P. **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. [S.l.], p. 15. 2021.
- VALENTINI, L. Sustainable sourcing of raw materials for the built environment. **Materials Today: Proceedings**, 2023. 2214-7853.