XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8457

Análise comparativa de concretos a base de resíduos a partir da Avaliação de ciclo de vida

Comparative analysis of waste-based concretes using Life Cycle Assessment

KAREN OLIVEIRA PEDUTO
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | karen.peduto@ufv.br
MATHEUS MENEZES OLIVEIRA
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | matheus.menezes@ufv.br
BEATRYZ CARDOSO MENDES
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa | Brasil | beatryz.mendes@ufv.br

Resumo

A indústria da construção civil gera altos impactos ambientais, tornando o concreto sustentável essencial para reverter esse cenário. Este estudo objetivou comparar o impacto ambiental e a ecoeficiência de concretos estruturais produzidos com diferentes resíduos (RCD, rochas ornamentais, cinza volante e lama vermelha) no contexto de Viçosa (MG). A metodologia empregou uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa "do berço ao portão", baseada em dados secundários da literatura e utilizando a função de desejabilidade estatística para integrar indicadores ambientais e de resistência mecânica. A mistura com cinza volante destacou-se, pois o efeito pozolânico mantém a resistência enquanto garante redução de impactos ambientes. Concretos com RCD e rochas ornamentais também foram competitivos regionalmente, tendo o segundo melhor desempenho. A lama vermelha obteve ecoeficiência inferior devido aos gastos energéticos na etapa de processamento. Como contribuição científica, o estudo demonstra que, além da substituição do cimento e de agregados por resíduos, a ecoeficiência depende também da disponibilidade e viabilidade de recursos para garantir reduções de impacto ambiental significativas.
Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida; Ecoeficiência; Agregados Reciclados; Cinza Volante; Função de Desejabilidade.

Abstract

The civil construction industry generates high environmental impacts, making sustainable concrete essential to reverse this scenario. This study aimed to compare the environmental impact and eco-efficiency of structural concretes produced with different waste materials (CDW, ornamental stone waste, fly ash, and red mud) in the context of Viçosa (MG). The methodology applied a comparative "cradle-to-gate" Life Cycle Assessment based on secondary data from the literature and using the statistical desirability function to integrate environmental and mechanical strength indicators. The fly ash mixture stood out, as the pozzolanic effect maintains strength while ensuring the reduction of environmental impacts. Concretes with CDW and ornamental stone waste were also regionally competitive, achieving the second-best performance. Red mud obtained lower eco-efficiency due to energy expenditure in the processing stage. As a scientific contribution, the study demonstrates that, beyond replacing cement and aggregates with waste, eco-efficiency also depends on the availability and feasibility of resources to ensure significant environmental impact reductions.
Keywords: *Life Cycle Assessment; Eco-efficiency; Recycled Aggregates; Fly Ash; Desirability Function.*

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8457

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

A indústria da construção civil é um dos principais pilares do desenvolvimento global, mas também um dos maiores vetores de degradação ambiental. Segundo o Relatório de Status Global de Edificação e Construção [1], o setor respondeu por 34% da demanda de energia e 37% das emissões de CO^2 em 2024. Diante dos desafios ambientais e da necessidade urgente de reduzir o impacto da construção no meio ambiente, a busca por materiais de construção mais sustentáveis tornou-se uma prioridade global.

Nesse cenário, os concretos sustentáveis emergem como uma solução técnica e ecológica. De acordo com Scrivener et al. (2018) [2], esses materiais buscam reduzir impactos ao longo de todo o ciclo de vida, mantendo propriedades técnicas e viabilidade econômica. As principais estratégias incluem a utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), como cinzas volantes e escórias, e a substituição de agregados naturais por agregados reciclados (AR) provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD).

Para quantificar a eficácia dessas alternativas, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta essencial para a avaliação detalhada dos impactos ambientais de um sistema de produto ou serviço, normatizada pelas ISO 14040 e 14044 [3][4][5]. A ACV fornece uma visão holística das formulações e práticas construtivas, considerando fatores como processos produtivos, transporte e manutenção [6][7][8]. Assim, essa ferramenta promove a sustentabilidade a partir da integração de critérios ambientais e técnicos [9].

Na literatura recente sobre concreto com agregados reciclados e materiais suplementares, por exemplo, estudos abrangentes trazem evidências importantes para a aplicação prática da ACV no setor. Xing et al. (2023) concluiu que o uso de agregados reciclados (AR) reduz impactos ambientais, recomendando o uso de AR local e a caracterização rigorosa de sua composição [10]. De forma complementar, Hasheminezhad (2024) ressalta que a redução no Potencial de Aquecimento Global (GWP) muitas vezes decorre da diminuição do clínquer no cimento, evidenciando o potencial das estratégias com MCS [11]. Esse contexto reforça que os benefícios da adição de resíduos, dependem da sua composição, origem local e da otimização do traço vinculada ao desempenho mecânico para garantir reduções reais de emissões. Para isso, é importante que os dados de entrada levem em conta as variáveis regionais, garantindo que a ACV seja aplicada a materiais tecnicamente viáveis, ambientalmente relevantes e coerentes com as condições e desafios locais.

Diante disso, esta pesquisa aplica a ACV para avaliar diferentes misturas de concretos com resíduos no contexto de Viçosa (MG). O objetivo é comparar o impacto ambiental e a ecoeficiência local por meio da função de desejabilidade estatística [12], fornecendo dados técnicos que alinhem a sustentabilidade à realidade dos recursos disponíveis na região.

METODOLOGIA

ESCOPO

O estudo realizou uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparativa "do berço ao portão" (*cradle-to-gate*) entre concretos estruturais convencionais e sustentáveis (com resíduos industriais ou reciclados) baseada em dados secundários provenientes da literatura e consolidada por meio da função de desejabilidade. A unidade funcional

foi a produção de 1m³, focando na extração e beneficiamento de matérias-primas, etapas de maior impacto. Vale ressaltar que a etapa de transporte não foi incluída no escopo da ACV, uma vez que o critério de seleção das misturas sustentáveis priorizou o uso de resíduos gerados e disponíveis localmente na região de Viçosa, o que reduz a variabilidade e a relevância dessa etapa no impacto comparativo.

SELEÇÃO DOS CONCRETOS

A seleção baseou-se em revisão bibliográfica (Scopus, Scielo, Capes, Elsevier) dos últimos 10 anos, priorizando artigos Qualis A com mais de 10 citações. Considerou-se o contexto de Viçosa/MG, marcado pela mineração e beneficiamento de rochas. Assim, selecionaram-se materiais com lama vermelha, resíduos de rochas ornamentais, resíduos de construção e demolição (RCD) e cinza volante, devido à viabilidade técnica regional. Com relação à cinza volante, ela foi escolhida devido à consolidação técnica da aplicação em concretos e à possibilidade de comercialização. Os artigos selecionados são apresentados na Tabela 1. As misturas selecionadas foram:

I. Concreto com agregado reciclado de RCD [13];
II. Concreto com resíduos de rochas ornamentais [14];
III. Concreto com cinza volante [15];
IV. Concreto com adição de lama vermelha [16].

Tabela 1 – Concretos selecionados.

Tipo de concreto	Autor	Informações do estudo	Traços adotados	Observações
Concretos com agregados reciclados de plantas de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD).	Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018) [13]	Foram analisadas misturas de concreto com percentuais variados de substituição (0% a 75%) de agregados naturais por agregados reciclados	RCD25 e RCD50	Substituição de 25% e 50% do agregado graúdo convencional por agregado reciclado.
Concretos com resíduos de rochas ornamentais.	Lima et al. (2021) [14]	Foi avaliada a utilização de resíduos de rochas ornamentais como agregado miúdo em concretos estruturais	RRO10, RRO20 e RRO50	Substituuição de 10%, 20% e 50% do agregado miúdo por resíduos resultantes do beneficiamento secundário de rochas ornamentais durante a etapa de recorte e polimento das chapas de mármores, granitos e outras rochas ornamentais.
Concretos com resíduo de bauxita, lama vermelha.	Nikbin et al. (2018) [16]	Foram testadas misturas com substituição de cimento por lama vermelha a diferentes níveis (RM5% a RM25%).	LV5, LV10, LV15, LV20 e LV25	Substituição parcial do cimento por lama vermelha em concretos leves. Serão utilizados os dados das misturas RM5%, RM10%, RM15%, RM20% e RM25%.

Concreto com cinza volante.	Singh e Prasad (2024) [15]	Foram avaliados concretos com alto volume de cinza volante (fly ash) e de GGBS (Escória de alto-forno granulada moída)	CV70	Entre os traços testados, o autor descreve a mistura identificada como M6, que substitui o cimento em 70% por cinza volante e será a referência utilizada.

Fonte: Autores.

A escolha das misturas a serem analisadas foi limitada pela resistência à compressão aos 28 dias menor que 30 MPa, de modo a garantir que os resultados dos indicadores ambientais não fossem alterados por um valor de resistência muito elevado. Ressalta-se que os resíduos analisados atuam de formas diferentes na mistura, com alguns sendo inertes (RCD e rochas ornamentais) e outros possuindo ação química (cinza volante e lama vermelha). Dessa forma, o objetivo é justamente comparar qual estratégia de uso de resíduo é mais vantajosa ambientalmente para atingir a resistência mínima.

INVENTÁRIO E AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

O inventário utilizou dados de Souza (2021) [12] e Ecoinvent via *software* SimaPro. Analisaram-se fluxos de entrada e saída (matérias-primas, energia e água) para cimento, agregados, aditivos e materiais suplementares, incluindo o processamento de reciclados. Na fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida deste estudo foram considerados as seguintes métricas de impacto ambiental: consumo primário de energia não renovável (TPE), matéria-prima primária (PRM), material reciclado total (RM), consumo de água (WC), potencial de aquecimento global (GWP), potencial ecotoxicológico de água doce (FAETP), potencial ecotoxicológico terrestre (TETP), potencial ecotoxicológico marinho (MAETP), potencial de depleção do ozônio (ODP), eutrofização (EP) e acidificação (AP).

Foi aplicada a metodologia desenvolvida por Souza (2021) [12], a qual emprega a função de desejabilidade estatística (Equações 1 e 2) para transformar indicadores individuais em respostas normalizadas entre 0 e 1, onde 1 corresponde ao desempenho mais favorável. A partir dessas desejabilidades são construídos indicadores compostos que sintetizam diferentes aspectos ambientais dos concretos analisados. A seguir são descritos os indicadores utilizados:

a) Redução de Impactos Energéticos (RIE). Baseado exclusivamente no indicador TPE, sua finalidade é simplificar o processo de tomada de decisão voltado para a transição para uma economia de baixo carbono e para a criação de políticas de eficiência energética no setor da construção [12] (Equações 1 e 3).
b) Redução de Impactos dos Materiais (RIM). Define-se como a média das desejabilidades associadas a PRM, RM e WC (Equação 4). Este indicador avalia como a produção do concreto pressiona os recursos naturais [12]. Para PRM e WC utiliza-se a função de desejabilidade da Equação 1; já para RM aplica-se a Equação 2.
c) Redução de Gases de Efeito Estufa (RGE). Obtém-se pela desejabilidade do indicador GWP (Equação 5 e 1), sendo de particular relevância por focar na

mitigação dos impactos relacionados ao aquecimento global, tema central nas ações internacionais de sustentabilidade [12].

d) Redução do Potencial de Ecotoxicidade (RPE). Calcula-se como a média das desejabilidades de FAETP, TETP e MAETP (Equação 6 e 1), e identifica concretos com menor potencial de impacto tóxico ao meio ambiente [10].

e) Redução da Acidificação, Eutrofização e Depleção de Ozônio (AEO). Composto pela média das desejabilidades dos indicadores ODP, EP e AP (Equação 7 e 1), o indicador reflete a capacidade do concreto em reduzir emissões que degradam a camada de ozônio ou que causam desequilíbrios químicos no solo e na água [12].

f) Ecoeficiência Potencial (EEP). Sintetiza os resultados ambientais por meio da média dos indicadores RIE, RIM, RGE, RPE e AEO (Equação 8), gerando um único índice que facilita a comparação da ecoeficiência entre concretos. Nesta pesquisa, os coeficientes de importância foram fixados em 1 para garantir uma análise direta e equitativa de todos os pilares ambientais estudados.

$$d_i(y_i(x)) = \{1, se\ y_i(x) < L_i \left[\frac{U_i - y_i(x)}{U_i - L_i}\right]^t, se\ L_i \leq y_i(x) \leq U_i\ 0, se\ y_i(x) > U_i \quad (1)$$

$$d_i(y_i(x)) = \{0, se\ y_i(x) < L_i \left[\frac{y_i(x) - L_i}{U_i - L_i}\right]^s, se\ L_i \leq y_i(x) \leq U_i\ 1, se\ y_i(x) > U_i \quad (2)$$

Em que:

$y_i(x)$ é a soma do parâmetro utilizado no indicador individual de cada material analisado multiplicado pelo seu respectivo consumo

L_i é o menor valor obtido nos concretos estudados na literatura;

U_i é o maior valor obtido nos concretos estudados na literatura;

$$RIE = d_i\left(\frac{TPE}{f_{c28}}\right) \quad (3)$$

$$RIM = \frac{1}{3}\left[d_i\left(\frac{PRM}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{RM}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{WC}{f_{c28}}\right)\right] \quad (4)$$

$$RGE = \left[d_i\left(\frac{GWP}{f_{c28}}\right)\right] \quad (5)$$

$$RPE = \frac{1}{3}\left[d_i\left(\frac{FAETP}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{TETP}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{MAETP}{f_{c28}}\right)\right] \quad (6)$$

$$AEO = \frac{1}{3}\left[d_i\left(\frac{ODP}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{EP}{f_{c28}}\right) + d_i\left(\frac{AP}{f_{c28}}\right)\right] \quad (7)$$

$$EEP = \frac{1}{5}[RIE + RIM + RGE + RPE + AEO] \quad (8)$$

Em que:

TPE, *PRM*, *RM*, *WC*, *GWP*, *FAETP*, *TETP*, *MAETP*, *ODP*, *EP* e *AP*, representam as métricas individuais já multiplicadas pelos consumos de material.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8457

RESULTADOS E DISCUSSÃO

SELEÇÃO E CONCRETOS ANALISADOS

A partir dos artigos selecionados foram extraídas as quantidades de materiais por m³ e os valores de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos a serem analisados, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de materiais.

ID	Materiais (kg)											fc (MPa)
	Cimento Portland	Água	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo	AR Graúdo	CV	Lama Vermelha	Calcário	Argila Exp.	Resíduo Rocha Orna.	Superplastificante	
RCD25 [11]	280	180	545	1123	208							24
RCD50 [11]	280	180	363	1097	416							21
RRO10 [12]	361	208	1017	704						83		27
RRO20 [12]	363	204	1025	626						176		25
RRO50 [12]	356	225	1004	369						407		22
LV5 [13]	428	228	222	181			23	180	300		5	28
LV10 [13]	405	228	215	176			45	180	300		5	26
LV15 [13]	383	228	209	171			68	180	300		5	25
LV20 [13]	360	228	203	166			90	180	300		5	23
LV25 [14]	338	228	196	161			113	180	300		5	20
CV70 [14]	114	163	1098	732		266						25

Fonte: Autores.

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Os dados relacionados com as métricas de impacto ambiental para cada material podem ser encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados das métricas de impacto ambiental.

Material	TPE (MJ/kgf)	PRM (%)	RM (%)	WC (m³/kgf)	GWP (kgf CO2 eq./kgf)	FAETP (kg 1,4-DBeq./kgf)	TETP (kg 1,4-DBeq./kgf)	MAETP (kg 1,4-DBeq./kgf)	ODP (kg CFC-11/kgf)	EP (kg PO4/kgf)	AP (kgf SO2/kgf)
Cimento Portland	4,20E+00	100	0	3,84E-03	8,83E-01	4,14E-03	1,17E-03	1,94E+01	2,04E-08	2,01E-04	1,54E-03
Água	2,00E-03	100	0	1,00E-03	2,22E-04	5,16E-05	2,03E-06	7,62E-02	1,04E-11	7,48E-08	1,18E-06
Agregado graúdo natural	6,80E-02	100	0	3,44E-05	1,54E-02	2,38E-03	2,09E-05	7,75E+00	1,00E-09	1,41E-05	4,54E-05
Agregado miúdo natural	8,50E-02	100	0	2,20E-06	7,48E-03	5,87E-04	6,31E-06	1,72E+00	1,60E-09	5,84E-06	6,26E-05
AR grosso	4,10E-02	0	100	0,00E+00	6,63E-03	7,85E-04	1,00E-05	1,77E+00	7,09E-10	6,66E-06	2,25E-05
Cinza volante	4,17E-01	0	100	0,00E+00	7,67E-03	1,47E-03	7,90E-05	1,61E+00	2,79E-09	6,84E-06	6,54E-05
Lama vermelha	2,95E-01	0	100	4,68E-10	1,01E-08	1,10E-10	8,05E-13	2,54E-16	1,73E-12	3,76E-10	8,05E-12
Calcário	2,66E-01	100	0	0,00E+00	1,57E-02	2,31E-04	1,32E-05	2,05E-04	1,90E-09	3,88E-06	8,31E-05

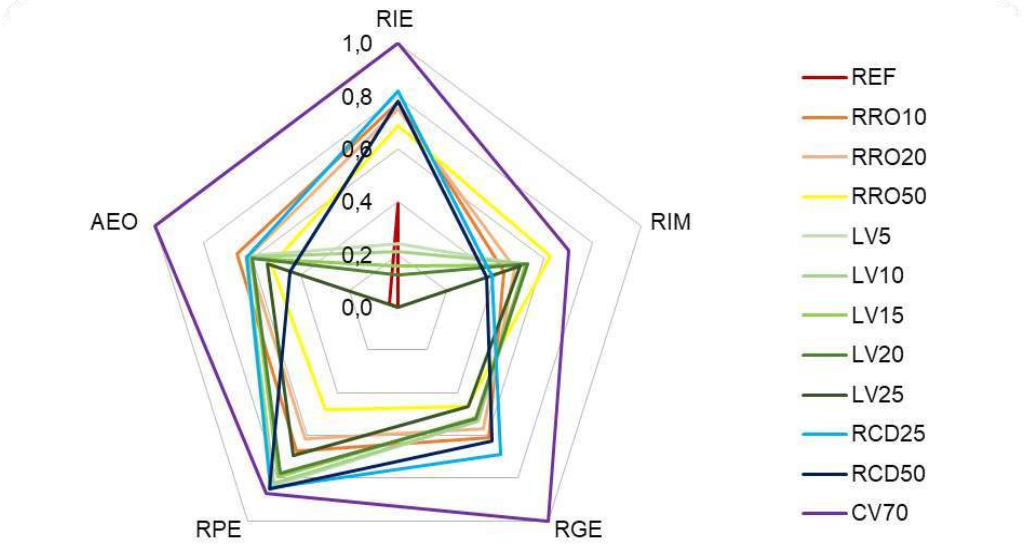
Argila expandida	6,30E+00	100	0	7,87E-10	3,51E-07	5,89E-12	5,60E-12	1,22E-12	4,33E-11	9,79E-11	4,52E-10
Resíduo de rocha ornamental	3,00E-03	0	100	1,06E-04	7,64E-04	5,17E-06	3,25E-07	5,38E-06	1,26E-10	9,41E-08	3,39E-06
Superplastificante	2,47E+01	100	0	6,04E-03	1,45E+00	2,08E-01	5,13E-03	3,35E+02	9,42E-08	1,46E-03	6,40E-03

Fonte: Adaptado de Souza (2021).

AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

A partir dos dados de impacto ambiental apresentados na Tabela 2, calculou-se os indicadores de ecoeficiência propostos por Souza (2021) [12], condensados no gráfico da Figura 1.

Figura 1 - Comparação dos indicadores de ecoeficiência entre os concretos avaliados.



Fonte: Autores.

O concreto com adição de cinza volante (CV70) apresentou os melhores resultados gerais entre os indicadores de ecoeficiência. Isso é explicado pela dupla função da cinza volante: além de reduzir a demanda por cimento como material cimentício suplementar, ela possui atividade pozolânica, contribuindo para o ganho de resistência do concreto. Dessa forma, como o resíduo não compromete as propriedades mecânicas, e considerando que a ecoeficiência definida aqui incorpora a resistência como critério, esse concreto se destaca em relação aos demais.

No indicador de RIE, a maioria das misturas obteve desempenho próximo a 0,8; entretanto, a cinza volante alcançou o valor máximo (1,0), evidenciando excelente desempenho energético. Em contrapartida, as misturas com lama vermelha apresentaram desempenho substancialmente inferior, devido ao alto consumo de calor e eletricidade no processamento da alumina a partir da bauxita, de onde deriva o resíduo [17]. Observa-se, portanto, que o uso da lama vermelha, apesar de reduzir a demanda por matéria-prima primária, introduz impactos adicionais relevantes na etapa *upstream* (processos e fluxos de entrada que antecedem a própria aplicação do resíduo no concreto).

Quanto à RIM, as desejabilidades variaram entre 0,4 e 0,6, com destaque para CV70 e RRO50 devido ao alto volume de resíduos incorporados. Entretanto, o ganho

ambiental do RRO50 no RIM é neutralizado por seu desempenho inferior em outros indicadores, reforçando a necessidade de uma análise holística.

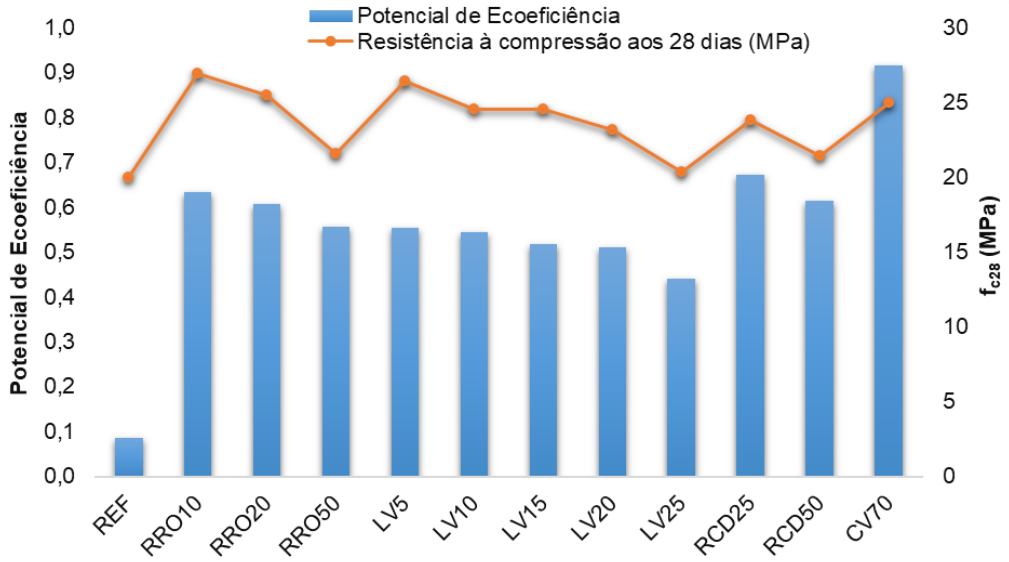
Para RGE, a maioria dos concretos variou entre 0,5 e 0,7, destacando-se o concreto com adição de cinza volante, que obteve o melhor desempenho. Esse resultado está diretamente associado à significativa redução do teor de cimento na mistura, principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa e, portanto, um dos materiais de maior impacto nos resultados de ecoeficiência dos concretos. Os concretos com RCD também mostraram resultados positivos no RGE, ocupando a segunda posição. Ao substituir agregados naturais por reciclados, evita-se o ciclo de extração, britagem e transporte de longa distância de matérias-primas virgens, reduzindo um impacto significativo em regiões onde a logística depende de combustíveis fósseis [18].

A análise da RPE apresentou variações de 0,6 a 0,9, com o pior índice registrado para o RRO50. Este dado sugere que o processamento intensivo de rochas ornamentais pode gerar efluentes tóxicos que impactam negativamente solos e águas. Em contraste, a lama vermelha destacou-se no RPE, pois sua incorporação na matriz do concreto previne a lixiviação de substâncias perigosas de descartes inadequados, transformando um passivo ambiental em um insumo seguro [19].

No indicador AEO, os resultados ficaram bastante próximos entre si, mas o CV70 novamente obteve o valor máximo, reforçando seu equilíbrio entre baixo impacto ambiental e manutenção do desempenho técnico.

A Figura 2 sintetiza os resultados por meio do EEP (Equação 8), sobreposto aos valores de resistência à compressão aos 28 dias. Observa-se que o concreto com cinza volante apresentou o maior EEP, reflexo do baixo teor de cimento e das boas propriedades mecânicas. Esse resultado alinha-se com a realidade do mercado, que já reconhece a cinza volante como um material pozolânico eficiente, sendo utilizada na composição do CP IV e CP II-Z [20].

Figura 2 - Valores de EEP e de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos avaliados.



Fonte: Autores

A análise conjunta entre EEP e resistência indica que maiores taxas de substituição dos materiais originais acarretaram redução da resistência à compressão, o que, por sua

vez, tende a diminuir o potencial de ecoeficiência quando a perda mecânica é significativa. Apesar dessa tendência, todos os concretos testados demonstraram EEP substancialmente superior ao do concreto de referência (REF), evidenciando contribuições relevantes para a redução dos impactos ambientais do concreto em geral.

Essa diferença de desempenho entre as misturas se deve diretamente ao papel que cada resíduo desempenha na matriz cimentícia. Os resíduos com ação química ativa (como a cinza volante) atuam substituindo o cimento (matéria-prima de maior impacto ambiental), mantendo a resistência graças ao seu efeito pozolânico. Por outro lado, os resíduos inertes (RCD e rochas ornamentais) atuam apenas no preenchimento físico, substituindo agregados naturais.

No *ranking* de desempenho, as misturas com agregados reciclados (RCD e rochas ornamentais) ocuparam o segundo lugar, seguidas pelas composições com lama vermelha, que apresentaram os menores índices de EEP.

Conclui-se que a viabilidade dessas soluções depende do equilíbrio entre ganhos ambientais e propriedades mecânicas. Vale ressaltar que as estratégias estudadas podem, ainda, ser empregadas em conjunto, potencializando ainda mais os efeitos benéficos.

Por fim, destaca-se, ainda, que a eficiência do emprego de tais estratégias depende diretamente do contexto produtivo e ambiental da região no qual será empregado. No contexto da cidade de Viçosa, a geração significante de resíduos de construção e demolição, geralmente descartados em aterros sanitários de forma irregular [21], aliados às demandas cada vez maiores por matéria prima [22], destacam os concretos com RCD como excelente alternativa local, tanto por possibilitar concretos mais ecoeficientes quanto para diminuir a quantidade de resíduos gerados, tornando o setor da construção civil mais sustentável.

CONCLUSÃO

O estudo avaliou, por meio de ACV no recorte *cradle-to-gate*, o desempenho ambiental de concretos a base de resíduos para o contexto de Viçosa (MG), considerando a síntese dos indicadores pela função de desejabilidade. Esse recorte metodológico permitiu comparar as misturas analisadas e estabelecer as seguintes conclusões:

- Resíduos com ação química ativa na matriz cimentícia tendem a obter melhores resultados de ecoeficiência, por substituírem o cimento e possuírem efeito pozolânico. Entretanto, isso não ocorre com a lama vermelha devido aos impactos ambientais significativos nas etapas de processamento desse resíduo.
- Misturas contendo agregados reciclados demonstraram potencial promissor quando avaliadas quanto ao balanço entre desempenho ambiental e resistência mecânica.
- As variações de desempenho entre as formulações decorrem de fatores logísticos e de beneficiamento, evidenciando que o contexto produtivo e ambiental deve ser considerado para assegurar a ecoeficiência dos concretos sustentáveis.

Em termos práticos e considerando o contexto de Viçosa/MG, são identificadas como estratégias prioritárias a incorporação de cinza volante, quando disponível, e o uso de agregados reciclados de RCD, com potencial para reduzir impactos e garantir melhorias à gestão de resíduos.

Recomenda-se, portanto, a adoção integrada dessas medidas, acompanhada de controles de qualidade e ensaios de desempenho que garantam a durabilidade e a segurança das aplicações.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem o fomento, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa e a obtenção dos resultados apresentados.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta de Inteligência Artificial Gemini (Google) para a tradução e revisão do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] **ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS**. Emissões de CO2 na área de construção civil atingem novo recorde. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805122. Acesso em: jun. 2024.

[2] SCRIVENER, K. L. et al. Sustainable Concrete: New Technologies and Strategies. **Journal of Materials Science**, 2018. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-018-0354-9. Acesso em: 22 fev. 2025.

[3] **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**. ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genebra: ISO, 2006.

[4] **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**. ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Genebra: ISO, 2006.

[5] ZHANG, Y. et al. A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115–125, jun. 2019.

[6] COLANGELO, F. et al. Life cycle assessment of recycled concretes: a case study in southern Italy. **Science of The Total Environment**, v. 615, p. 1506–1517, fev. 2018.

[7] GUINÉE, J. B. et al. Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2001.

[8] FNAIS, A. et al. The application of life cycle assessment in buildings: challenges, and directions for future research. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, n. 5, p. 627–654, mai. 2022.

[9] ZAMAGNI, A. et al. Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 6, p. 653–656, 2012.

[10] XING, W.; TAM, V. W. Y.; LE, K. N.; HAO, J. L.; WANG, J. Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 193, 2023.

[11] HASHEMINEZHAD, A.; KING, D.; CEYLAN, H.; KIM, S. Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: a review. **Science of The Total Environment**, 2024.

[12] SOUZA, A. M. et al. Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 40, 2021.

[13] ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, 2018.

[14] LIMA, A. F.; PICANÇO, M. S.; BORGES, B.; POMPEU NETO, G. T. F. **Ornamental stone wastes as fine aggregate for the constitution of structural concrete**. 2021.

[15] SINGH, G. V. P. B.; PRASAD, V. D. Environmental impact of concrete containing high volume fly ash and ground granulated blast furnace slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 448, 2024.

[16] NIKBIN, I. M.; ALIAGHAZADEH, M.; CHARKHTAB, S.; FATHOLLAHPOUR, A. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). **Journal of Cleaner Production**, v. 172, 2018.

[17] SAEZ-GUINOA, J.; GARCIA-FRANCO, E.; LLERA-SASTRESA, E.; ROMEO, L. M. The effects of energy consumption of alumina production in the environmental impacts using life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2024.

[18] BELLO, L. B. D.; CALMON, J. L. Avaliação do ciclo de vida de agregados reciclados aplicados a materiais de construção de base cimentícia. **Engenharia Ambiental e Sustentabilidade**, 2024.

[19] MORSALI, S.; YILDIRIM, F. Environmental impact assessment of red mud utilization in concrete production: a life cycle assessment study. **Environment, Development and Sustainability**, 2023.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 21 p.

[21] COSTA, T. F. et al. **Utilização de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) na produção de concretos sustentáveis: revisão da literatura e contribuição da**

Universidade Federal de Viçosa. In: SIMPÓSIO DE INTEGRAÇÃO ACADÊMICA, 2022, Viçosa. Anais... Viçosa, 2022.

[22] **CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL**. Sustentabilidade na Construção. 2007. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/website/noticia/show.asp?npgCode=DBC0153A-072A-4A43-BB0C-2BA2E88BEBAE. Acesso em: 08 set. 2025.