AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM FOSFOGESSO: UM ESTUDO DE CASO

Life cycle analysis of mortars produced with phosphogypsum: a case study alternative

Bianca Rafaela Silva Calderón-Morales
Universidad de Sevilla| Sevilla, Espanha | biacalderon@gmail.com

Glauber Zerbini Costal
Universidade Federal de Itajubá | Itabira, Minas Gerais | glaubercostal@unifei.edu.br;

Antonio Garcia-Martínez
Universidad de Sevilla| Sevilla, Espanha | agarcia6@us.es

Paloma Pineda
Universidad de Sevilla| Sevilla, Espanha | palomapineda@us.es

Rafael García-Tenório
Universidad de Sevilla| Sevilla, Espanha | gtenorio@us.es

RESUMO

Este estudo analisa os impactos ambientais da produção de argamassas com fosfogesso, resíduo da indústria de fertilizantes, utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). O fosfogesso substituiu parcialmente o cimento em proporções de 5% a 20%. Os resultados mostraram que as argamassas com fosfogesso reduziram o Potencial de Aquecimento Global (PAG) em até 18,71%, além de apresentarem menores impactos em categorias como toxicidade humana e ecotoxicidade aquática. O transporte representou 29% do impacto total, sendo um fator crítico, enquanto a gestão de resíduos teve impacto mínimo. A etapa de produção foi a segunda maior responsável por emissões. Conclui-se que o uso de fosfogesso é uma alternativa viável para reduzir emissões, promover a economia circular e valorizar resíduos industriais na construção civil. Estudos futuros devem focar em otimizações logísticas e desempenho mecânico a longo prazo.

Palavras-chave: Fosfogesso; Avaliação de Ciclo de Vida; Argamassas; Impacto Ambiental; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the environmental impacts of producing mortars with phosphogypsum, a by-product of the fertilizer industry, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. Phosphogypsum partially replaced cement in proportions ranging from 5% to 20%. The results showed that mortars containing phosphogypsum reduced the Global Warming Potential (GWP) by up to 18.71% and also presented lower impacts in categories such as human toxicity and aquatic ecotoxicity. Transportation accounted for 29% of the total impact, being a critical factor, while waste management had a minimal impact. The production phase was the second largest contributor to emissions. It is concluded that the use of phosphogypsum is a viable alternative to reduce emissions, promote the circular economy, and valorize industrial waste in the construction industry. Future studies should focus on logistical optimizations and long-term mechanical performance.

Keywords: Phosphogypsum; Life Cycle Assessment; Mortars; Environmental Impact; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O aumento das mudanças climáticas, associado à urbanização e ao crescimento populacional, tem impulsionado o interesse por práticas mais sustentáveis na construção civil (Global Alliance for Buildings and Construction, 2025). A meta de neutralidade climática até 2050, com emissões líquidas de carbono zero, pode ser alcançada por meio da capacitação social e de ações políticas e industriais coordenadas, podendo reduzir em média 55% as emissões diretas e indiretas de CO_2 (European Commission, 2019b, 2019a)

Embora seja essencial para o desenvolvimento econômico e social, a construção civil é uma das atividades mais impactantes ambientalmente, responsável por mais de 30% da extração de recursos naturais, 25% dos resíduos sólidos e cerca de 40% do consumo global de energia, além de contribuir com um quarto das emissões mundiais de CO_2 (Benachio; Freitas; Tavares, 2020; Furtado *et al.,* 2023; Hong *et al.,* 2015; Utsev *et al.,* 2022). Nesse contexto, a produção de cimento Portland destaca-se como a principal fonte de emissões e consumo energético (Sahmenko *et al.,* 2024), incentivando a busca por materiais cimentícios suplementares (Cao *et al.*, 2021; Kaminskas *et al.*, 2020; Msinjili *et al.,* 2021; Scrivener *et al.,* 2018). Estudos recentes propõem estratégias para substituir materiais de alto impacto por alternativas mais sustentáveis (Abdulkareem; Havukainen; Horttanainen, 2019; Braz; Silvestre; Brito, 2019; Meglin; Kytzia; Habert, 2022; Ricciotti *et al.,* 2023; Zulcão *et al.*, 2020).

O fosfogesso, subproduto industrial da produção de ácido fosfórico, é composto majoritariamente por sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Shen *et al.,* 2014). No Brasil, sua produção anual é de 11,6 milhões de toneladas, representando 2,2% da produção global (Costa *et al.,* 2021), mas apenas 15% desse volume é utilizado em aplicações como aditivos para asfalto, controle de pega no cimento, argamassas e pavimentação (Calderón-Morales et al., 2021; Cuadri et al., 2014). O uso comercial, no entanto, é limitado pela presença de radionuclídeos e impurezas químicas (Rashad, 2017; Rutherford; Dudas; Samek, 1994), embora estudos recentes busquem novas rotas de valorização (Agrawal *et al.*, 2023; CÁNOVAS *et al.,* 2018).

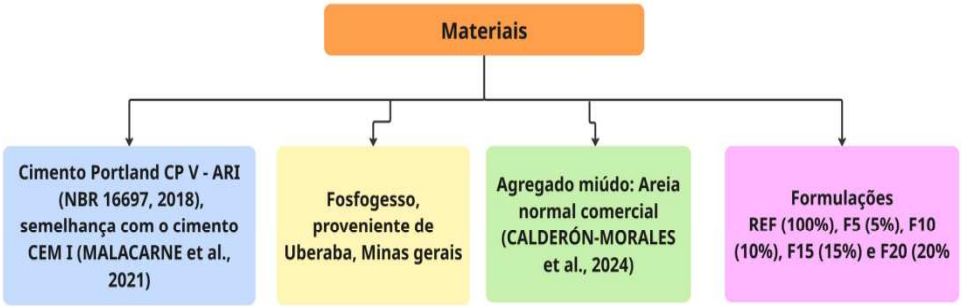
A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é amplamente utilizada para analisar impactos ambientais associados à gestão de resíduos (Dong *et al.*, 2024) e vem sendo aplicada na análise de materiais de construção com resíduos industriais (Gettu *et al*., 2018; Ricciotti *et al.,* 2023; Sahmenko *et al.*, 2024; Spósito *et al.,* 2023). Além disso, a ACV tem sido integrada ao estudo de tecnologias de reciclagem e economia circular *(Chen et al.,* 2025), permitindo identificar benefícios ambientais, econômicos e melhorias sustentáveis nos processos construtivos (Romero-Hermida *et al.,* 2019; Tsioka; Voudrias, 2020)

Este trabalho tem como objetivo avaliar osi impactos ambientais da incorporação de fosfogesso em argamassas à base de cimento, utilizando a ACV, além de mapear os principais processos envolvidos na produção. Estudos prévios já apontaram o bom desempenho técnico desses materiais (Calderón-Morales *et al.,* 2021), reforçando o potencial do fosfogesso como alternativa sustentável para a construção civil.

2 MATERIAIS

Esta pesquisa discute os impactos ambientais de argamassas cimentícias que incorporam fosfogesso como substituto parcial do cimento. Os materiais utilizados estão listados na **Figura 1**, e o estudo baseia-se na norma (NBR 16697, 2018) e os estudos de (Malacarne et al., 2021) e (Calderón-Morales et al., 2024).

Figura 1: Lista de materiais utilizados na produção das argamassas



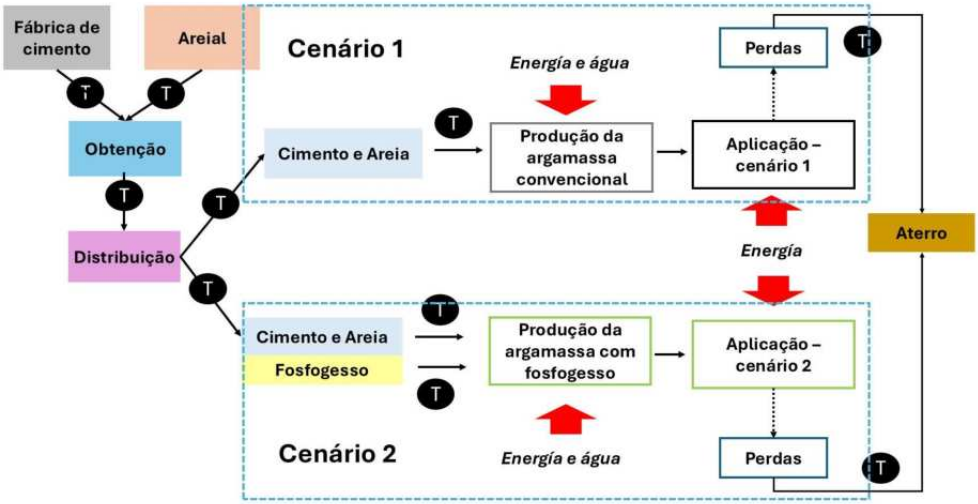
Fonte: Autores (2025)

3 MÉTODOS

3.1 OBJETIVO E ESCOPO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada conforme as normas ISO 14040 (ISO 14040:2006/A1:2021, 2022) e ISO 14044 (ISO 14044:2006/A2, 2021), considerando os processos de obtenção, distribuição, produção, aplicação e gerenciamento de resíduos. A Unidade Funcional adotada foi 1 metro cúbico de argamassa, com os limites do sistema definidos conforme a **Figura 2**. A avaliação dos impactos ambientais envolveu dez categorias, conforme as normas EN 15804 + A2 (EN15804:2012+A2:2020/AC, 2021) e EN 16908 + A1 (EN 16908:2019 +A1, 2022): Potencial de Aquecimento Global (PAG), Acidificação (PA), Eutrofização (PE), Criação de Ozônio Fotoquímico (PCOF), Depleção de Recursos Abióticos (DRA), Ecotoxicidade Aquática em Água Doce (PEAAD), Toxicidade Humana (PTH), Ecotoxicidade Terrestre (PET) e Depleção da Camada de Ozônio (PDCO). A análise foi realizada utilizando o método CML-IA (Cml - Department of Industrial Ecology/ Leiden University, 2016)

Figura 2: Limite do sistema da produção de argamassas com fosfogesso



Fonte: Autores (2025)

3.2 INVENTÁRIO

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) das argamassas foi organizado em duas partes: inventário de materiais e o inventário de transporte, como pode ser visto na Figura 3, Tabela 1 e Tabela 2.

Figura 3: Inventário de materiais e transporte

O inventário de materiais combinou dados primários calculados teoricamente com dados secundários da literatura, enquanto o inventário de transporte usou apenas dados secundários, considerando transporte rodoviário por caminhões Euro 3.

Traço 1:3 (cimento e areia), relação água/cimento de 0,6 e 10% de perda (arquisição) e 10% de desperdício sobre a argamassa total	Densidade da areia de 1600 kg/m³, volume de areia (úmida = 1,07m³), (seca = 0,823m³) e 30% de inchamento da areia

Fonte: Autores (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BALANÇO DE MATERIAIS, ENERGIA E TRANSPORTE

A **Figura 4** apresenta um diagrama de Sankey que mostra os fluxos de materiais e energia no ciclo de vida das argamassas com fosfogesso, incluindo as etapas de obtenção de matérias-primas, distribuição, produção, aplicação e gestão de resíduos. A etapa mais impactante é a obtenção de matérias-primas (35%), seguida da distribuição (29%), produção (24%), aplicação (11%) e gestão de resíduos (1%). Os materiais representam

94,12% do impacto total, enquanto o transporte responde por 4,96%, destacando tanto a importância dos insumos quanto da logística. Para aumentar a sustentabilidade, é fundamental otimizar a extração, a produção e a eficiência logística ao longo do ciclo de vida do produto.

Tabela 1: Inventário de materiais e processos

Processos	Descrição	Unidade	Formulações				
			REF	F5	F10	F15	F20
Obtenção	Cimento Portland CEM I	kg	560	520	480	480	440
	Areia natural	kg	2400	2400	2400	2400	2400
	Fosfogesso	kg	0	26,6	53,21	79,81	106,41
	Transporte cimento – C32t	tkm	155,12	144,04	132,96	132,96	121,88
	Transporte areia - C32t	tkm	45,36	45,36	45,36	45,36	45,36
	Transporte fosfogesso – C16t	tkm	0	10,96	21,92	32,88	43,84
Distribuição	Cimento Portland CEM I	kg	560	520	480	480	440
	Areia natural	kg	2400	2400	2400	2400	2400
	Transporte cimento – C32t	tkm	27,44	25,48	23,52	23,52	21,56
	Transporte areia - C32t	tkm	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
Produção	Cimento Portland CEM I	kg	483,7	459,52	435,33	411,15	386,96
	Areia natural	kg	1316,8	1316,8	1316,8	1316,8	1316,8
	Fosfogesso	kg	0	24,19	48,37	72,56	96,74
	Água	L	290	290	290	290	290
	Eletricidade, betoneira	kWh	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Aplicação	Argamassa	kg	1800	1800	1800	1800	1800
	Eletricidade, elevador cremalheira	kWh)	11	11	11	11	11
Gestão de resíduos	Resíduo de argamassa	kg	180	180	180	180	180
	Diesel (Escavadeira hidráulica	L	0,01096	0,01096	0,01096	0,01096	0,01096
	Transporte de resíduo - C32t	tkm	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7

Fonte: Autores (2025)

Tabela 2: Inventário de transporte

Materiais	Origem	D1 (km)	Meio de transporte	Distribuidor/ Depósito	D2 (km)	Meio de transporte	Obra	D3 (km)	Meio de transporte
Cimento	ITJ	277	C32t	ITP	259	C16t	-	-	
areia	BBT	18,9	C32t	BBH	217	C16t	-	-	
Fosfogesso	-			MF	421	C16t			
Resíduo de argamassas	-			-	-		PSDR	115	C32t

ITJ – Intercement, Ijací, MG; BBT – Brasmic, Betim, MG; ITP – Intercement, Pedro Leopoldo, MG; BBH – Brasmic, Belo Horizonte, MG; MF – Moisac Fertilizante, Uberaba, MG; PSDR – Preitura de São João Del- Rei

Fonte: Autores (2025)

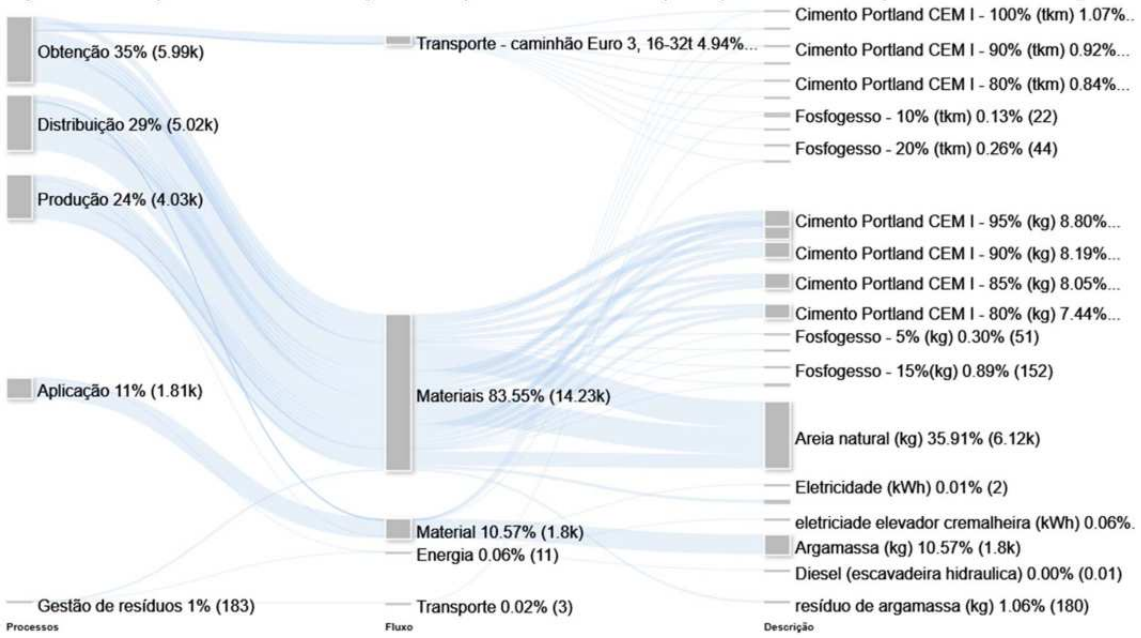
4.2 AVALIAÇÃO DO POTENCAL DE AQUECIMENTO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.

A **Tabela 3** sintetiza a contribuição de cada etapa do ciclo de vida da argamassa com fosfogesso para o Potencial de Aquecimento Global (PAG), que mede o impacto das emissões de gases de efeito estufa — especialmente CO_2, mas também CH_4 e N_2O — expressas em equivalente de CO_2 ao longo de 100 anos (Almeida *et al.,* 2021). Por ser um dos impactos ambientais mais estudados na produção de materiais cimentícios (Hadj Sadok *et al.,* 2022; LI *et al.,* 2023; Los Santos-Ortega; Fraile-García; Ferreiro-Cabello, 2025), o estudo se concentra nas emissões de CO_2 (Stafford e*t al.,* 2016)

Os maiores responsáveis pelas emissões são os processos de obtenção e distribuição do cimento, influenciados pelas longas distâncias percorridas e pelo tipo de caminhão utilizado (D1 e D2), conforme Tabela 2. Além disso, a distribuição da areia gerou mais emissões do que sua extração. As emissões associadas ao fosfogesso variaram entre 4,15E+00 $kgCO_2eq/m^3$ e 1,66E+01 $kgCO_2eq/m^3$, sendo

relativamente baixas devido à pequena quantidade transportada, apesar dos 421 km de distância. O transporte rodoviário é um fator crítico no PAG no Brasil (Calderón-Morales *et al.*, 2024).

Figura 4: Balanços de materiais, energia e transporte relacionados à produção de 1m³ de argamassas com fosfogesso



Fonte: Autores (2025)

A produção das argamassas foi o segundo maior responsável pelas emissões, envolvendo materiais e energia elétrica. No entanto, a substituição parcial do cimento por fosfogesso reduz o PAG, pois este resíduo não requer processos intensivos em energia (Bouargane *et al.,* 2023; Sahmenko *et al.,* 2024) e contribui para a valorização de resíduos industriais (Calderón-Morales *et al.*, 2021).

A aplicação das argamassas, incluindo transporte vertical e consumo de eletricidade (fator de emissão de 3,63E-02 $kgCO_2/kWh$, compatível com (Dong *et al.,* 2024), foi o terceiro maior emissor. Já a gestão de resíduos apresentou o menor impacto, com mínimas emissões de CO_2, indicando reduzida influência ambiental nessa fase.

1.1 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS POR CATEGORIA.

A **Tabela 4** apresenta os resultados das categorias de impacto ambiental obtidos pelo método CML-IA (CML - DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ECOLOGY/ LEIDEN UNIVERSITY, 2016), destacando o Potencial de Aquecimento Global (PAG) como a categoria com maior contribuição, representando mais de 90% do impacto total (**Figura 5**). Na produção de 1 m³ de argamassa, a formulação de referência (REF) emitiu 4,31E+02 $kgCO_2eq/m^3$, enquanto as argamassas com fosfogesso (F5, F10, F15 e F20) apresentaram redução proporcional ao aumento da substituição do cimento.

A argamassa F20 obteve uma redução de até 18,71% no PAG em comparação à REF. Essa redução está associada à menor utilização de cimento, que é identificado como o principal responsável pelas emissões de CO_2 nas argamassas cimentícias (Jiménez *et al.*, 2015; Kurad *et al.,* 2017). A segunda categoria mais relevante foi o Potencial de Toxicidade Humana (PTH), com valor de 1,86E+02 kg 1,4-DCB-eq/m³ para a argamassa REF, seguido por F5, F10, F15 e F20. A F20 registrou uma redução de 15,56% no PTH. Apesar de o fosfogesso ser um resíduo naturalmente radioativo, o fosfogesso brasileiro apresenta baixa concentração de metais pesados e radioisótopos (Calderón-Morales et al., 2021). Além disso, quando incorporado a matrizes cimentícias, suas substâncias tóxicas são estabilizadas ou imobilizadas (Niu et al., 2018; Wu et al., 2022), diminuindo riscos à saúde humana (Campos *et al.*, 2017).

O terceiro maior impacto refere-se ao Potencial de Ecotoxicidade Aquática em Água Doce (PEAAD), relacionado ao risco de contaminação de corpos d'água por substâncias presentes no fosfogesso, especialmente por meio de lixiviação e deposição atmosférica (Wu, 2024). Esse impacto pode ser mitigado com gestão adequada dos estoques de fosfogesso e tratamentos que reduzam sua solubilidade, limitando a

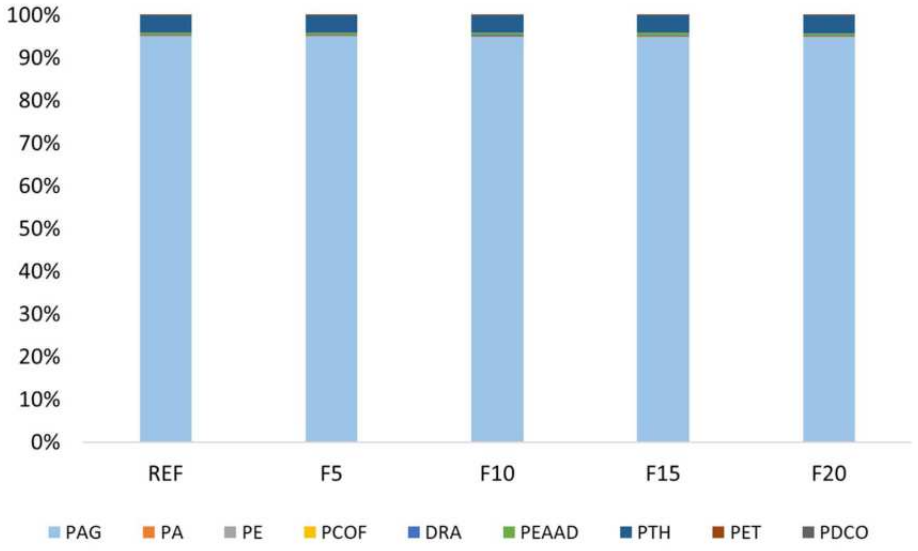
liberação de metais pesados (Ammar *et al.,* 2013). As demais categorias de impacto não apresentaram valores significativos na análise realizada.

Tabela 3: Emissões de CO_2 por tipo de processo ($KgCO_2$ eq/m³)

Process	Fluxos	REF	F5	F10	F15	F20
Obtenção de cimento	Cimento Portland CPV - ARI	4,67E+02	4,33E+02	4,00E+02	4,00E+02	3,67E+02
	Caminhão, Euro 3 - 32t	2,58E+01	2,40E+01	2,21E+01	2,21E+01	2,03E+01
	Total	**4,92E+02**	**4,57E+02**	**4,22E+02**	**4,22E+02**	**3,87E+02**
Obtenção de areia	Areia natural	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01
	Caminhão, Euro 3 - 32t	7,54E+00	7,54E+00	7,54E+00	7,54E+00	7,54E+00
	Total	**5,80E+01**	**5,80E+01**	**5,80E+01**	**5,80E+01**	**5,80E+01**
Distribuição de cimento	Cimento Portland CPV - ARI	4,67E+02	4,33E+02	4,00E+02	4,00E+02	3,67E+02
	Caminhão, Euro 3 - 16t	5,37E+01	4,99E+01	4,60E+01	4,60E+01	4,22E+01
	Total	**5,20E+02**	**4,83E+02**	**4,46E+02**	**4,46E+02**	**4,09E+02**
Distribuição de areia	Areia natural	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01	5,04E+01
	Caminhão, Euro 3 - 16t	1,93E+02	1,93E+02	1,93E+02	1,93E+02	1,93E+02
	Total	**2,43E+02**	**2,43E+02**	**2,43E+02**	**2,43E+02**	**2,43E+02**
Obtenção de resíduo	Fosfogesso	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Caminhão, Euro 3 - 16t	0,00E+00	4,15E+00	8,29E+00	1,24E+01	1,66E+01
	Total	**0,00E+00**	**4,15E+00**	**8,29E+00**	**1,24E+01**	**1,66E+01**
Produção da argamassa	Cimento Portland CPV - ARI	4,03E+02	3,83E+02	3,63E+02	3,43E+02	3,22E+02
	Fosfogesso	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Areia natural	2,77E+01	2,77E+01	2,77E+01	2,77E+01	2,77E+01
	Água	8,61E-02	8,61E-02	8,61E-02	8,61E-02	8,61E-02
	Eletricidade, betoneira	4,95E-03	4,95E-03	4,95E-03	4,95E-03	4,95E-03
	Total	**4,31E+02**	**4,11E+02**	**3,91E+02**	**3,70E+02**	**3,50E+02**
Aplicação da argamassa	Argamassa (1 m³)	3,52E+02	3,52E+02	3,52E+02	3,52E+02	3,52E+02
	Eletricidade, elevador cremalheira	3,63E-02	3,63E-02	3,63E-02	3,63E-02	3,63E-02
	Total	**3,52E+02**	**3,52E+02**	**3,52E+02**	**3,52E+02**	**3,52E+02**
Gerenciamento do resíduo	Resíduo de argamassa	2,67E+00	2,67E+00	2,67E+00	2,67E+00	2,67E+00
	Caminhão, Euro 3 - 32t	3,44E+00	3,44E+00	3,44E+00	3,44E+00	3,44E+00
	Diesel - escavadeira hidráulica	9,97E-04	9,97E-04	9,97E-04	9,97E-04	9,97E-04
	Total	**6,11E+00**	**6,11E+00**	**6,11E+00**	**6,11E+00**	**6,11E+00**

Fonte: Autores (2025)

Figura 5: Resultados de impacto ambiental por categoria para a produção de argamassas com fosfogesso.



Fonte: Autores (2025)

Tabela 4: impacto ambiental da produção de argamassas com fosfogesso por categoria de impacto

Categorias de impacto ambiental	REF	F5	F10	F15	F20
Potencial de Aquecimento Global (kgCO2 eq/m³)	4,31E+02	4,11E+02	3,91E+02	3,70E+02	3,50E+02
Potencial de Acidificação (kgSb eq)	7,11E-01	6,80E-01	6,48E-01	6,17E-01	5,85E-01
Potencial de Eutrofização (kg PO_4^{-3} eq)	9,16E-02	8,75E-02	8,34E-02	7,93E-02	7,52E-02
Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico (kgC_2H_4 eq)	1,67E-02	1,38E-02	1,31E-02	1,24E-02	1,17E-02
Depleção de recursos abióticos (kg Sb eq)	9,31E-01	8,93E-01	8,55E-01	8,18E-01	7,80E-01
Potencial de Ecotoxicidade Aquática em Água Doce (kg 1,4-DCB eq)	2,53E+00	2,44E+00	2,35E+00	2,26E+00	2,16E+00
Potencial de Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB-eq)	1,84E+01	1,77E+01	1,70E+01	1,62E+01	1,55E+01
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (kg 1,4-DCB eq)	5,71E-02	5,44E-02	5,17E-02	4,90E-02	4,63E-02
Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11) eq	1,48E-05	1,42E-05	1,37E-05	1,31E-05	1,26E-05

Fonte: Autores (2025)

2 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os impactos ambientais da produção de argamassas com fosfogesso usando a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados mostraram que substituir parcialmente o cimento por fosfogesso reduz significativamente o Potencial de Aquecimento Global (PAG), alcançando até 18,71% menos emissões de CO_2 na formulação com 20% de fosfogesso (F20) em relação à argamassa de referência (REF).

O transporte foi identificado como o principal responsável pelos impactos (29%), destacando a necessidade de estratégias logísticas mais eficientes. Argamassas com maior teor de fosfogesso também apresentaram menores impactos em toxicidade humana e ecotoxicidade aquática, desde que as impurezas do resíduo estejam bem encapsuladas. A gestão de resíduos teve impacto pouco relevante, enquanto a produção das argamassas foi a segunda maior fonte de emissões, ressaltando a importância de ganhos em eficiência energética.

Conclui-se que o uso de fosfogesso como substituto do cimento reduz a extração de recursos naturais e valoriza um resíduo industrial, alinhando-se à economia circular. Recomenda-se que estudos futuros explorem a otimização do transporte e avaliem o desempenho mecânico a longo prazo, para consolidar essa alternativa como uma solução técnica e ambientalmente eficiente.

3 REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, M.; HAVUKAINEN, J.; HORTTANAINEN, M. How environmentally sustainable are fibre reinforced alkali-activated concretes? **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117601, 2019. Disponível em: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.076

AGRAWAL, R.; BHAGIA, S.; SATLEWAL, A.; RAGAUSKAS, A. J. Urban mining from biomass, brine, sewage sludge, phosphogypsum and e-waste for reducing the environmental pollution: Current status of availability, potential, and technologies with a focus on LCA and TEA. **Environmental Research**, v. 224, n. February, p. 115523, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115523

ALMEIDA, J.; FARIA, P.; RIBEIRO, A. B.; SILVA, A. S. Life cycle assessment of mortars produced partially replacing cement by treated mining residues. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 17, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app11177947

AMMAR, R.; EL SAMRANI, A. G.; KAZPARD, V.; BASSIL, J.; LARTIGES, B.; SAAD, Z.; CHOU, L. Applying physicochemical approaches to control phosphogypsum heavy metal releases in aquatic environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 12, p. 9014–9025, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-013-1875-7

BENACHIO, G. L. F.; FREITAS, M. do C. D.; TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121046, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046

BOUARGANE, B.; LAABOUBI, K.; BIYOUNE, M. G.; BAKIZ, B.; ATBIR, A. **Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment**. *[S. l.]*: Springer, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10163-023-01617-8

BRAZ, C.; SILVESTRE, D.; BRITO, J. De. Life Cycle Assessment of Mortars with Incorporation of Industrial Wastes. **Fibers**, v. 7, p. 59,

2019.

CALDERÓN-MORALES, B. R. S.; COSTAL, G. Z.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A.; PINEDA, P.; BORBA JÚNIOR, J. C.; SILVA, G. J. B.; GERALDO, V.; MENDES, L. A.; GARCÍA-TENÓRIO, R. Environmental and technical assessment on the application of slate waste in Portland-composite cement CEM II. **Journal of Building Engineering**, v. 95, n. January, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110044

CALDERÓN-MORALES, B. R. S.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A.; PINEDA, P.; GARCÍA-TENÓRIO, R. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: Limits and potential in eco-efficient construction. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. January, p. 32, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102506

CAMPOS, M. P. P.; COSTA, L. J. P. J. P.; NISTI, M. B. B.; MAZZILLI, B. P. P. Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 172, p. 232–236, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.04.002. Acesso em: 5 abr. 2020.

CÁNOVAS, C. R. *et al.* Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 678–690, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.293. Acesso em: 7 maio. 2019.

CAO, Y.; WANG, Y.; ZHANG, Z.; MA, Y.; WANG, H. Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials. **Composites Part B: Engineering**, Centre for Future Materials, University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD 4350, Australia, v. 211, p. 108636, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108636. Acesso em: 15 ago. 2021.

CHEN, L.; LUAN, X.; HAN, F.; ZHAO, Y.; YANG, H.; ZHANG, L.; YIN, Y.; LIU, W.; CUI, Z. Resources , Conservation & Recycling Life cycle environmental and economic assessment of Phosphogypsum utilization in China. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 212, n. September 2024, p. 107938, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107938

CML - DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ECOLOGY/ LEIDEN UNIVERSITY. CML-IA. **CML-IA Characterisation Factors**, 2016. Disponível em: https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors

COSTA, A. R. D.; MATOS, S. R. C.; CAMARINI, G.; GONÇALVES, J. P. Hydration of sustainable ternary cements containing phosphogypsum. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 28, p. e00280, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2021.E00280. Acesso em: 20 out. 2022.

CUADRI, A. A.; NAVARRO, F. J.; GARCÍA-MORALES, M.; BOLÍVAR, J. P. Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier. **Journal of Hazardous Materials**, v. 279, p. 11–16, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.058. Acesso em: 5 nov. 2020.

DONG, H.; YU, F.; BI, Z.; ZHANG, C.; LIU, X.; GENG, Y.; OHNISHI, S.; LI, H. Life cycle environmental and economic assessment of Tetra Pak recycling technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 202, n. November 2023, p. 107355, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107355

EN 16908:2019 +A1. Cement and building lime - Environmental product declarations - Product category rules complementary to EN 15804. **AENOR (Asociacíon Española de Normalización y Certificación)**, 2022.

EN15804:2012+A2:2020/AC. Sostenibilidad en la construcción Declaraciones ambientales de producto: Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. **AENOR (Asociacíon Española de Normalización y Certificación)**, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Going climate-neutral by 2050 – A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy. **European Commission**, p. 1–20, 2019 a. Disponível em: https://data.europa.eu/doi/10.2834/02074

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Commitee and the Committee of the RegionsThe European Green Deal**. *[S. l.: s. n.]*. Disponível em: https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705(35)2024.ic-03.

FURTADO, F. C. N.; BORILLE, F. de C. de A.; SANTOS, A. de M.; MONTEIRO, E. C. B.; CAMPOS-TAKAKI, G. M. de. Contribution of civil construction in the emission of gases involved with greenhouse effect. **Contribution of civil construction in the emission of gases involved with greenhouse effect**, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.56238/alookdevelopv1-072

GETTU, R.; PILLAI, R. G.; SANTHANAM, M.; RATHNARAJAN, S.; BASAVARAJ, A. S.; RENGARAJU, S.; YUVARAJ, D. Service life and life-cycle assessment of reinforced concrete with fly ash and limestone calcined clay cement. *In*: (B. P.A.M., Org.)2018, **6th International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2018**. : Whittles Publishing Limited, 2018. p. 27–35. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065063877&partnerID=40&md5=177046a1d91baee0c18bed543fb5dd82

GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. **Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast.United Nations Environment Programme**. Paris, France: *[s. n.]*, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1049/et.2022.0103.

HADJ SADOK, R.; BELAS BELARIBI, N.; MAZOUZI, R.; HADJ SADOK, F. Life cycle assessment of cementitious materials based on calcined sediments from Chorfa II dam for low carbon binders as sustainable building materials. **Science of the Total Environment**, v. 826, p. 154077, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154077

HONG, J.; SHEN, G. Q.; FENG, Y.; LAU, W. S. T.; MAO, C. Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 249–259, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023

ISO 14040:2006/A1:2021. Gestión ambiental: Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia - Modificación 1. **AENOR (Asociacíon Española de Normalización y Certificación)**, 2022.

ISO 14044:2006/A2. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines - Amendment 2. **AENOR (Asociacíon Española de Normalización y Certificación)**, 2021.

JIMÉNEZ, C.; BARRA, M.; JOSA, A.; VALLS, S. LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 245–252, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.051

KAMINSKAS, R.; BARAUSKAS, I.; KUBILIUTE, R.; MONSTVILAITE, D. The effect of the pozzolanic activity of different micro-fillers on portland cement hydration. **Ceramics - Silikaty**, Department of Silicate Technology, Chemical Technology Faculty, Kaunas University of

Technology, Radvilenu str. 19, Kaunas, LT-50254, Lithuania, v. 64, n. 2, p. 145–154, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.13168/cs.2020.0003

KURAD, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485–502, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.236

LI, Y.; HAN, D.; WANG, H.; LYU, H.; ZOU, D.; LIU, T. Carbonation curing of mortars produced with reactivated cementitious materials for CO2 sequestration. **Journal of Cleaner Production**, v. 383, n. December 2022, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135501

LOS SANTOS-ORTEGA, J.; FRAILE-GARCÍA, E.; FERREIRO-CABELLO, J. Environmental assessment of the use of ground olive stones in mortars. Reduction of CO2 emissions and production of sustainable mortars for buildings. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 110, n. June 2024, p. 107709, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107709

MALACARNE, C. S.; RUBENS, M.; DANIELI, S.; GONÇALVES, V.; PAULA, A. Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310, n. August, p. 125261, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125261

MEGLIN, R.; KYTZIA, P. S.; HABERT, P. G. Regional environmental-economic assessment of building materials to promote circular economy: comparison of three Swiss cantons. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 181, p. 106247, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106247

MSINJILI, N. S.; VOGLER, N.; STURM, P.; NEUBERT, M.; SCHRÖDER, H.-J.; KÜHNE, H.-C.; HÜNGER, K.-J.; GLUTH, G. J. G. Calcined brick clays and mixed clays as supplementary cementitious materials: Effects on the performance of blended cement mortars. **Construction and Building Materials**, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Division 7.4 Technology of Construction Materials, Unter den Eichen 87, Berlin, 12205, Germany, v. 266, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120990

NBR 16697. Portland cement — Requirements. **Associação Brasileira de Normas Ténicas (ABNT)**, p. 16, 2018.

NIU, M.; LI, G.; WANG, Y.; LI, Q.; HAN, L.; SONG, Z. Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different heavy metals. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 332–343, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.206

RASHAD, A. M. Phosphogypsum as a construction material. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 732–743, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.049

RICCIOTTI, L.; OCCHICONE, A.; FERONE, C.; CIOFFI, R.; ROVIELLO, G. Eco-design of geopolymer-based materials recycling porcelain stoneware wastes: a life cycle assessment study. **Environment, Development and Sustainability**, n. 0123456789, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10668-022-02870-x

ROMERO-HERMIDA, M. I. I.; BORRERO-LÓPEZ, A. M. M.; ALEJANDRE, F. J. J.; FLORES-ALÉS, V.; SANTOS, A.; FRANCO, J. M. M.; ESQUIVIAS, L. Phosphogypsum waste lime as a promising substitute of commercial limes: A rheological approach. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. November 2018, p. 205–216, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.007. Acesso em: 7 maio. 2019.

RUTHERFORD, P. M.; DUDAS, M. J.; SAMEK, R. A. Environmental impacts of phosphogypsum. **Science of The Total Environment**, v. 149, n. 1–2, p. 1–38, 1994. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90002-7. Acesso em: 26 abr. 2019.

SAHMENKO, G.; PUZULE, L.; SAPATA, A.; SLOSBERGS, P.; BUMANIS, G.; SINKA, M.; BAJARE, D. Gypsum–Cement–Pozzolan Composites for 3D Printing: Properties and Life Cycle Assessment. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 6, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/jcs8060212

SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 114, n. March 2017, p. 49–56, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017. Acesso em: 4 jan. 2021.

SHEN, Y.; QIAN, J.; CHAI, J.; FAN, Y. Calcium sulphoaluminate cements made with phosphogypsum: Production issues and material properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 67–74, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.009. Acesso em: 1 jul. 2019.

SPÓSITO, C. C. A.; FAZZAN, J. V.; ROSSIGNOLO, J. A.; D, C. B.; SPÓSITO, F. A.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M. Ecodesign : Approaches for sugarcane bagasse ash mortars a Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135667, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135667

STAFFORD, F. N.; DIAS, A. C.; ARROJA, L.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 159–165, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.110

TSIOKA, M.; VOUDRIAS, E. A. Comparison of alternative management methods for phosphogypsum waste using life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121386, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121386

UTSEV, T.; TIZA, M.; SANI, H. A.; SESUGH, T. Sustainability in the civil engineering and construction industry : A review. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, n. March, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.14744/jscmt.2022.11

WU, F. The treatment of phosphogypsum leachate is more urgent than phosphogypsum. **Environmental Research**, v. 262, n. P1, p. 119849, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119849

WU, F.; HE, M.; QU, G.; ZHANG, T.; REN, Y.; KUANG, L.; NING, P.; LI, J.; LIU, Y. Highly targeted stabilization and release behavior of hazardous substances in phosphogypsum. **Minerals Engineering**, v. 189, n. October, p. 107866, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107866

ZULCÃO, R.; CALMON, J. L.; REBELLO, T. A.; VIEIRA, D. R.; LUIZ, J.; AYRES, T.; RODRIGUES, D. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119523, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119523