AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM CIMENTO LC³ MODIFICADO COM CINZA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF LC³ CEMENT MODIFIED WITH ASH FROM WATER TREATMENT SLUDGE

Tacila Bertulino [1]; Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira [2]; Marcos David dos Santos [3]; Antônio Acácio de Melo Neto [4].

[1]Doutoranda | tacila.berturlino@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [2]Mestranda | cartaxo.braga@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [3]Doutorando | marcos.david@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [4]Doutor | antonio.meloneto@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil

Resumo:
A economia circular surge como estratégia essencial diante da crise climática, contribuindo para mitigar impactos ambientais e apoiar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nesse contexto, a indústria do cimento busca reduzir o teor de clínquer por meio da incorporação de materiais cimentícios suplementares. Este estudo avalia a sustentabilidade ambiental de um cimento LC³ modificado (LC³⁺), no qual parte da argila calcinada é substituída por cinza de lodo de Estação de Tratamento de Água (CLETA). Diante das elevadas emissões de CO_2 na produção de cimento Portland, a aplicação de resíduos calcinados se apresenta como alternativa estratégica. Para quantificar os impactos da nova formulação, foi realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do tipo “creadle-to-gate”, com apoio do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). Os resultados apontam reduções de 35% nas emissões de CO_2 e de 32% na demanda de energia primária em relação ao CPV. A inclusão do CLETA contribui para a valorização de resíduos, conservação de recursos e redução da pegada de carbono. Dessa forma, o LC³⁺ com lodo calcinado configura-se como solução promissora alinhada à economia circular na construção civil.

Palavras-chave:
Avaliação do Ciclo de Vida; LC³⁺; Economia circular; Cimento ecoeficiente; CLETA.

Abstract:
Circular economy emerges as an essential strategy in the face of the climate crisis, helping to mitigate environmental impacts and support the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs). In this context, the cement industry aims to reduce clinker content by incorporating supplementary cementitious materials. This study evaluates the environmental sustainability of a modified LC³ cement (LC³⁺), in which part of the calcined clay is replaced by sludge ash from Water Treatment Plants (CLETA). Given the high CO_2 emissions from Portland cement production, the use of calcined waste emerges as a strategic alternative. To quantify the impacts of the new formulation, a creadle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) was conducted, supported by the Construction Environmental Performance Information System (Sidac). The results show a 35% reduction in CO_2 emissions and a 32% reduction in primary energy demand compared to CPV. The inclusion of CLETA contributes to waste valorization, resource conservation, and carbon footprint reduction. Thus, LC³⁺ with calcined sludge stands as a promising solution aligned with the circular economy in the construction industry.

Keywords:
Life Cycle Assessment; LC³⁺; Circular economy; Eco-efficient cement; CLETA.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é uma das maiores emissoras de CO_2 do setor industrial, com emissões globais estimadas em cerca de 2,4 Gt por ano (IEA, 2020). A produção de uma tonelada de cimento libera entre 0,5 e 0,6 toneladas de CO_2 (Plaza, Martínez, Rubiera, 2020). O crescimento populacional global, projetado para 9,8 bilhões até 2050, tende a elevar a demanda por recursos naturais e impulsionar a expansão urbana (Colebatch, 2018; United Nations, 2017), impactando diretamente a construção civil. Estima-se um aumento de 2,5 vezes na produção mundial de cimento entre 2005 e 2050 (Maskuriy *et al.*, 2019). O setor é responsável por 5 a 8% das emissões antropogênicas de CO_2 e cerca de 35% das industriais globais (IEA, 2015; Izrael *et al.*, 2007). A principal fonte dessas emissões é a produção de clínquer, que envolve a calcinação de calcário e argila a cerca de 1450 °C. A reação crítica ocorre entre 700 e 800 °C, quando o calcário se decompõe ($CaCO_3$ à $CaO+CO_2$), sendo responsável por aproximadamente 60% das emissões totais. Os 40% restantes provêm da queima de combustíveis fósseis (Briki, 2022).

Para mitigar esses impactos, a indústria do cimento busca estratégias sustentáveis, como substituição de combustíveis fósseis, captura de carbono, novos clínqueres e ligantes geopoliméricos (CEMBUREAU, 2013; SNIC, 2019). Ganha força o uso de resíduos industriais e subprodutos como os materiais cimentícios suplementares (MCS) (Scrivener *et al.*, 2018). No Brasil, a produção de cimento subiu de 18,7 para 38,8 milhões de toneladas, acompanhada por aumento no uso de pozolanas, de 93,2 para 715 mil toneladas (WBCSD, 2016). Escória e cinzas volantes, MCS tradicionais, são amplamente usados, mas sua disponibilidade é limitada (Snellings, 2016; WBCSD, 2016).

Misturas ternárias como o *Limestone Calcined Clay Cement* (LC³), com 30% de argila calcinada e 15% de calcário, podem reduzir em até 50% o uso de cimento Portland e cortar 30 a 40% das emissões de CO_2, mantendo ou melhorando o desempenho mecânico e a durabilidade (Antoni, 2013; Sánchez Berriel *et al.*, 2016; Scrivener *et al.*, 2018; Scrivener, 2014). O cimento LC^3 permite a substituição do clínquer sem comprometer o desempenho mecânico do material já a partir de 7 dias de cura (Antoni, 2013; Scrivener *et al.*, 2018). Além de apresentar melhor resistência à penetração de cloretos e à reação álcali-agregado (RAA), o LC³ contribui substancialmente para a redução da pegada de carbono, tornando-se uma alternativa atrativa para a indústria cimenteira. O material pode ser produzido com a mesma infraestrutura e competências técnicas empregadas na fabricação do cimento Portland convencional, sem necessidade de alterações significativas no processo produtivo (Zunino, 2020), e sua aplicação está alinhada a seis dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, reforçando o compromisso com práticas mais sustentáveis no setor (LC^3, 2023; Sánchez Berriel *et al.*, 2016). Contudo, a viabilidade técnica do LC³ depende diretamente da qualidade das argilas utilizadas, preferencialmente com teores mínimos de 40% de caulinita (Antoni, 2013; Avet, 2017), o que restringe seu uso a regiões com disponibilidade mineralógica adequada.

Paralelamente, cresce a demanda global por água, com estimativas de aumento de 20 a 30% até 2050, alcançando de 5.500 a 6.000 km³ anuais (Burek *et al.*, 2016), o que gera cerca de 100.000 toneladas de lodo por estações de tratamento de água (ETA) (Ahmad, Ahmad, Alam, 2016). O uso desse lodo na indústria cimenteira surge como solução sustentável, alinhada à economia circular (Snellings, 2016). A composição do lodo das ETA (LETA) é caracterizada pela presença de Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2, elementos essenciais em minerais argilosos (Ahmad *et al.*, 2016; Pinheiro; Estevão; Souza, 2014). Além desses componentes, o LETA contém substâncias orgânicas e inorgânicas, como partículas de areia e argila, matéria orgânica e coagulantes, como sais de alumínio e íons férricos, utilizados no processo de tratamento (Sales, Souza, Almeida, 2011). A presença desses constituintes-chave, comuns tanto no cimento Portland quanto em materiais pozolânicos, destaca o potencial do lodo de ETA para ser integrado como MCS no desenvolvimento de cimentos ecoeficientes, como o LC³ (Hagemann *et al.*, 2019). Além de estar alinhado a oito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS: 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15 e 17).

A redução do clínquer é uma estratégia eficaz para mitigar os impactos ambientais, sobretudo com MCS provenientes de resíduos (Dahanni *et al.*, 2024). Para avaliar os benefícios dessas alternativas, destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que quantifica os impactos em todas as etapas produtivas (ABNT, 2009; Hellweg, Canals, 2014) Essa ferramenta tem sido amplamente usada na construção civil para identificar pontos críticos e apoiar decisões sustentáveis (Luca *et al.*, 2023; Vieira *et al.*, 2023).

Para avaliar a sustentabilidade da nova mistura LC³ formulada com cinza do lodo de estação de tratamento de água (LC^{3+}), foi conduzida uma Avaliação do Ciclo de Vida, considerando todas as etapas, desde a extração das matérias-primas até a produção do cimento como produto final. A avaliação foi realizada por meio do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac), que permitiu calcular os indicadores de demanda de energia primária e emissão de CO_2, comparando o desempenho ambiental do LC^{3+} com o do cimento convencional.

2. MÉTODOS

Para atingir os objetivos deste projeto, serão analisados dois tipos de cimento. O primeiro é o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), equivalente ao Tipo III da norma ASTM, utilizado como referência. O segundo é o cimento LC^{3+}, formulado com 51% de cimento, 30% de CLETA em substituição à argila calcinada, 15% de calcário e 4% de gesso, visando à produção de um material mais sustentável e com menor pegada de carbono. A Tabela 1 apresenta a caracterização química e física dos materiais utilizados no estudo, incluindo os principais óxidos identificados por fluorescência de raios X e propriedades físicas relevantes como a área específica (método de Blaine), o tamanho médio das partículas (d_{50}), o volume médio ($D_{4,3}$) determinado por granulometria a laser e a massa específica dos materiais analisados.

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	P. F.
CPV (%)	15,58	4,74	2,67	60,14	1,62	5,06	1,32	0,19	0,67	7,46
CLETA	40,55	40,20	12,21	0,25	0,25	0,15	0,33	0,18	0,29	4,55
Calcário	1,25	0,61	0,30	44,25	8,50	0,18	0,09	N.D.	0,04	44,56
Sulfato	0,23	0,13	0,03	35,11	0,05	42,97	N.D.	N.D.	0,02	21,29

Física	Massa especifica (g/cm³)	BET(m²/g)	Blaine (m²/kg)	D_{50} (µm)	$D_{4,3}$ (µm)
CPV (%)	3,08	1,35	453,00	16,05	22,38
CLETA	2,73	51,95	1990,20	27,46	36,54
Calcário	2,74	-	331,68	45,95	100,25
Sulfato*	2,27	-	507,19	29,64	113,14

* Sulfato de cálcio bi-hidratado

Tabela 1: Caracterização química e física dos materiais.
Fonte: os autores (2025).

O lodo empregado neste estudo foi obtido na Estação de Tratamento de Água de Pirapama, situada em Recife, Pernambuco, a maior do estado, localizada na Região Metropolitana do Recife (RMR), com capacidade de 5,13 m³/s e produção diária de cerca de 93 toneladas de lodo, sendo aproximadamente 90% oriundo do processo de decantação. A amostra foi coletada ainda em estado líquido na lagoa de estabilização, deixada para secagem ao ar livre por sete dias, e posteriormente levada a uma estufa a 100 °C por 24 horas. Após esse pré-tratamento, o material foi calcinado em forno elétrico Linn High Therm KK 260, com aquecimento a uma taxa de 10 °C/min até 700 °C, mantido por 180 minutos e resfriado naturalmente. Por fim, a cinza obtida foi moída em moinho de bolas por uma hora para garantir homogeneidade e potencializar sua reatividade.

2.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A avaliação dos impactos ambientais foi conduzida segundo a abordagem do berço ao portão (*creadle-to-gate*), em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2014, 2009).

O estudo focalizou a produção de uma tonelada de clínquer, inserindo no inventário apenas dados extraídos de fontes científicas reconhecidas. Todas as simulações foram realizadas no SIDAC, versão 1.0, que disponibiliza um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) completo e permite quantificar categorias de impacto como demanda de energia primária e emissões de CO_2.

Os dados de consumo de energia, combustíveis e matérias-primas foram obtidos no Relatório de Coleta de Dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, elaborado no âmbito do projeto Sustainable Recycling Industries SRI (Belizario-Silva, Oliveira e John, 2022), com base em informações de seis fabricantes responsáveis por cerca de 70% da produção nacional de clínquer. As mesmas fontes forneceram os parâmetros para moagem e mistura dos insumos, como calcário, gipsita e fosfogesso.

O transporte dos materiais foi modelado considerando carretas de cinco eixos em rotas de 100 a 500 km, apenas ida, exceto para o coque, cujo transporte em seu país de origem não foi contabilizado. Para os demais insumos, considerou-se ida e volta. No caso do LETA, a distância média foi estimada com base nas localizações das fábricas de cimento (ABCP, 2023) e os dados sobre as ETAs, fornecidos pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2022), responsável pelo abastecimento da região, excetuando-se a unidade de Fernando de Noronha. As distâncias foram obtidas via Google Maps. Lacunas foram preenchidas com dados do banco GNR (GCCA, 2021). A Figura 1 apresenta a localização das principais fábricas de cimento e das ETAs que abastecem a RMR.

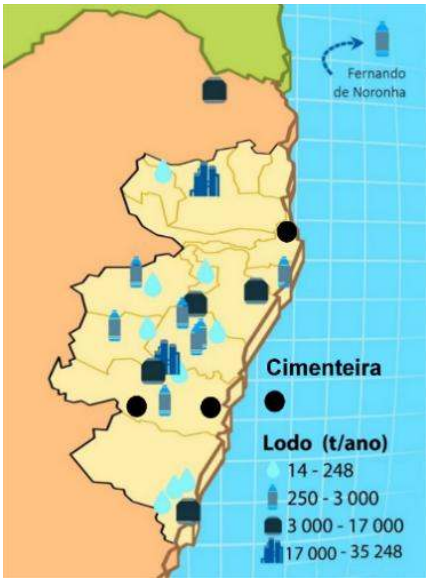


Figura 1: distribuição geográfica das fábricas de cimento e volumes anuais de geração de lodo nas Estações de Tratamento de Água da Região Metropolitana do Recife.
Fonte: os autores (2025), com base em dados da Compesa (2022) e da ABCP (2023).

2.2. ESCOPO E FRONTEIRAS DO SISTEMA

Este estudo avalia os efeitos ambientais da substituição total da argila calcinada pela CLETA e calcário na produção do cimento LC^{3+} em comparação com o cimento de referência CPV. As etapas consideradas incluem: extração, homogeneização, moagem, transporte e calcinação do clinquer. O estudo não abrange o uso final, descarte ou reciclagem do cimento.

A produção de clínquer envolve a moagem e homogeneização de calcário, argila e aditivos, seguida da calcinação em fornos rotativos a 1.400–1.500 °C, no processo seco. Cerca de 50% das unidades utilizam pré-aquecedor e pré-calcinador para melhorar a eficiência térmica. A principal fonte de energia é o coque de petróleo, com 14% oriundos do coprocessamento de resíduos (GCCA, 2021). As emissões de CO_2 resultam da queima dos combustíveis e da descarbonatação do calcário. O clínquer é então resfriado e armazenado. Fluxos de água para resfriamento e controle de emissões foram desconsiderados por não estarem disponíveis no SIDAC v1.0.

Na etapa de moagem final, o CPV ARI é composto por clínquer, sulfato de cálcio e fíler calcário (ABNT, 2018). No LC³+, o clínquer é combinado com CLETA (substituindo a argila calcinada), fíler calcário e sulfato de cálcio. Como o SIDAC não possui dados específicos para a CLETA, utilizaram-se os parâmetros da argila calcinada (700 °C), dada a similaridade de composição e processo. A mistura final é moída e estocada para comercialização. A Figura 2 ilustra as operações consideradas, e a Tabela 2 apresenta o inventário elementar dos processos.

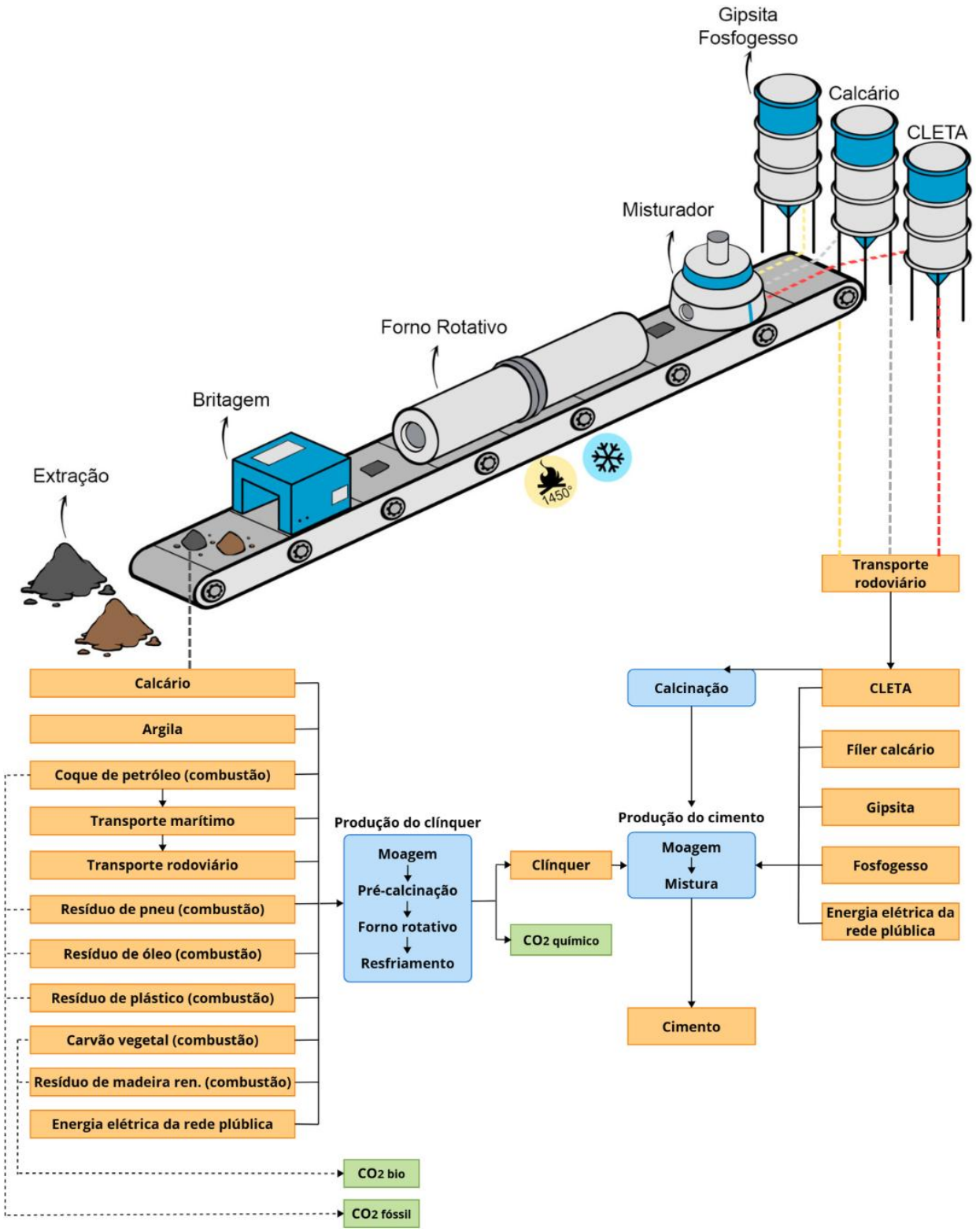


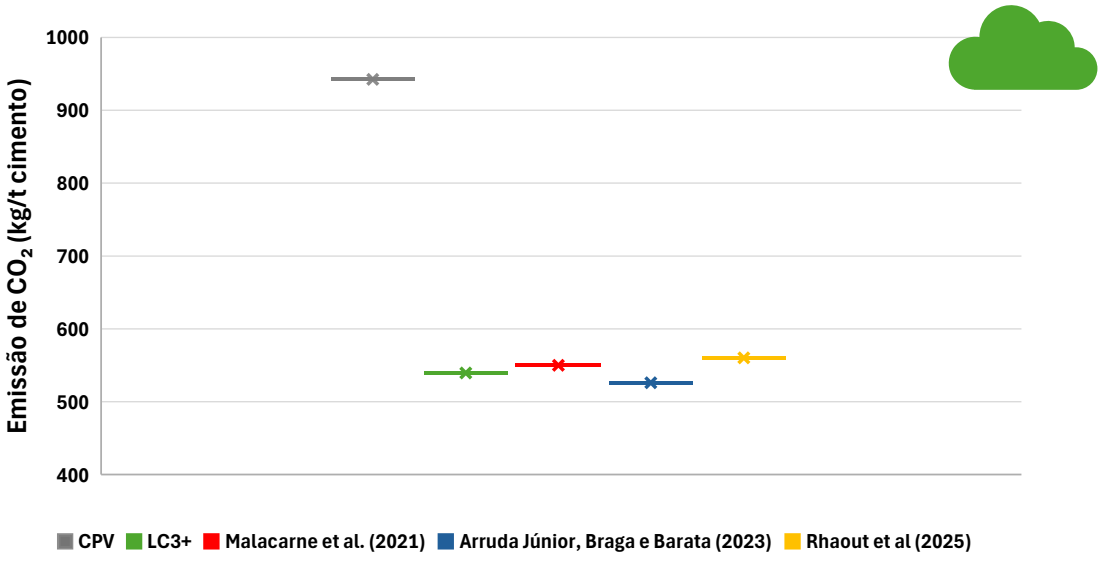
Figura 2: esquema do projeto de ACV, destacando as diferentes etapas no processo de produção dos cimentos.
Fonte: os autores (2025), com base na metodologia do Belizario-Silva, Oliveira e John (2022).

	Fluxo	Unid.	Fluxos de inventário				Transporte	
			CPV		LC^{3+}			
			Qtde. (média)	Desvio padrão	Qtde. (média)	Desvio padrão	Dist. média (km)	Desvio padrão
Entradas	Calcário processado	kg	1435,50	66,30	739,50	34,20		
	Argila processada	kg	118,80	44,60	61,20	22,90		
	Coque de petróleo (combustão)	kg	88,11	9,90	45,39	5,10	300	115
	Transporte marítimo	t·km	792,00	195,00	408,50	100,50		
	Resíduo de pneu (combustão)	kg	10,90	5,70	5,60	3,00		
	Resíduo de óleo (combustão)	kg	6,10	7,60	3,20	3,90		
	Resíduo de plástico (combustão)	kg	4,80	4,60	2,40	2,40		
	Carvão vegetal renovável (combustão)	kg	8,10	17,80	4,20	9,20		
	Resíduo de madeira ren. (combustão)	kg	5,70	5,10	3,00	2,70		
	Gipsita processada	kg	12,00	0,00	12,00	0,00	2883	0
	Fosfogesso	kg	28,00	0,00	28,00	0,00	1386	608
	Fíler calcário	kg	10,00	5,80	150,00	83,80	258	126
	CLETA	kg	-	-	300,00	90,90	105	48
	Eletricidade da rede pública	kWh	127,20	15,60	90,30	9,97		
	CO_2 químico	kg	558,40	20,80	287,60	10,70		
	Clínquer produzido	kg	990,00		510,00	–		
	Cimento	t	1,00		1,00	–		

Tabela 2: inventário do processo elementar de produção do cimento CPV e do LC^{3+}.
Fonte: os autores (2025), com base na metodologia do Belizario-Silva, Oliveira e John (2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3a apresenta os resultados de emissões de CO_2 para a produção de 1 tonelada de cimento, enquanto a Figura 3b ilustra a demanda de energia primária. Foram incluídos, além dos dados obtidos para o CPV e LC^{3+} deste estudo, valores de emissões de CO_2 referentes à produção de LC^3 reportados por outros autores, de modo a possibilitar uma comparação mais ampla.



(a)

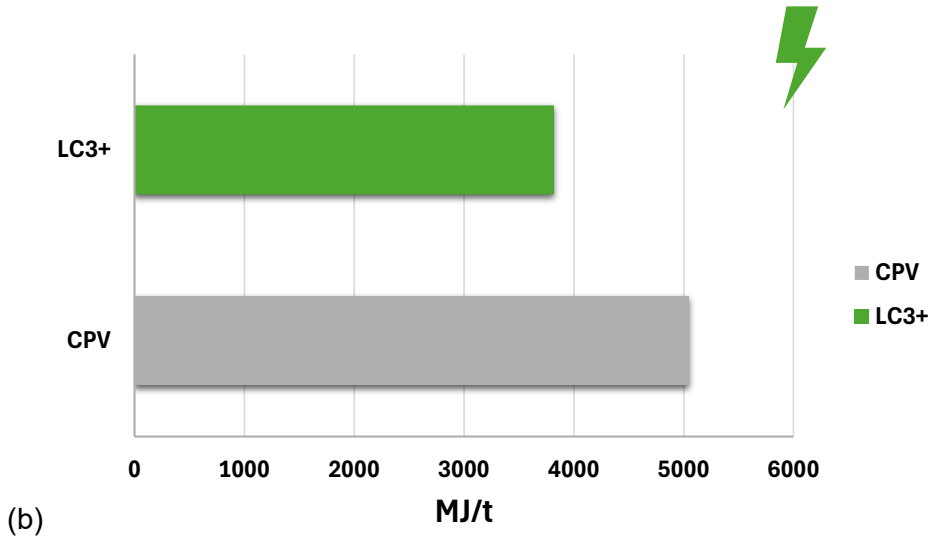


Figura 3: indicadores de (a) emissão de CO_2 e de (b) demanda de energia primária do cimento CPV e LC^{3+}.
Fonte: os autores (2025).

O cimento convencional (CPV) apresentou emissões de aproximadamente 942 kg CO_2/t de cimento, enquanto o cimento LC^{3+} emitiu cerca de 539 kg CO_2/t, resultando em uma redução de 35,1% nas emissões. Segundo Rhaouti *et al.* (2025), o consumo de combustível, a queima de clínquer e o uso de eletricidade estão diretamente relacionados à operação do forno na produção de clínquer. Assim, quanto maior o teor de clínquer, maiores tendem a ser os impactos ambientais associados a esses processos. Isso justifica a maior pontuação ambiental do CPV em comparação aos demais cimentos, devido ao seu elevado teor de clínquer.

A redução observada neste estudo está em conformidade com a faixa reportada na literatura para cimentos do tipo LC^3, cujas emissões são entre 30% e 40% menores que as do cimento Portland convencional (Arruda Junior, Braga, Barata, 2023; Malacarne *et al.*, 2021; Scrivener *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2024). O resultado também se aproxima dos 35,06% de redução relatados por Arruda Junior, Braga e Brata (2023), ao utilizarem argila proveniente da região Amazônica do Brasil. As emissões associadas à produção da argila variam entre 66 e 184 kg CO_2/t de cimento, conforme o teor de caulinita presente na matéria-prima (Malacarne *et al.*, 2021). Em comparação, os índices de emissão para cimentos convencionais situam-se entre 632 e 950 kg CO_2/t (Petroche, Ramirez, 2022), enquanto o LC^{3+} emite cerca de 526 e 560 kg CO_2/t de cimento (Arruda Junior, Braga, Barata, 2023; Malacarne *et al.*, 2021; Rhaouti *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2024). Essa comparação reforça o potencial do LC^3 como uma alternativa ambientalmente mais eficiente.

Esse panorama posiciona o cimento produzido com CLETA dentro da faixa típica dos cimentos LC^3, com o benefício adicional de emissões ligeiramente inferiores em alguns casos (Figura 3a). No entanto, é importante observar que a base de dados da SIDAC ainda não contempla informações específicas sobre as emissões do CLETA, o que limita a extrapolação direta dos dados. Além disso, ao considerar o uso de argila, devem-se levar em conta os impactos ambientais associados à sua extração, como a destruição da vegetação, perda de recursos hídricos e erosão do solo (Li *et al.*, 2015). Nesse contexto, o uso do CLETA evita os impactos da extração de matérias-primas e pode contar com ETAs próximas, neste estudo, foram identificadas unidades a menos de 8 km, o que reduz emissões com transporte e reforça seu potencial como MCS sustentável.

Em relação a Figura 3b, foi verificado uma redução de 32,55% da demanda energética primária quando substituído 45% do clinquer, ou seja, a energia total extraída da natureza antes de qualquer conversão, incluindo fontes como solar, eólica, hidráulica, geotérmica e combustíveis. A CLETA tem se mostrado uma alternativa promissora para substituição da argila calcinada no LC^3, especialmente por evitar as perdas de massa associadas à calcinação de argilas com alto teor de caulinita, que demandam maior quantidade de material in natura (Malacarne *et al.*, 2021).

4. CONCLUSÕES

A partir da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da nova formulação LC^{3+}, que incorpora cinza do lodo de estação de tratamento de água CLETA) como substituo da argila calcinada, foi possível identificar os benefícios ambientais associados à sua produção. A substituição de 45% do clínquer pelo CLETA resultou em uma redução de 35,1% nas emissões de CO_2 e de aproximadamente 32,55% na demanda energética primária. Esses resultados destacam o potencial do CLETA como material alternativo à argila calcinada no LC^3, contribuindo diretamente para a economia circular ao valorizar um resíduo de difícil disposição, minimizar a extração de recursos naturais e mitigar os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado.

Os dados obtidos posicionam o LC^{3+} formulado com CLETA dentro da faixa de emissões típica dos cimentos LC^3 relatados na literatura, com desempenho ambiental comparável ou até superior em alguns cenários. O uso de resíduos urbanos de origem local e a proximidade geográfica entre ETAs e fábricas de cimento também representam vantagens logísticas e reduções adicionais nas emissões de transporte. Entretanto, é importante reconhecer que a ausência de dados específicos sobre as emissões da produção do CLETA na base de dados do SIDAC exigiu o uso de parâmetros da argila calcinada, o que impõe restrições à generalização dos resultados. Além disso, a avaliação foi baseada em simulações e dados laboratoriais, o que pode não refletir integralmente as condições operacionais escala industrial.

Nesse contexto, recomenda-se que futuras pesquisas avancem com estudos em escala piloto ou industrial, a fim de validar os ganhos ambientais observados e aprofundar a análise por meio de inventários primários do CLETA em diferentes contextos geográficos, incluindo também impactos econômicos e sobre a biodiversidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do coprocessamento 2023 (Ano base 2022).** São Paulo: ABCP, 2023.

AHMAD, T. *et al.* Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 606–611, 2016.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant 's Sludge and its Safe Disposal Options. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 950–955, 2016.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2013.

ARRUDA JUNIOR, E. S.; BRAGA, N. T. S.; BARATA, M. S. Life cycle assessment to produce LC^3 cements with kaolinitic waste from the Amazon region, Brazil. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040 Gestão ambiental** - Avaliação do ciclo de vida-Princípios e estrutura. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário**. ABNT, 2014.

AVET, F. H. **Investigation of the grade of calcined clays used as clinker substitute in Limestone Calcined Clay Cement (LC^3)**. Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2017.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L. A.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**: cimento. São Paulo: SIDAC, 2022.

BRETSCHGER, L. Population Growth and Natural-Resource Scarcity: Long-Run Development under Seemingly Unfavorable Conditions. **The Scandinavian Journal of Economics**, v. 115, p. 722–755, 2013.

BRIKI, Y. **Maximizing the use of supplementary cementitious materials (SCMs) in blended cements**. Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2020.

BUREK, P. *et al.* **Water Futures and Solution Fast Track Initiative-Final Report**. IIASA, 2016.

CEMBUREAU. **The role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy**. Bruxelas: CEMBUREAU, 2013.

COLEBATCH, H. **How population growth is becoming a game changer in infrastructure**. 2018

COMPESA. Abastecimento de Água. 2022.

DAHANNI, H. *et al.* Life cycle assessment of cement: Are existing data and models relevant to assess the cement industry's climate change mitigation strategies? A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 411, 2024.

EL HOUSSEINI, S. **Hydration and durability of fast hardening binders incorporating supplementary cementitious materials**. Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2022.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO_2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126–142, 2015.

GASTALDINI, A. L. G. *et al.* The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 513–520, 2015.

GCCA. **GNR Project** - Reporting CO_2. 2021. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/.

HAGEMANN, S. E. *et al.* Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 916–926, 2019.

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science American Association for the Advancement of Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109-1113, 2014.

HUANG, C. H.; WANG, S. Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174–183, 2013.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology Perspectives 2023**. IEA Available, 2020.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. **Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action**. 2015. Disponível em: http://www.iea.org/t&c/.

IZRAEL, Y. A. *et al.* **The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Working Group II contribution**. Russian Meteorology and Hydrology. **Anais**...set. 2007.

LC^3. **A sustainable alternative for the cement industry**. LC^3 Project ed. Lausanne: 2023.

LI, G. *et al.* Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 279–287, 2015.

LIMA, C. J. F. DE *et al.* Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 161–177, 2022.

LUCA, A. *et al.* Life cycle assessment of a new industrial process for sustainable construction materials. **Ecological Indicators**, v. 148, p. 110042, 2023.

MALACARNE, C. S. *et al.* Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125261, 2021.

MASKURIY, R. *et al.* Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective. **Economies**, v. 7, n. 3, 2019.

MÜLLER, N.; HARNISCH, J. **A blueprint for a climate friendly cement industry**. Germany: WWF, 2008.

PETROCHE, D. M.; RAMIREZ, A. D. The Environmental Profile of Clinker, Cement, and Concrete: A Life Cycle Perspective Study Based on Ecuadorian Data. **Buildings**, v. 12, n. 3, 2022.

PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; SOUZA, D. P. Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha. Parte I: caracterização do lodo. **Revista Matéria**, 2014.

PLAZA, M. G.; MARTÍNEZ, S.; RUBIERA, F. CO_2 capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations. **Energies**, v. 13, n. 21, 2020.

RHAOUTI, Y.; TAHA, Y.; BENZAAZOUA, M. Life cycle assessment and industrial synergy for carbon reduction: A circular economy approach. **Science of the Total Environment**, v. 964, 2025.

RIGON, M. R. *et al.* CO_2 emission assessment for rice husk ash in concrete on environmental approach. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica, v. 14, n. 1, p. 246, 2021.

SALES, A.; DE SOUZA, F. R.; ALMEIDA, F. D. C. R. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2793–2798, 2011.

SÁNCHEZ BERRIEL, S. *et al.* Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 361–369, 2016.

SCHNEIDER, M. *et al.* Sustainable cement production-present and future. Cement and Concrete Research. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.

SCRIVENER, K. *et al.* Calcined clay limestone cements (LC^3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, 2018.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, p. 11–21, 2014.

SHAIKHOUN, S. *et al.* Biodesalination performance of Phormidium keutzingianum concentrated using two methods (immobilization and centrifugation). **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 11, 2022.

SNELLINGS, R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 50–55, 2016.

SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Brasília: SNIC, 2019. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf. Acesso em: 11 mar. 2025.

SOUZA, S. M. C. *et al.* Desempenho Ambiental da produção dos cimentos ternários à base de argila calcinada e resíduos de mármore. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 20, p. 1-12, 2024.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects**: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. New York: Working Paper No. ESA/P/WP/248., 2017.

VIEIRA, A. W. *et al.* Life cycle assessment in the ceramic tile industry: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 3904–3915, 2023.

WBCSD. **Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050**. 2009

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative (CSI) Cement Industry Energy and CO_2 Performance Getting the Numbers Right (GNR)**. Genebra, WBCSD, 2016. Disponível em: https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/12/Cement-Industry-Energy-and-CO_2-Performance-Getting-the-Numbers-Right-GNR.pdf. Acesso em: 11 mar. 2025

ZUNINO, F. A. S. **Limestone calcined clay cements (LC^3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics**. Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2020.