



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Wilson Wanderley da Silva

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL COMPARATIVA DE BLOCOS DE
CONCRETO E CERÂMICOS PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO**

Rio de Janeiro

2025



UFRJ

Wilson Wanderley da Silva

AVALIAÇÃO AMBIENTAL COMPARATIVA DE BLOCOS DE CONCRETO E CERÂMICOS PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Segurança Ambiental

Orientadora: Cláudia do Rosário Vaz Morgado

Coorientador: Victor Paulo Peçanha Esteves

Rio de Janeiro

2025

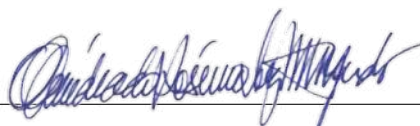
Wilson Wanderley da Silva

AVALIAÇÃO AMBIENTAL COMPARATIVA DE BLOCOS DE CONCRETO E CERÂMICOS
PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

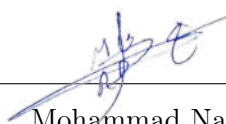
Aprovada em: _____ / _____ / _____

Banca Examinadora



Cláudia do Rosário Vaz Morgado
Orientadora

Victor Paulo Peçanha Esteves
Coorientador



Mohammad Najjar



Rodrigo Moulin Ribeiro Pierott



Igor de Azevedo Fraga

Rio de Janeiro
2025

Resumo

A construção civil exerce influência significativa sobre o meio ambiente em razão do elevado consumo de recursos naturais, do uso intensivo de energia e das emissões associadas aos seus processos produtivos, sendo os sistemas de vedação vertical elementos relevantes nesse contexto. Este trabalho analisou e comparou o desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto utilizados em alvenarias de vedação, com base em uma revisão crítica da literatura composta por doze estudos que aplicaram a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, considerando diferentes unidades funcionais, fronteiras de sistema e métodos de avaliação de impacto. Os resultados mostram que não é possível identificar um material ambientalmente superior em todos os cenários avaliados, uma vez que os blocos de concreto tendem a apresentar maiores impactos associados ao Potencial de Aquecimento Global, principalmente em função do uso de cimento Portland e da produção de clínquer, enquanto os blocos cerâmicos concentram seus principais impactos na etapa de queima das argilas, cuja magnitude depende do combustível utilizado e da eficiência dos fornos. Observou-se ainda que diferenças metodológicas entre os estudos influenciam de forma relevante os resultados e limitam comparações diretas, embora haja convergência quanto à identificação de hotspots ambientais relacionados à produção de clínquer, à queima das argilas e ao consumo de energia térmica e elétrica, reforçando a importância da aplicação criteriosa da ACV como ferramenta de apoio à tomada de decisão no setor da construção civil.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Blocos de Concreto; Blocos Cerâmicos; Construção Civil; Impactos Ambientais.

Abstract

The construction sector has a relevant environmental impact due to the intensive use of natural resources, high energy demand, and associated emissions, with vertical enclosure systems playing an important role in this context. This study analyzed and compared the environmental performance of ceramic and concrete blocks used in masonry walls based on a critical review of twelve studies that applied the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, considering different functional units, system boundaries, and impact assessment methods. The results indicate that no material can be considered environmentally superior in all analyzed scenarios, as concrete blocks generally present higher impacts related to Global Warming Potential, mainly due to Portland cement use and clinker production, while ceramic blocks concentrate their main impacts in the clay firing stage, which is strongly influenced by fuel type and kiln efficiency. Methodological differences among studies were also found to significantly affect the results and limit direct comparisons, although there is convergence regarding the identification of environmental hotspots associated with clinker production, clay firing processes, and thermal and electrical energy consumption, highlighting the relevance of LCA as a decision-support tool in the construction sector.

Keywords: Life Cycle Assessment; Concrete Blocks; Ceramic Blocks; Construction Industry; Environmental Impacts.

Sumário

1	Introdução	5
1.1	Motivo do trabalho	5
1.2	Originalidade do trabalho	5
1.3	Justificativa	6
1.4	Objetivo geral e objetivos específicos	6
1.5	Estrutura do trabalho	7
2	Revisão de Literatura	8
2.1	Sustentabilidade na Construção Civil	8
2.2	Blocos Cerâmicos e Blocos de Concreto	8
2.3	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	9
2.4	Bancos de Dados e Fontes de Informação	9
2.5	Categorias de Impacto Ambiental	10
2.6	Evidências e Lacunas na Literatura	10
2.7	Justificativa da Revisão	11
3	Metodologia	12
3.1	Estratégia de busca e seleção	12
3.2	Estrutura de análise comparativa	12
3.3	Integração e síntese final	13
4	Estudos selecionados: síntese individual e padronizada	14
4.1	Comparação do desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto .	14
4.2	Desempenho térmico de vedação em blocos de concreto segundo a NBR 15575	17
4.3	Potencial de desempenho térmico de tipologias de blocos cerâmicos	20
4.4	Impactos ambientais de vedação com blocos de concreto	24
4.5	Influência da execução no desempenho acústico de blocos cerâmicos	27
4.6	Avaliação do Ciclo de Vida de tijolos cerâmicos em duas unidades produtivas	31
4.7	Avaliação do Ciclo de Vida de blocos cerâmicos com alperujo (resíduo da extração de azeite)	35
4.8	ACV de sistemas de fechamento vertical no Brasil	38
4.9	Influência do transporte nos impactos ambientais de materiais de construção	41
4.10	ACV de blocos cerâmicos com adição de lodo de ETA	45
4.11	Energia e carbono incorporados em materiais de construção	47
4.12	Uptake global de CO ₂ por materiais de cimento (1930–2023)	49
5	Resultados	53
5.1	Síntese dos estudos analisados	53
5.2	Comparação das matérias-primas	53

5.3	Comparação dos impactos ambientais	54
5.4	Lacunas e inconsistências identificadas	55
5.5	Oportunidades e perspectivas	55
6	Discussão	57
6.1	Implicações dos hotspots identificados	57
6.2	Limitações da presente revisão e perspectivas para pesquisas futuras	58
6.3	Análise crítica	59
7	Considerações finais	61
8	Trabalhos futuros	62

1 Introdução

1.1 Motivo do trabalho

A construção civil é um dos setores mais importantes para a economia e para a infraestrutura do Brasil, mas também um dos que mais pressionam o meio ambiente Hammond and Jones [2008]. Estima-se que o setor seja responsável por grande parcela do consumo de matérias-primas como areia, brita, argila e cimento, além de elevada demanda energética e geração significativa de resíduos Muneron and outros [2021].

Entre os elementos básicos de qualquer edificação estão as paredes de vedação, que não possuem função estrutural, mas exercem papel fundamental no desempenho térmico, acústico e funcional das edificações Akutsu et al. [2020], Fratel Junior et al. [2020]. No contexto brasileiro, dois sistemas construtivos se destacam nesse tipo de aplicação: os blocos cerâmicos e os blocos de concreto Muneron and outros [2021], Horta et al. [2023].

A escolha entre esses sistemas geralmente envolve critérios econômicos, disponibilidade regional de materiais e facilidade construtiva. Entretanto, cada solução apresenta características produtivas distintas e diferentes níveis de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. Nos blocos de concreto, por exemplo, a produção do cimento Portland, especialmente a fabricação do clínquer, está associada a elevadas emissões de dióxido de carbono e alto consumo energético Hammond and Jones [2008], Muneron and outros [2021]. Já na produção de blocos cerâmicos, o processo de queima em fornos representa a principal fonte de consumo de energia e de emissões atmosféricas Gomes et al. [2012], López-García et al. [2021].

Diante da crescente preocupação com sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas, torna-se cada vez mais relevante compreender os impactos ambientais associados aos principais materiais utilizados na construção civil.

1.2 Originalidade do trabalho

Embora diversos estudos tenham aplicado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar materiais de construção, ainda existe grande heterogeneidade metodológica entre as pesquisas voltadas aos blocos cerâmicos e de concreto. As diferenças aparecem na definição da unidade funcional, nas fronteiras de sistema consideradas e nas bases de dados utilizadas para o inventário ambiental Muneron and outros [2021], Horta et al. [2023].

Essa diversidade metodológica dificulta comparações diretas entre os resultados apresentados na literatura, limitando a identificação clara dos principais fatores responsáveis pelos impactos ambientais desses sistemas construtivos.

Nesse contexto, a originalidade deste trabalho reside na consolidação e análise comparativa de estudos recentes que aplicam ACV a blocos cerâmicos e de concreto utilizados em sistemas de vedação. A pesquisa busca organizar e padronizar as informações disponíveis

na literatura, permitindo identificar tendências, convergências e divergências entre os resultados reportados.

1.3 Justificativa

A Avaliação do Ciclo de Vida tem se consolidado como uma das principais ferramentas para análise ambiental de produtos e processos industriais. Padronizada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, a ACV permite avaliar as entradas e saídas de um sistema ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o uso e a disposição final dos materiais Hammond and Jones [2008].

No setor da construção civil, essa metodologia tem sido amplamente utilizada para estimar indicadores como emissões de gases de efeito estufa, demanda de energia primária e potenciais impactos ambientais relacionados à acidificação, eutrofização e esgotamento de recursos naturais López-García et al. [2021], Gomes et al. [2012].

Apesar do crescimento dessas análises, ainda existem lacunas importantes na comparação entre sistemas construtivos alternativos, principalmente quando se consideram diferenças regionais de produção, transporte e matriz energética. Assim, a realização de uma revisão estruturada dos estudos existentes contribui para compreender melhor os principais fatores que influenciam o desempenho ambiental dos blocos utilizados em alvenaria de vedação.

1.4 Objetivo geral e objetivos específicos

O objetivo geral deste trabalho é analisar e comparar os impactos ambientais associados à produção de blocos cerâmicos e blocos de concreto utilizados em sistemas de vedação, com base em estudos publicados que aplicam a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

Para alcançar esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- sistematizar os inventários de ciclo de vida reportados na literatura para blocos cerâmicos e blocos de concreto;
- identificar as matérias-primas e etapas produtivas que apresentam maior contribuição para os impactos ambientais;
- comparar os resultados de indicadores ambientais, como emissões de dióxido de carbono, energia incorporada e outras categorias de impacto;
- discutir possíveis estratégias de mitigação, como substituição parcial de matérias-primas, uso de resíduos industriais e melhoria da eficiência energética dos processos produtivos.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o tema da pesquisa, a justificativa do estudo, seus objetivos e a estrutura geral do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, abordando os fundamentos da Avaliação do Ciclo de Vida e os principais aspectos ambientais relacionados aos materiais utilizados em sistemas de vedação.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada para a seleção e análise dos estudos considerados nesta revisão.

O Capítulo 4 reúne a síntese individual dos estudos selecionados, apresentando seus objetivos, inventários de ciclo de vida, metodologias de avaliação de impacto e principais resultados.

O Capítulo 5 apresenta a consolidação e análise comparativa dos resultados identificados nos estudos analisados.

Por fim, o Capítulo 6 discute os resultados obtidos, destacando convergências, divergências e implicações para a sustentabilidade no setor da construção civil, seguido pelas conclusões do trabalho.

2 Revisão de Literatura

2.1 Sustentabilidade na Construção Civil

A construção civil é reconhecida como uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais e energia, além de gerar resíduos em grande escala. Segundo levantamentos nacionais, os resíduos de construção e demolição correspondem a uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos, e a produção de cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂ (Hammond Jones, 2008; Wu et al., 2024). No Brasil, o crescimento do setor imobiliário e de infraestrutura amplia esses impactos, tornando urgente a busca por soluções mais sustentáveis (Horta et al., 2023).

Entre os elementos construtivos, as paredes de vedação merecem destaque. Embora não tenham função estrutural principal, representam fração relevante do volume e da massa total de uma edificação, influenciando o consumo de materiais, o conforto térmico e acústico e a eficiência energética ao longo do uso (Akutsu et al., 2020; Baldissera Lovato, 2020; Fratel Junior et al., 2020). A escolha do tipo de bloco pode afetar diretamente tanto o custo quanto a pegada ambiental da obra (Di-Domênico et al., 2020; Gomes et al., 2012).

2.2 Blocos Cerâmicos e Blocos de Concreto

Os blocos cerâmicos e os blocos de concreto são as soluções mais comuns para alvenaria de vedação no Brasil. Os blocos cerâmicos são fabricados predominantemente a partir de argila e água, moldados por extrusão e submetidos a secagem e queima em fornos que podem utilizar lenha, gás natural ou outros combustíveis. Essa etapa de queima é intensiva em energia térmica e pode ser fonte relevante de emissões atmosféricas, especialmente se o combustível não for controlado (Gomes et al., 2012; López-García et al., 2021; Santos et al., 2024).

Já os blocos de concreto combinam cimento Portland, areia, brita ou pedrisco, adições minerais e água. Após a mistura, são moldados por vibroprensagem e curados, geralmente à temperatura ambiente, embora processos acelerados de cura a vapor também possam ser aplicados. A pegada ambiental do concreto está fortemente ligada à produção do cimento, em particular à clínquerização, etapa que libera grande quantidade de CO₂ e consome energia (Hammond Jones, 2008; Wu et al., 2024; Di-Domênico et al., 2020).

Além das diferenças de fabricação, há variações no desempenho: blocos cerâmicos tendem a ser mais leves, possuem menor condutividade térmica e podem contribuir para conforto ambiental; blocos de concreto são mais padronizados, robustos e podem reduzir desperdícios pela precisão dimensional. Esses fatores técnicos influenciam o impacto ambiental, o custo e o desempenho global das edificações (Akutsu et al., 2020; Baldissera Lovato, 2020; Fratel Junior et al., 2020).

2.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como ferramenta central para mensurar impactos ambientais de produtos e processos, permitindo comparações justas entre alternativas construtivas. Regulamentada pelas normas ISO 14040 e 14044, a ACV é composta por quatro etapas principais:

- 1) Definição de objetivo e escopo — estabelece o propósito do estudo, a unidade funcional e as fronteiras do sistema.
- 2) Análise de inventário (LCI) — coleta e quantifica entradas (matérias-primas, energia, água) e saídas (emissões, resíduos).
- 3) Avaliação de impactos (LCIA) — traduz os dados do inventário em categorias de impacto ambiental (como potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, uso de recursos).
- 4) Interpretação — análise crítica dos resultados, identificação de pontos críticos (*hotspots*) e recomendações.

Um conceito fundamental para comparar materiais é a unidade funcional, que expressa o serviço prestado pelo produto (por exemplo, 1 m² de parede construída). Outro ponto-chave são as fronteiras do sistema, que delimitam quais etapas do ciclo de vida serão consideradas. Os dois tipos mais comuns são:

- 1) Cradle-to-gate — da extração das matérias-primas até o produto pronto para sair da fábrica.
- 2) Cradle-to-grave — inclui todo o ciclo, até o descarte ou reciclagem do material.
- 3) Gate-to-gate — limita-se a uma etapa específica do processo produtivo, geralmente apenas a fabricação.

Essas escolhas afetam diretamente os resultados e precisam ser explicitadas para garantir comparabilidade entre estudos.

2.4 Bancos de Dados e Fontes de Informação

A execução de uma ACV requer informações detalhadas sobre processos produtivos, muitas vezes indisponíveis diretamente nas empresas. Para suprir essas lacunas, utilizam-se bancos de dados consolidados, como o Ecoinvent, que reúne inventários de centenas de processos industriais e de transporte, principalmente baseados em contextos europeus. O uso desses bancos acelera análises, mas exige senso crítico, pois nem sempre refletem a realidade brasileira, como tipo de combustível nos fornos cerâmicos ou composição do cimento Portland nacional.

2.5 Categorias de Impacto Ambiental

Os estudos analisados sobre blocos de concreto e blocos cerâmicos contemplam diversas categorias de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos materiais, de acordo com os princípios estabelecidos pelas normas ISO 14040 e ISO 14044. Entre as categorias mais frequentemente avaliadas destacam-se o Potencial de Aquecimento Global (GWP), expresso em emissões de gases de efeito estufa em quilogramas de CO₂ equivalente, e a Energia Incorporada, que representa a soma de toda a energia elétrica, térmica e proveniente de combustíveis fósseis utilizada durante as etapas do ciclo de vida. Também são recorrentes as análises de Acidificação e Eutrofização, que refletem os impactos causados pela liberação de óxidos de enxofre e nitrogênio no solo e em corpos d'água, bem como a Depleção de Recursos Não Renováveis, associada ao consumo de matérias-primas minerais, como calcário e areia, empregadas na produção dos blocos.

Outras categorias importantes, como Toxicidade Humana e Ecotoxicidade, avaliam os potenciais efeitos adversos de substâncias tóxicas liberadas no ambiente sobre a saúde humana e os ecossistemas. Entre todas essas categorias, o Potencial de Aquecimento Global (GWP) costuma ser o indicador mais utilizado nas comparações entre materiais, por sua ampla aceitação científica e pela facilidade de comunicação dos resultados. No entanto, abordagens mais abrangentes de Avaliação do Ciclo de Vida consideram múltiplas dimensões ambientais, permitindo uma análise integrada e equilibrada dos impactos gerados, o que contribui para uma avaliação mais completa da sustentabilidade dos sistemas construtivos estudados.

2.6 Evidências e Lacunas na Literatura

A literatura especializada apresenta padrões relativamente consistentes quanto aos resultados de Avaliação do Ciclo de Vida de blocos cerâmicos e de concreto, ainda que existam nuances importantes entre os estudos. De modo geral, o cimento é identificado como o principal hotspot ambiental nos blocos de concreto, em função da elevada emissão de CO₂ associada à produção do clínquer. Já para os blocos cerâmicos, a etapa de queima se destaca como a mais crítica, devido ao uso intensivo de energia térmica e à liberação de gases de combustão. Apesar dessa tendência geral, observa-se uma grande variabilidade nos resultados quantitativos, decorrente de diferenças metodológicas, como a definição das fronteiras do sistema (por exemplo, cradle-to-gate ou cradle-to-grave), os fatores de emissão adotados, as bases de dados utilizadas e as condições regionais, que incluem o tipo de argila, o combustível empregado nos fornos e a matriz elétrica considerada.

Outro aspecto recorrente na literatura é a limitação da integração entre a ACV e o desempenho térmico ou acústico dos materiais, o que dificulta comparações completas para a tomada de decisão em projetos construtivos. Além disso, muitos estudos enfrentam a escassez de dados primários nacionais, o que leva pesquisadores a adaptar ou calibrar dados

provenientes de inventários estrangeiros, comprometendo parcialmente a representatividade local dos resultados. Esses desafios evidenciam a necessidade de maior padronização metodológica e de ampliação das bases de dados regionais, a fim de aprimorar a precisão e a aplicabilidade das avaliações ambientais no contexto da construção civil brasileira.

2.7 Justificativa da Revisão

Compreender os aspectos técnicos e ambientais dos blocos cerâmicos e de concreto é fundamental para apoiar escolhas de projeto mais sustentáveis. Esta revisão organiza conceitos, métodos e achados prévios, estabelecendo base sólida para análises comparativas. Ao sintetizar informações dispersas, identifica-se onde há consenso, como nos *hotspots* já reconhecidos, e onde persistem lacunas, reforçando a necessidade de estudos que integrem desempenho ambiental, térmico e acústico em um único arcabouço de comparação.

3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em uma revisão sistemática de estudos que aplicaram a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) a blocos cerâmicos e de concreto utilizados em alvenarias de vedação. Buscou-se reunir, organizar e comparar resultados de diferentes pesquisas, com ênfase na identificação das matérias-primas e das etapas produtivas de maior relevância para o desempenho ambiental desses materiais.

3.1 Estratégia de busca e seleção

A pesquisa bibliográfica concentrou-se em bases amplamente utilizadas na área de engenharia e sustentabilidade, incluindo *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. As buscas foram realizadas por meio de combinações de palavras-chave em português e inglês, como “*avaliação do ciclo de vida blocos de concreto*”, “*life cycle assessment concrete blocks*”, “*ACV blocos cerâmicos*” e “*environmental impact masonry*”, de modo a abranger estudos relevantes sobre o tema. Foram selecionados trabalhos que aplicaram a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida de forma total ou parcial, em consonância com as normas ISO 14040 e ISO 14044.

As normas ISO 14040 e ISO 14044 constituem o principal referencial internacional para a realização de estudos de ACV. A ISO 14040 estabelece os princípios e a estrutura geral da metodologia, incluindo a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário, a avaliação de impacto e a interpretação dos resultados, enquanto a ISO 14044 detalha os requisitos técnicos e as orientações para a execução dessas etapas, assegurando consistência e comparabilidade entre estudos. Também foram incluídos trabalhos que analisaram blocos cerâmicos ou de concreto destinados à vedação vertical e que apresentaram resultados ambientais quantitativos, como emissões de dióxido de carbono, energia incorporada ou categorias de impacto ambiental.

Foram excluídos os estudos que abordaram outros elementos construtivos sem foco na vedação ou que não disponibilizaram dados quantitativos suficientes para permitir comparações consistentes entre os sistemas analisados, de modo a garantir que a revisão contemplasse apenas trabalhos com informações técnicas e ambientais adequadas à análise proposta.

3.2 Estrutura de análise comparativa

Para cada estudo incluído na revisão, foi elaborado um resumo padronizado com o objetivo de assegurar uniformidade na análise e comparabilidade entre os resultados. Esse resumo contemplou a descrição do objetivo e do escopo do estudo, bem como a identificação das fronteiras do sistema, da unidade funcional e das principais premissas metodológicas, conforme os princípios estabelecidos pelas normas ISO 14040 e ISO 14044. Em seguida,

procedeu-se à síntese do Inventário do Ciclo de Vida (LCI), abrangendo os fluxos de entrada e saída de materiais, energia e emissões associados ao sistema avaliado.

Também foram sistematizadas as informações relativas às categorias e aos indicadores ambientais considerados na etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA), bem como a interpretação dos resultados, com destaque para os pontos críticos e para as etapas do ciclo de vida com maior contribuição para os impactos ambientais. Essas informações foram organizadas em tabelas normalizadas e fluxogramas representativos da aplicação da ACV, o que contribuiu para a clareza da análise e facilitou a comparação entre os estudos selecionados.

3.3 Integração e síntese final

Os dados provenientes dos estudos selecionados foram consolidados em quadros comparativos entre blocos cerâmicos e blocos de concreto, visando identificar semelhanças, diferenças e tendências no desempenho ambiental de cada material. Nesses quadros, destacaram-se as matérias-primas predominantes utilizadas na fabricação, bem como possíveis alternativas de origem sustentável, incluindo tanto insumos naturais quanto resíduos industriais empregados como substitutos parciais. Foram ainda identificadas as etapas do ciclo de vida mais impactantes, como a produção de clínquer, a queima em fornos e o transporte de matérias-primas e produtos, reconhecidas na literatura como fases críticas em termos de emissões e consumo energético.

Adicionalmente, analisaram-se as diferenças metodológicas entre os estudos, considerando variações no escopo, nas fronteiras do sistema e nas categorias de impacto avaliadas, assim como a existência de lacunas e oportunidades de inovação voltadas à redução dos impactos ambientais na cadeia produtiva dos blocos de vedação. Essa abordagem permitiu construir uma visão integrada da literatura, fornecendo subsídios técnicos que podem apoiar decisões mais sustentáveis na seleção de materiais para a construção civil e contribuir para o aprimoramento das práticas de Avaliação do Ciclo de Vida no setor.

4 Estudos selecionados: síntese individual e padronizada

Este capítulo reúne os estudos selecionados sobre blocos cerâmicos e de concreto para vedação. Cada subseção traz um *resumo padronizado* com: (i) objetivo e escopo, (ii) inventário do ciclo de vida (LCI), (iii) avaliação de impactos (LCIA) e (iv) interpretação dos resultados, além de uma tabela-resumo e um fluxograma no formato adotado neste trabalho. Apenas informações presentes nos artigos foram utilizadas.

Guia de leitura para cada estudo:

- *Unidade funcional e fronteiras de sistema* (cradle-to-gate / cradle-to-grave) são explicitadas;
- o *LCI* destaca matérias-primas e insumos energéticos relevantes;
- a *LCIA* lista os indicadores reportados (ex.: GWP/CO₂, energia, categorias CML/ReCiPe);
- a *interpretação* identifica hotspots (p.ex. clínquer no concreto; queima na cerâmica) e limitações.

4.1 Comparação do desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto

O estudo de Muneron (2021) realizou uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) completa para comparar o desempenho ambiental de blocos cerâmicos e blocos de concreto empregados em sistemas de vedação vertical de edificações residenciais no Brasil. A análise segue as normas ISO 14040 e ISO 14044 e adota como unidade funcional 1 m² de parede executada. As fronteiras do sistema foram definidas como *cradle-to-grave*, abrangendo desde a extração das matérias-primas até as etapas de produção, transporte, montagem em obra, demolição e destinação final, incluindo cenários de reciclagem. O objetivo da pesquisa foi identificar qual sistema de vedação apresenta menor carga ambiental total ao longo do ciclo de vida, bem como mapear as etapas responsáveis pelos maiores impactos ambientais.

Para construir o inventário do ciclo de vida, os autores utilizaram o banco de dados *Ecoinvent* (versão 3.1) integrado ao software SimaPro, contemplando fluxos de entrada e saída de cada etapa do processo. Foram contabilizados o consumo de energia elétrica e térmica, os insumos materiais (tais como cimento Portland, argila, areia, cal, aço, vidro, alumínio e madeira), o transporte e as emissões atmosféricas relevantes, incluindo CO₂, NO_x, SO₂ e material particulado. O inventário não aplicou corte de processos: extração de matérias-primas, fabricação dos blocos, transporte até o canteiro, execução da alvenaria, demolição e cenários de reciclagem foram incluídos. As etapas de uso e manutenção da

parede não integraram os cálculos, uma vez que essas etapas são altamente dependentes do contexto de operação do edifício e poderiam introduzir incertezas não comparáveis entre os dois sistemas.

Na avaliação de impactos ambientais (LCIA), o estudo utilizou o método *Eco-indicator 99*, que consolida os resultados em três grandes categorias de dano: Qualidade do Ecossistema (EQ), Saúde Humana (HH) e Recursos (R). Essas categorias sintetizam efeitos associados, por exemplo, à acidificação, eutrofização, toxicidade humana, consumo de combustíveis fósseis e mudanças climáticas. A abordagem permite não apenas comparar valores absolutos de impacto entre os dois sistemas de alvenaria, mas também identificar quais processos individuais mais contribuem para cada tipo de dano. Os resultados indicaram que a alvenaria de blocos de concreto apresenta impactos superiores em todas as categorias analisadas. Em termos quantitativos, o somatório dos escores de impacto atribuídos ao sistema em blocos cerâmicos foi da ordem de 751 pontos, enquanto o sistema em blocos de concreto atingiu aproximadamente 1064 pontos, ou seja, um aumento global expressivo. A diferença foi particularmente relevante na categoria Recursos (R), em que o sistema em concreto apresentou cerca de 50% a mais de carga ambiental associada ao uso de combustíveis fósseis e à extração de matérias-primas não renováveis. Nas categorias Saúde Humana (HH) e Qualidade do Ecossistema (EQ), os blocos de concreto também apresentaram desempenho inferior, com aumentos próximos de 28% e 43%, respectivamente, em relação aos blocos cerâmicos.

Na etapa de interpretação, Muneron (2021) identificam *hotspots* claros e distintos para cada tecnologia de vedação. No caso dos blocos de concreto, o principal responsável pelo impacto total é a produção de cimento Portland, mais especificamente a etapa de clínquerização, que envolve fornos de alta temperatura e resulta em emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂). Esse processo concentra tanto o uso de energia térmica e elétrica quanto a liberação direta de CO₂ de processo, decorrente da decomposição calcária. Para os blocos cerâmicos, o ponto crítico está associado à queima em fornos durante a etapa de produção. A energia térmica requerida nessa fase, frequentemente suprida por lenha, gás natural ou outros combustíveis, gera emissões atmosféricas e contribui para as categorias relacionadas à saúde humana e qualidade ambiental. O estudo também observa que transporte de materiais, uso de argamassas e etapas finais de descarte e reciclagem exercem influência sobre os resultados globais, mas com menor peso quando comparados aos processos de queima (no caso cerâmico) e produção de clínquer (no caso do concreto). De forma geral, os autores concluem que, para a unidade funcional analisada, os blocos cerâmicos apresentaram desempenho ambiental mais favorável do que os blocos de concreto, ainda que melhorias sejam necessárias em ambos os sistemas. As recomendações incluem, para o concreto, a substituição parcial do clínquer por adições minerais e otimização logística; e, para a cerâmica, ganhos de eficiência energética e controle das emissões dos fornos. O estudo reforça que a escolha do material de vedação tem efeito direto sobre a

pegada ambiental da edificação e deve ser tratada como decisão de projeto, não apenas como decisão de custo.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Comparar o desempenho ambiental de 1 m ² de parede em blocos cerâmicos e de concreto, com fronteiras <i>cradle-to-grave</i> em contexto residencial brasileiro.	Foram incluídas extração de matérias-primas, fabricação, transporte, execução, demolição e reciclagem.
Inventário (LCI)		Uso do banco de dados Ecoinvent (v3.1) e modelagem via SimaPro; contabilização de energia elétrica e térmica, cimento, argila, areia, cal, aço, alumínio, vidro e madeira; emissões de CO ₂ , NO _x , SO ₂ e material particulado.	Inventário abrangente, sem corte de processos relevantes; transporte rodoviário predominante.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Aplicação do método Eco-indicator 99, com as categorias Qualidade do Ecossistema (EQ), Saúde Humana (HH) e Recursos (R).	O sistema em blocos de concreto apresentou maiores impactos em todas as categorias; soma de ~ 1064 pontos contra ~ 751 pontos para os blocos cerâmicos.
Interpretação		Identificação dos principais <i>hotspots</i> ambientais de cada sistema de vedação.	Concreto: clínquer do cimento como principal fonte de emissões e uso de energia; Cerâmica: etapa de queima em fornos como ponto crítico; cerâmica com desempenho global mais favorável.

Tabela 1: Síntese da aplicação da metodologia em Muneron and outros [2021].

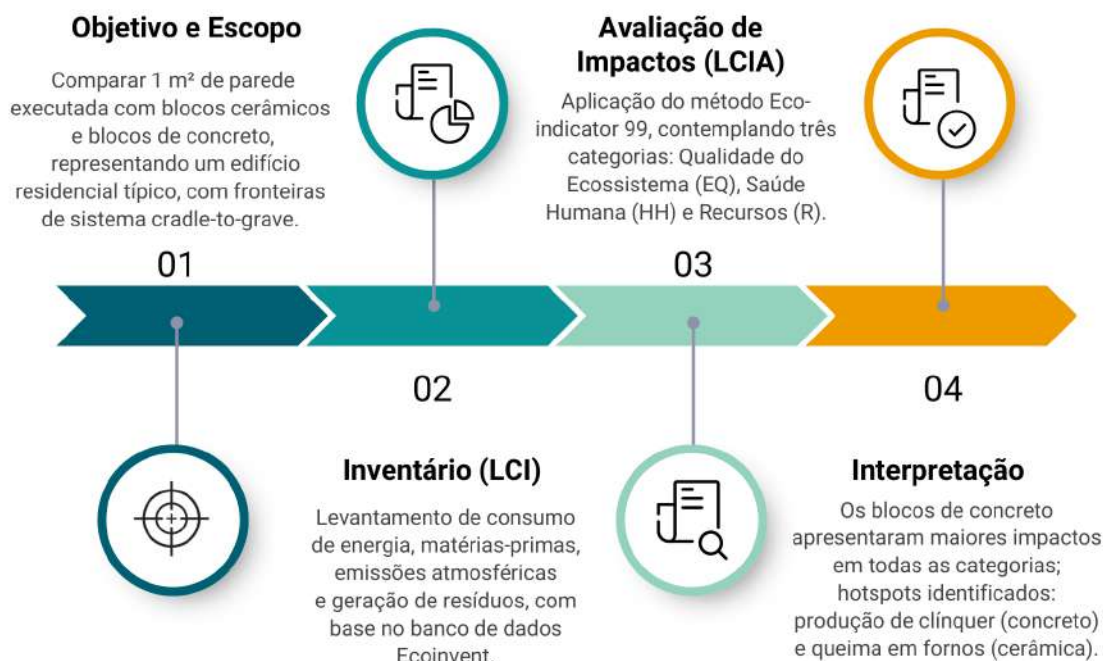


Figura 1: Fluxograma

4.2 Desempenho térmico de vedação em blocos de concreto segundo a NBR 15575

O estudo de Baldissera (2020) analisou o desempenho térmico de sistemas de vedação vertical (SVV) em alvenaria de blocos de concreto, com foco na conformidade com a NBR 15575 (Edificações Habitacionais), desempenho, e na identificação de soluções economicamente viáveis que atendam aos limites normativos. A pesquisa foi conduzida no município de Machadinho (RS), região que representa condições típicas de variabilidade climática no sul do Brasil, utilizando blocos de concreto de 14×19×39 cm, com variações de largura de 9, 14 e 19 cm. O objetivo principal foi determinar, por meio de cálculo simplificado, os valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) de diferentes composições de parede, verificando sua adequação às zonas bioclimáticas brasileiras.

O inventário experimental contemplou nove composições distintas, que variaram o tipo e a espessura dos revestimentos e materiais isolantes, conforme os materiais mais utilizados na região e aqueles de crescente aplicação no mercado nacional. As composições incluíram desde paredes com argamassa convencional (ACR e ACO) até alternativas com argamassa com vermiculita (AV), pasta de gesso (PTG), gesso acartonado (GEA), poliestireno expandido (EPS), lã de PET (LPET) e poliuretano (PU). As combinações foram definidas com base na NBR 13749 (revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas) e nas propriedades térmicas especificadas na NBR 15220-2, complementadas por dados de catálogos técnicos e literatura especializada. O estudo considerou juntas totalmente preenchidas com argamassa de 1 cm e avaliou diferentes espessuras de revestimento, variando de 0,5 cm a 8,5 cm, para determinar o ponto em que as composições passam a

atender aos requisitos de desempenho térmico da norma.

Os cálculos de transmitância térmica seguiram o método prescrito pela NBR 15220-2 (ABNT, 2008), utilizando a relação $U = 1/R_T$, onde R_T é a resistência térmica total da parede, considerando resistências internas, externas e de cada camada. Já a capacidade térmica foi calculada a partir das propriedades de densidade, calor específico e espessura das camadas, determinando-se o valor total em $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ para cada composição. O critério normativo de referência foi $U \geq 2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $CT \geq 130 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ para as zonas bioclimáticas 1 a 7.

Os resultados mostraram que as paredes compostas apenas por argamassa convencional (Composições 1 e 2) não atingiram o limite máximo de transmitância térmica em nenhuma das zonas bioclimáticas avaliadas, mesmo com blocos de maior largura (19 cm). Observou-se que a transmitância térmica reduziu com o aumento da espessura do revestimento, porém somente valores acima de 8,5 cm permitiram atendimento parcial aos limites da norma. As composições com argamassa com vermiculita (Composição 3) obtiveram desempenho mais satisfatório, atendendo ao requisito de $U \geq 2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ com espessura total de apenas 2,5 cm de revestimento. Entre as soluções com isolantes térmicos incorporados, as composições que utilizaram poliestireno expandido (EPS), lã de PET e poliuretano apresentaram os menores valores de transmitância, garantindo conformidade com a norma em todas as zonas bioclimáticas.

A análise da capacidade térmica indicou que todas as composições atenderam ao valor mínimo exigido ($CT \geq 130 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), independentemente da presença de material isolante. O valor de CT variou entre aproximadamente 170 e 510 $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$, com diferenças explicadas pelas propriedades térmicas individuais de cada material, especialmente a densidade aparente e o calor específico. As composições com isolantes, embora apresentassem maior resistência térmica, mostraram ligeira redução na capacidade térmica devido à menor densidade dos materiais isolantes.

Além dos parâmetros térmicos, Baldissera (2020) realizaram uma avaliação econômica baseada no custo dos materiais, obtidos junto a fornecedores locais e ao banco de dados SINAPI (setembro/2019). O custo por metro quadrado das nove composições variou entre R\$ 6,07/ m^2 e R\$ 144,24/ m^2 . As soluções de menor custo, argamassa convencional (ACR e ACO) e pasta de gesso (PTG), foram as que não atenderam à norma, enquanto as alternativas com EPS mostraram excelente equilíbrio entre desempenho térmico e custo. A combinação ACR + BC + EPS + ACR apresentou o melhor custo-benefício, conciliando conformidade normativa e viabilidade econômica. Já as soluções com gesso acartonado e lã de PET alcançaram os melhores resultados térmicos, porém com custo mais elevado, o que restringe sua aplicação em edificações de pequeno porte.

Em síntese, o estudo conclui que, para blocos de concreto, o atendimento à NBR 15575 depende essencialmente da escolha adequada do revestimento e do uso de materiais isolantes. A transmitância térmica é o principal desafio, enquanto a capacidade térmica é

facilmente atingida. O EPS destacou-se como a solução mais equilibrada entre desempenho, disponibilidade e custo, sendo recomendado para regiões de clima mais rigoroso. O trabalho reforça a importância da especificação técnica detalhada e da capacitação da mão de obra, fatores determinantes para assegurar o desempenho térmico previsto em projeto e a conformidade com as normas brasileiras.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Analisar o desempenho térmico de sistemas de vedação vertical (SVV) em blocos de concreto, com diferentes composições de revestimento e materiais isolantes, conforme a NBR 15575.	Nove composições avaliadas em contexto brasileiro (Machadinho/RS); unidade funcional: 1 m ² de parede.
Inventário (LCI)		Geometrias de blocos 14×19×39 cm (variação 9–19 cm), juntas de 1 cm, revestimentos de 0,5–8,5 cm, propriedades térmicas da NBR 15220-2, catálogos técnicos e SINAPI.	Inventário detalhado incluindo argamassa convencional, vermiculita, EPS, PU, lã de PET e gesso; todas as camadas modeladas com resistências internas e externas.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Cálculo de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT); verificação frente à NBR 15575 (U 2,5 W/m ² ·K; CT 130 kJ/m ² ·K).	Sem isolante, U não atende à norma; com EPS, PU ou lã de PET atende plenamente; CT conforme em todas as composições (170–510 kJ/m ² ·K).
Interpretação		Discussão técnica e econômica considerando desempenho térmico e custo/m ² .	Melhor custo-benefício: EPS + argamassa convencional; soluções com gesso acartonado e lã de PET apresentam melhor desempenho, porém custo mais elevado.

Tabela 2: Síntese da aplicação da metodologia em Baldissera and Lovato [2020].



Figura 2: Fluxograma

4.3 Potencial de desempenho térmico de tipologias de blocos cerâmicos

O estudo de Akutsu (2020) avaliou o potencial de desempenho térmico de diferentes tipologias de blocos cerâmicos amplamente utilizadas na construção civil brasileira, com o objetivo de identificar quais modelos poderiam atender às exigências mínimas da NBR 15575-4 sem a necessidade de revestimentos adicionais. Essa investigação insere-se em um contexto de crescente preocupação com o desempenho térmico das edificações e com o impacto energético associado ao uso de materiais convencionais. A alvenaria cerâmica, por sua ampla disponibilidade e relevância econômica, é um dos elementos mais representativos do setor, sendo responsável por grande parte das vedações verticais em edificações residenciais no país. A análise proposta por Akutsu e colaboradores contribui para compreender como parâmetros geométricos e propriedades térmicas dos blocos influenciam o comportamento térmico global das paredes, além de orientar estratégias de melhoria tecnológica promovidas pela Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER).

A pesquisa foi conduzida a partir da comparação entre seis tipologias de blocos cerâmicos representativos do mercado nacional: quatro modelos comerciais, bloco maciço, bloco vazado com furos horizontais, bloco estrutural maciço e bloco estrutural vazado, e dois blocos de alto desempenho desenvolvidos pela ANICER, projetados para atender simultaneamente aos requisitos de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT). A análise foi baseada em dados obtidos de normas técnicas (NBR 15220-2, NBR 15270-1 e NBR 15575-4), complementados por informações de catálogos de fabricantes e medições

laboratoriais. O inventário de dados incluiu dimensões dos blocos, espessuras das paredes internas e externas, área de vazios, massa específica e condutividade térmica dos materiais, sendo essas propriedades essenciais para a determinação da resistência térmica (R) e dos demais parâmetros avaliados.

A metodologia adotada seguiu rigorosamente os procedimentos da NBR 15220-2 (ABNT, 2008), que estabelece o cálculo da resistência térmica total (R_t) como a soma das resistências superficiais internas e externas e da resistência equivalente do elemento de vedação. Para os blocos vazados, o modelo térmico foi subdividido em camadas equivalentes de material sólido e ar, de modo a representar adequadamente o efeito isolante das cavidades. As condições de contorno adotadas consideraram regime estacionário, temperatura média de 25 °C e ausência de revestimentos ou argamassas de assentamento, de forma a isolar o comportamento térmico intrínseco dos blocos. A transmitância térmica (U) foi obtida pela relação inversa $U = 1/R_t$, e a capacidade térmica (CT) foi calculada a partir das propriedades físicas dos materiais, conforme $CT = c \cdot \rho \cdot e$, onde c é o calor específico, ρ a densidade aparente e e a espessura equivalente do bloco.

Os resultados obtidos evidenciaram diferenças significativas entre as tipologias convencionais e as de alto desempenho. O bloco maciço tradicional apresentou o maior valor de capacidade térmica ($CT > 150 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$), consequência de sua elevada densidade e massa volumétrica, o que favorece a inércia térmica e o amortecimento das oscilações de temperatura. Contudo, seu desempenho quanto à transmitância térmica foi insuficiente ($U \approx 3,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), demonstrando elevada passagem de calor e, portanto, inadequação às exigências da NBR 15575-4. Em contrapartida, o bloco de furo horizontal, de menor densidade e com significativo volume de ar aprisionado, apresentou transmitância térmica inferior a $2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, atendendo ao limite normativo, porém sem alcançar a capacidade térmica mínima de $130 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$.

Os blocos estruturais, maciço e vazado, apresentaram comportamento intermediário, com valores de U e CT próximos aos limites normativos, mas sem o atendimento simultâneo de ambos. Esses resultados indicam que a configuração geométrica e a densidade exercem papel decisivo: o aumento da massa favorece a inércia térmica, enquanto a presença de cavidades aumenta a resistência térmica, mas reduz a capacidade térmica. Assim, alcançar o equilíbrio entre esses dois efeitos é fundamental para o desempenho global da parede.

Os dois blocos desenvolvidos pela ANICER (ESP.BRASIL.1439 e ESP.BRASIL.1939) apresentaram desempenho significativamente superior, resultado de um processo de otimização geométrica que buscou maximizar o percurso do calor e reduzir as pontes térmicas internas. O modelo ESP.BRASIL.1439 atingiu valores de U inferiores a $2,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e CT em torno de $150 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, enquanto o ESP.BRASIL.1939 alcançou desempenho ainda melhor, com transmitância de aproximadamente $1,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e capacidade térmica próxima de $170 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$. Esses resultados indicam conformidade plena com os critérios normativos e confirmam o potencial desses blocos de alto desempenho para aplicação em edificações

sem necessidade de revestimentos adicionais. A eliminação dessas camadas implica ganhos econômicos diretos e redução da energia incorporada e das emissões associadas à produção de argamassas e gessos, além de simplificar o processo construtivo.

Na interpretação dos resultados, os autores destacam que a orientação e o formato dos vazados influenciam diretamente o fluxo de calor. Cavidades verticais, como nas soluções ANICER, reduzem a condução térmica e criam trajetórias mais longas para o calor atravessar o bloco, resultando em menores valores de U . Por outro lado, blocos com vazios horizontais permitem maior ventilação interna, mas também aumentam as perdas térmicas. Outro fator relevante é a espessura das paredes internas, cuja redução, quando controlada, contribui para reduzir o peso e o consumo de matéria-prima sem comprometer a resistência mecânica. A geometria otimizada dos blocos ANICER combina espessura controlada, orientação vertical dos vazios e parede externa contínua, o que proporciona simultaneamente boa resistência e excelente isolamento térmico.

Além da análise numérica, o estudo discute as implicações construtivas e ambientais dos resultados. O uso de blocos de alto desempenho térmico representa uma alternativa eficiente para o cumprimento das exigências da NBR 15575-4 em todas as zonas bioclimáticas brasileiras, especialmente nas regiões mais quentes (zonas 6 e 7), onde a redução das cargas térmicas internas é crucial para o conforto e para a eficiência energética. A possibilidade de dispensar o uso de revestimentos isolantes reduz significativamente o custo total do sistema de vedação e o impacto ambiental associado à fabricação e transporte de materiais complementares. Ademais, a maior eficiência térmica desses blocos pode contribuir para diminuir o consumo de energia elétrica em edificações residenciais, especialmente em sistemas de climatização.

Os autores reconhecem, entretanto, que o estudo foi conduzido sob condições idealizadas e não considerou o efeito de juntas, rejuntas e heterogeneidades construtivas, fatores que podem alterar levemente os resultados em situações reais. Mesmo assim, as conclusões apontam um caminho claro: a inovação geométrica e o controle dimensional dos blocos cerâmicos são estratégias de alto potencial para promover sustentabilidade e desempenho térmico nas construções brasileiras, com benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Em síntese, o trabalho de Akutsu (2020) demonstra que a evolução do design dos blocos cerâmicos pode desempenhar papel central na transição para edificações mais eficientes e sustentáveis no país.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Avaliar o desempenho térmico de seis tipologias de blocos cerâmicos (quatro de mercado e duas propostas pela ANICER), identificando aquelas que atendem simultaneamente aos critérios de transmitância e capacidade térmica da NBR 15575-4.	Contexto nacional e abordagem comparativa sem revestimentos; unidade funcional: 1 m ² de parede.
Inventário (LCI)		Levantamento geométrico e físico de blocos, propriedades térmicas e densidades, conforme NBR 15220-2 e 15270-1, complementadas por dados de catálogos técnicos e medições laboratoriais.	Inventário detalhado: dimensões, condutividade térmica, espessuras e percentual de vazios; modelagem térmica das seções sólidas e de ar.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Cálculo dos parâmetros R, U e CT segundo metodologia normativa; comparação com limites U 2,5 W/m ² ·K e CT 130 kJ/m ² ·K.	Bloco maciço atendeu apenas a CT; furo horizontal atendeu apenas a U; blocos estruturais tiveram desempenho intermediário; blocos ANICER atenderam plenamente a ambos os critérios (U 1,8 W/m ² ·K; CT 170 kJ/m ² ·K).
Interpretação		Discussão técnica e ambiental sobre as tipologias e implicações construtivas.	Blocos ANICER combinam geometria otimizada, menor massa e melhor isolamento térmico, eliminando necessidade de revestimentos e reduzindo impactos ambientais e custos.

Tabela 3: Síntese da aplicação da metodologia em Akutsu et al. [2020].

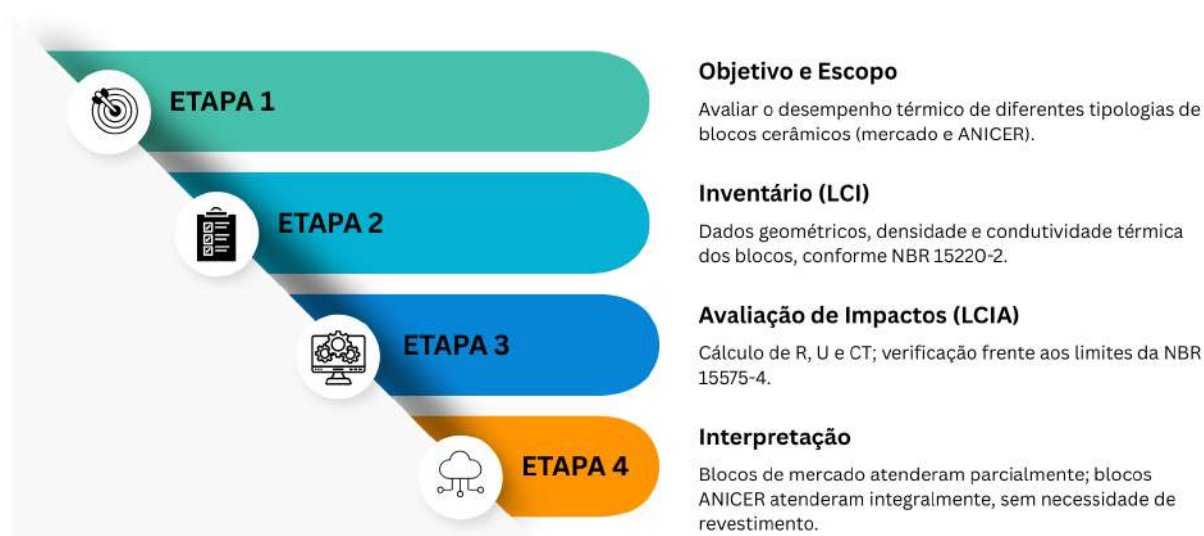


Figura 3: Fluxograma

4.4 Impactos ambientais de vedação com blocos de concreto

O estudo de Didomenico (2020) teve como objetivo quantificar os impactos ambientais associados a um sistema de vedação vertical executado com blocos de concreto, por meio da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as diretrizes das normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. A pesquisa insere-se em um contexto de crescente preocupação ambiental no setor da construção civil, em que o uso intensivo de cimento, agregados e energia elétrica é responsável por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa e da depleção de recursos naturais. Diante disso, compreender os impactos ambientais de um sistema construtivo amplamente utilizado, como a alvenaria de blocos de concreto, é fundamental para subsidiar políticas de redução de emissões e promover a adoção de soluções construtivas mais sustentáveis.

O escopo da análise foi definido como “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*), abrangendo as etapas de extração e beneficiamento das matérias-primas, transporte, produção dos materiais constituintes e seu envio ao canteiro de obras. A unidade funcional adotada foi 1 m² de alvenaria de vedação acabada, incluindo blocos de concreto, argamassa de assentamento, chapisco e emboço. Esse recorte metodológico busca representar um metro quadrado de parede com acabamento completo, refletindo uma condição real de aplicação em edificações residenciais.

Para a elaboração do inventário de ciclo de vida (LCI), foram utilizados dados secundários da base Ecoinvent 3.6, adaptados ao contexto brasileiro, conforme o modelo de sistema *cut-off* e com processos do tipo *Market*, que já incluem o transporte dos insumos até o consumidor final. O inventário considerou 156 kg de blocos de concreto por metro quadrado de parede, com perdas de 4% durante a execução, conforme recomendações da ANICER e do SINAPI. Para as argamassas de assentamento, chapisco e emboço, foram consideradas perdas médias de 10%. As composições adotadas seguiram traços usuais em obras de habitação: 1:2:8 (cimento, cal e areia) para assentamento; 1:3 para chapisco; e 1:7 para emboço. Cada mistura incluiu ainda o consumo de energia elétrica destinado ao preparo das massas, entre 9 e 10 kWh/m³ de argamassa, conforme dados de Caldas e Filho (2019).

Os principais insumos do sistema foram o cimento Portland, a cal e a areia, com destaque para o cimento, cuja produção envolve o processo de clínquerização, um dos mais intensivos em energia e emissores de CO na indústria de materiais de construção. Para a cal, utilizaram-se dados de referência de geografia “Rest of the World” (RoW), dada a inexistência de inventários brasileiros específicos. O uso de dados secundários adaptados permite capturar tendências médias de impacto, ainda que introduza incertezas associadas a diferenças regionais de energia e transporte.

A avaliação de impactos ambientais (LCIA) foi realizada no software OpenLCA 1.9, empregando o método EN 15804:2012 com linha de base CML. Foram contempladas sete

categorias de impacto: depleção de recursos abióticos não fósseis (ADPE), depleção de recursos fósseis (ADPF), acidificação do solo e da água (AP), eutrofização (EP), potencial de aquecimento global (GWP), depleção da camada de ozônio (ODP) e formação de ozônio troposférico (POCP). Esse conjunto de indicadores é amplamente utilizado em estudos internacionais para caracterizar o desempenho ambiental de materiais da construção civil e possibilita uma leitura comparativa entre diferentes estudos e sistemas construtivos.

Os resultados mostraram que os blocos de concreto foram responsáveis por mais de 50% dos impactos em todas as categorias avaliadas. Esse resultado decorre tanto da elevada massa de material necessária (156 kg/m^2) quanto do alto teor de cimento em sua composição, cerca de 20% da mistura, segundo estudos de referência nacionais (Souza et al., 2016). O cimento apresentou contribuição dominante na categoria de aquecimento global (GWP), alcançando valores médios de $12,6 \text{ kg CO eq}$ por metro quadrado de parede, seguido pelas categorias de depleção de recursos fósseis e acidificação. A etapa de clínquerização, que envolve a queima de calcário em temperaturas superiores a 1400°C , foi apontada como a principal responsável por essas emissões devido à liberação direta de CO e ao consumo de combustíveis fósseis.

A argamassa de emboço foi o segundo componente mais impactante do sistema, representando até 25% dos impactos totais. Isso se deve ao seu elevado consumo de cimento por metro quadrado, além da espessura de 15 mm normalmente aplicada nas superfícies internas e externas. O chapisco e a argamassa de assentamento, embora com menores quantidades de material, também apresentaram participação relevante, especialmente nas categorias de acidificação e formação de ozônio troposférico, em função da queima de combustíveis e da geração indireta de energia elétrica utilizada na mistura das massas.

A análise comparativa dos componentes revelou que, em todas as categorias, o cimento Portland foi o principal “hotspot” ambiental, respondendo por mais de 80% das emissões e impactos associados às argamassas. Na categoria GWP, os valores parciais de emissões foram estimados em $1,62 \text{ kg CO eq}$ para a argamassa de assentamento, $3,06 \text{ kg CO eq}$ para o chapisco e $4,64 \text{ kg CO eq}$ para o emboço, confirmando o peso desproporcional desse insumo. A areia, embora presente em grande volume, possui impacto relativamente pequeno, dada sua natureza inerte e baixo consumo energético na extração.

Os autores discutem que a elevada contribuição dos blocos e das argamassas reforça a necessidade de se adotar estratégias de mitigação, como o uso de cimentos com adições minerais (pozolanas, escórias ou filer calcário), a incorporação de agregados reciclados e a otimização das espessuras de revestimento. Tais medidas podem reduzir significativamente o consumo de recursos e as emissões de CO sem comprometer o desempenho técnico das paredes. Além disso, a substituição parcial do clínquer por subprodutos industriais representa uma oportunidade relevante para descarbonizar o setor, em linha com as metas nacionais de neutralidade de carbono.

A interpretação dos resultados também ressaltou que o transporte e o consumo de energia elétrica apresentaram influência secundária nos resultados, devido ao uso de dados de processos *market*, que já incorporam médias de transporte e distribuição. As principais incertezas associadas ao estudo estão ligadas às diferenças regionais de produção de cal e às variações nos índices de perdas de materiais. Apesar dessas limitações, a pesquisa oferece um panorama robusto dos impactos ambientais da alvenaria de blocos de concreto e contribui para a construção de inventários de referência para futuras análises comparativas.

Do ponto de vista das conclusões gerais, o trabalho de Didomenico (2020) reforça a importância da seleção criteriosa de sistemas construtivos e materiais na fase de projeto. A escolha de um sistema de vedação com menor teor de cimento ou com uso de materiais alternativos pode reduzir significativamente os impactos ambientais de uma edificação ao longo de seu ciclo de vida. O estudo também destaca a utilidade da ACV como ferramenta de apoio à decisão, permitindo que engenheiros e arquitetos projetem edificações mais eficientes e de menor pegada ambiental. Em um cenário de transição para práticas construtivas sustentáveis, pesquisas como essa demonstram a viabilidade técnica e metodológica da aplicação da ACV no contexto brasileiro, promovendo uma cultura de transparência e responsabilidade ambiental no setor da construção.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Quantificar os impactos ambientais de 1 m ² de vedação em blocos de concreto, considerando o ciclo de vida <i>do berço ao portão</i> .	Sistema incluiu blocos de concreto (156 kg/m ²), argamassa de assentamento, chapisco e emboço, com perdas de 4% e 10%.
Inventário (LCI)		Dados Ecoinvent 3.6 (modelo <i>cut-off</i>) adaptados ao Brasil; consumo de cimento, cal, areia e energia elétrica.	Inventário modelado no OpenLCA; considerou energia, transporte e perdas; cimento identificado como principal insumo emissor.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Método EN 15804:2012 (baseline CML) no OpenLCA 1.9; categorias: ADPE, ADPF, AP, EP, GWP, ODP, POCP.	Blocos de concreto responderam por mais de 50% dos impactos; argamassa de emboço até 25%; cimento responsável por 80% das emissões.
Interpretação		Análise de “hotspots” e proposição de medidas de mitigação.	Principais impactos atribuídos ao cimento e à massa elevada dos blocos; recomendação de uso de adições minerais e otimização de espessuras.

Tabela 4: Síntese da aplicação da metodologia em Di-Domênico et al. [2020].



Figura 4: Fluxograma

4.5 Influência da execução no desempenho acústico de blocos cerâmicos

O estudo de Fratel (2020) analisou de forma detalhada como a execução de alvenarias de blocos cerâmicos influencia o desempenho acústico de paredes de vedação, à luz das exigências estabelecidas pela ABNT NBR 15575-4. Desde a promulgação da norma em 2013, o desempenho acústico das edificações ganhou importância normativa, exigindo que o setor da construção civil passasse a avaliar não apenas os materiais empregados, mas também o modo como são aplicados. A pesquisa, conduzida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e apoiada por uma indústria de blocos cerâmicos paulista, demonstra que a qualidade de execução das alvenarias exerce impacto direto sobre a capacidade de isolamento sonoro, podendo representar a diferença entre a conformidade e o não atendimento aos limites normativos.

A investigação considerou paredes compostas por blocos cerâmicos estruturais da classe EST 040, com dimensões de 14×19×39 cm e 19×19×39 cm, seguindo os requisitos da NBR 15270:2017. As variáveis analisadas incluíram tipo de junta vertical (filetada ou totalmente preenchida), espessura e tipo de revestimento (argamassas industrializadas com 2 a 3,2 cm de espessura), bem como o uso de preenchimento interno com vermiculita expandida e resina, com densidade aproximada de 600 kg/m³. Ao todo, foram avaliadas quatro tipologias de alvenaria, totalizando dez ensaios, cinco realizados em laboratório e cinco em campo, possibilitando a comparação direta entre condições ideais de execução e situações reais de obra.

A metodologia empregada baseou-se em ensaios normalizados segundo as normas ISO

10140-2:2010 (ensaio laboratorial de isolamento sonoro), ISO 16283-1:2014 (medição em campo) e ISO 717-1:2013 (cálculo dos índices ponderados de isolamento). Foram obtidos o índice de redução sonora ponderado (R_w) e a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nt,w}$), parâmetros que quantificam o desempenho acústico de elementos de vedação. Além disso, a pesquisa recorreu à holografia acústica, método qualitativo de alta resolução descrito por Christensen e Hald (2004), permitindo visualizar graficamente os pontos de vazamento sonoro e identificar falhas construtivas não perceptíveis a olho nu.

As amostras analisadas apresentaram resultados que evidenciam a influência direta das juntas verticais na isolação sonora. As paredes com juntas filetadas, em que a argamassa é aplicada superficialmente, apresentaram índices $D_{nt,w}$ de 39 a 40 dB em campo, enquanto as com juntas totalmente preenchidas alcançaram 44 a 45 dB. Em laboratório, onde as condições de execução são mais controladas, os valores de R_w chegaram a 50 dB para as paredes com preenchimento integral, enquanto as com juntas filetadas ficaram próximas de 45 dB. Essa diferença média de 4 a 5 dB entre laboratório e campo foi considerada significativa, superando a variação típica esperada (2 a 3 dB) para alvenarias convencionais, e indicou que falhas de execução impactam fortemente o desempenho final da parede.

As imagens obtidas por holografia acústica confirmaram a existência de vazamentos sonoros localizados nas juntas verticais, em pontos de encunhamento e nas interfaces entre a alvenaria e a estrutura. Observou-se que a ausência de preenchimento adequado de argamassa e o uso incorreto de rejuntas superficiais criaram frestas que facilitam a passagem do som. Em alguns casos, foram identificados blocos danificados, má vinculação lateral e falta de contato entre a parede e a estrutura, fatores que comprometem a estanqueidade acústica. As imagens mostraram ainda que, em altas frequências, as perdas se concentraram em pequenas áreas, enquanto, em baixas frequências, ocorreram vazamentos difusos, afetando mais intensamente o isolamento global.

A análise comparativa entre diferentes amostras mostrou que a presença de preenchimento interno com vermiculita expandida e resina contribuiu para elevar o desempenho acústico das alvenarias, especialmente nas paredes com blocos de 19 cm. Essa melhoria está associada ao aumento da massa e à redução das ressonâncias internas, resultando em um ganho médio de 3 dB no índice R_w . O efeito combinado de juntas verticais totalmente preenchidas e preenchimento interno foi o que produziu os melhores resultados, atingindo valores de isolamento compatíveis com o nível intermediário da NBR 15575-4, destinado a paredes separando unidades habitacionais autônomas.

A discussão apresentada pelos autores ressalta que as falhas de execução são o fator mais crítico para a perda de desempenho acústico em obras reais. Mesmo paredes projetadas e dimensionadas adequadamente podem não atender à norma se as juntas não forem preenchidas corretamente ou se o encunhamento não for executado de forma contínua. Esses erros construtivos, muitas vezes associados à falta de treinamento da mão de obra e à pressão por produtividade, reduzem a efetividade das soluções cerâmicas e podem

levar à necessidade de retrabalhos e reforços após a entrega da edificação. O estudo reforça, portanto, a importância de detalhamentos executivos precisos e de um controle de qualidade rigoroso na fase de obra.

Na interpretação final dos resultados, Fratel (2020) concluem que o desempenho acústico das alvenarias está intrinsecamente ligado à qualidade da execução e à aderência aos procedimentos recomendados em norma. Juntas verticais totalmente preenchidas, blocos íntegros, revestimentos contínuos e interfaces bem vedadas são condições essenciais para o atendimento aos critérios da NBR 15575-4. As paredes com execução deficiente apresentaram perdas médias de até 5 dB, suficientes para deslocar um sistema da categoria “intermediária” para “mínima”, o que implica não conformidade com os níveis de desempenho exigidos. A pesquisa também destaca que a adoção de técnicas de controle e inspeção durante a execução pode prevenir falhas e garantir o comportamento acústico projetado.

Além da contribuição técnica imediata, o trabalho de Fratel (2020) reforça a necessidade de integrar as etapas de projeto, especificação e execução sob uma perspectiva sistêmica de desempenho. O estudo amplia a compreensão de que o comportamento acústico não depende apenas das propriedades físicas dos blocos cerâmicos, mas da coerência entre materiais, detalhes construtivos e prática de obra. Em síntese, a pesquisa demonstra que a execução cuidadosa e o respeito às boas práticas construtivas são determinantes para a eficiência acústica e para o cumprimento das exigências normativas em edificações de alvenaria cerâmica.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Analisar a influência da execução e das juntas verticais no desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais, conforme a NBR 15575-4.	Unidade funcional: parede de vedação com blocos cerâmicos ($14 \times 19 \times 39$ cm e $19 \times 19 \times 39$ cm), variando juntas, revestimentos e preenchimentos.
Inventário (LCI)		Blocos cerâmicos classe EST 040; juntas filetadas ou totalmente preenchidas; revestimentos de 2–3,2 cm; preenchimento interno com vermiculita e resina. Ensaio laboratoriais e em campo conforme ISO 10140-2, ISO 16283-1 e ISO 717-1.	Foram avaliadas 10 amostras (5 em laboratório e 5 em campo) comparando geometrias e execuções equivalentes.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Determinação dos índices R_w e $D_{nt,w}$; análise da diferença entre laboratório e campo; uso de holografia acústica para identificação de vazamentos sonoros.	Diferenças médias de 4–5 dB entre laboratório e campo; juntas filetadas prejudicaram o desempenho; preenchimento com vermiculita elevou R_w em até 3 dB.
Interpretação		Discussão das falhas de execução e suas implicações na conformidade com a NBR 15575-4.	Execução inadequada compromete o desempenho; juntas totalmente preenchidas e blocos íntegros garantem conformidade; necessidade de controle de qualidade em obra.

Tabela 5: Síntese da aplicação da metodologia em Fratel Junior et al. [2020].

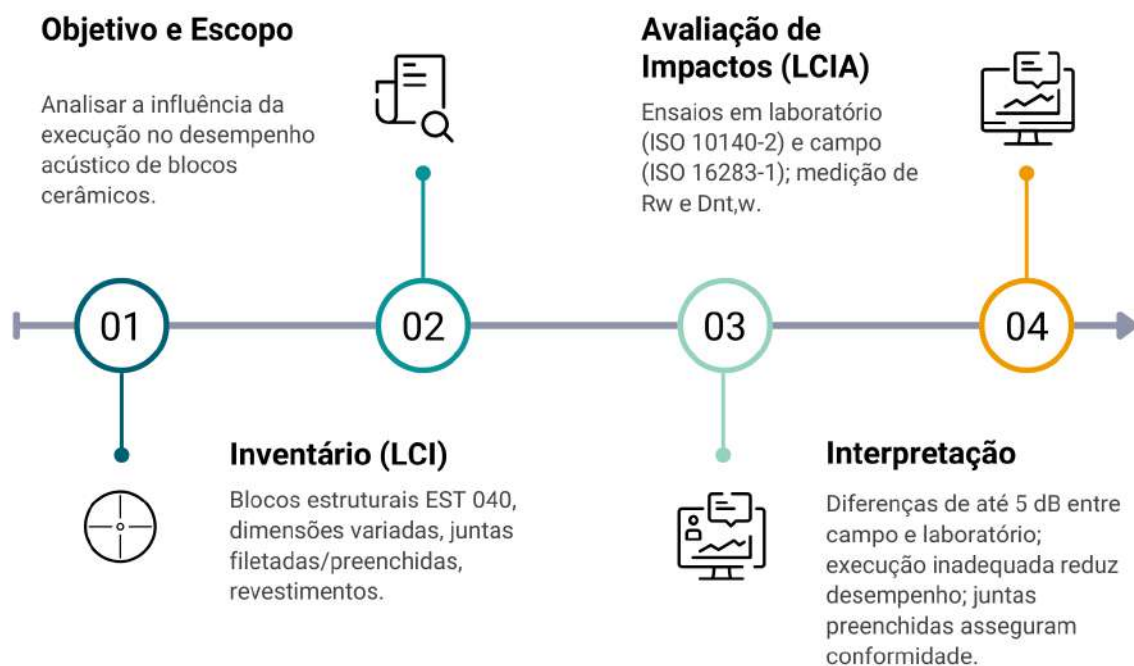


Figura 5: Fluxograma

4.6 Avaliação do Ciclo de Vida de tijolos cerâmicos em duas unidades produtivas

O estudo de Gomes (2012) apresenta uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa de tijolos cerâmicos produzidos por duas unidades industriais localizadas no estado de Santa Catarina, denominadas A e B. A pesquisa insere-se no contexto da crescente preocupação ambiental associada à indústria cerâmica, cuja cadeia produtiva é intensiva em energia e responsável por emissões relevantes de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. O trabalho teve como principal objetivo identificar os estágios do processo com maior contribuição aos impactos ambientais, fornecendo subsídios técnicos para a melhoria do desempenho ambiental da produção de tijolos e, por consequência, das edificações que os utilizam.

A unidade funcional adotada foi 1 m^2 de parede de tijolos cerâmicos com camada de argamassa de 1,5 cm, o que permite relacionar os resultados diretamente a aplicações construtivas típicas. O limite do sistema foi definido como *cradle-to-gate* (do berço ao portão), abrangendo desde a extração da argila até o embarque do produto final no pátio da fábrica. O estudo não incluiu as etapas de transporte até o canteiro ou uso na edificação, pois o foco era compreender os impactos associados exclusivamente à fase de produção industrial. Essa abordagem está em conformidade com as diretrizes da NBR ISO 14040 e 14044, priorizando a caracterização de processos industriais e comparações entre sistemas produtivos.

Os dados do inventário foram coletados diretamente nas plantas das duas empresas, em operação regular. As etapas do processo consideradas incluíram: extração e preparação

da argila, mistura e conformação por extrusão, secagem, queima e embalagem. Foram quantificados os insumos e emissões correspondentes a 1 m² de parede: argila ($\approx$ 130 kg), água, energia elétrica, diesel e, especialmente, a serragem utilizada como combustível nos fornos de queima, principal elemento de distinção e impacto ambiental entre as empresas. As emissões atmosféricas monitoradas incluíram CO₂, CO, NO₂ e vapores d'água, além de perdas por quebra durante o processo de queima e resíduos sólidos (cinzas). A água de processo foi em parte recirculada, retornando ao sistema após tratamento para moagem da argila, o que reduziu o consumo de água limpa de fontes naturais.

A empresa A produzia tijolos com seis furos (19,5 × 17,0 × 12,0 cm), queimados em forno tipo garrafa, utilizando serragem como combustível. Já a empresa B utilizava um forno túnel contínuo, também alimentado por serragem, mas com maior eficiência térmica e controle de emissões. A unidade funcional correspondia a 35,76 tijolos para a empresa A e 32,18 tijolos para a empresa B. Esse detalhamento permitiu comparar sistemas com tecnologias distintas, mas produtos equivalentes, o que torna a análise representativa da indústria cerâmica de Santa Catarina.

A modelagem da ACV foi realizada no software *SimaPro 7.2*, empregando o método *Eco-indicator 99*, que agrupa as categorias de impacto em três grandes áreas de dano: *Saúde Humana*, *Qualidade do Ecossistema* e *Recursos*. As categorias específicas consideradas foram: carcinogênicos, efeitos respiratórios (orgânicos e inorgânicos), mudanças climáticas, ecotoxicidade, acidificação/eutrofização, uso do solo, radiação e depleção de combustíveis fósseis e minerais. A escolha do *Eco-indicator 99* permitiu integrar diferentes efeitos ambientais em uma escala de pontos normalizada (mPt), o que facilitou a comparação direta entre os sistemas A e B.

Os resultados evidenciaram que o combustível utilizado nos fornos é o principal ponto crítico de impacto em ambas as empresas. A queima da serragem foi responsável pela maior parte das emissões atmosféricas e apresentou forte influência nas categorias de *Saúde Humana* e *Mudança Climática*, devido à liberação de CO₂ e compostos orgânicos voláteis. A empresa A, que utilizava forno tipo garrafa, mostrou danos ambientais totais superiores à empresa B, sobretudo por apresentar menor eficiência energética e maior consumo de combustível por unidade de produção. Em termos absolutos, a empresa A emitiu aproximadamente 41,9 kg de CO₂ por 1 m² de parede, enquanto a empresa B registrou cerca de 21,4 kg de CO₂, uma redução próxima de 50%. Esse diferencial evidencia o papel determinante do tipo de forno e do controle operacional sobre os resultados de impacto ambiental.

As análises de ponderação do método *Eco-indicator 99* mostraram que a categoria *Saúde Humana* concentrou os maiores danos, seguida por *Qualidade do Ecossistema*. A predominância dos impactos sobre a saúde humana se explica pela emissão de gases tóxicos, partículas e compostos orgânicos oriundos da combustão incompleta da serragem. A categoria de recursos foi menos representativa, pois o consumo de energia elétrica e diesel

teve contribuição relativamente menor. A diferença entre as empresas, nesse caso, reflete não apenas a eficiência energética, mas também a modernização dos sistemas de secagem e a melhor recuperação de calor do forno túnel da empresa B.

A etapa de interpretação reforçou que a substituição do combustível dos fornos por gás natural poderia reduzir significativamente os impactos ambientais em todas as categorias analisadas, principalmente no que se refere às emissões atmosféricas e aos efeitos respiratórios. O uso do gás natural implicaria uma redução substancial das emissões de material particulado e compostos orgânicos voláteis, melhorando a qualidade do ar e diminuindo os danos associados à saúde humana. Além disso, a modernização dos sistemas de combustão e o aproveitamento de calor residual foram apontados como estratégias viáveis para elevar a eficiência energética do processo cerâmico.

Outro aspecto relevante é que, embora o estudo tenha adotado fronteira *cradle-to-gate*, as conclusões podem orientar ações de sustentabilidade mais amplas na cadeia da construção civil. A identificação de “hotspots” no processo produtivo permite priorizar intervenções de maior retorno ambiental, como o redesenho dos fornos, o controle de emissões e a gestão de resíduos sólidos e aquosos. O estudo também fornece uma base de dados consistente para o desenvolvimento de declarações ambientais de produto (EPD) e programas de rotulagem ambiental no setor cerâmico brasileiro.

Em síntese, Gomes (2012) concluem que a queima com serragem é o principal fator de impacto na produção de tijolos cerâmicos, afetando predominantemente a categoria *Saúde Humana*. A empresa A apresentou desempenho ambiental inferior à B, destacando a importância da eficiência dos sistemas de queima. A substituição da serragem por gás natural, associada a melhorias de controle e recuperação de energia, foi apontada como medida prioritária para reduzir os impactos. O trabalho, além de pioneiro no contexto nacional, demonstra a aplicabilidade prática da ACV como ferramenta estratégica para tomada de decisão e planejamento ambiental no setor cerâmico.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Comparar o desempenho ambiental de duas unidades produtoras de tijolos cerâmicos (A e B) com fronteira <i>cradle-to-gate</i> , adotando 1 m ² de parede como unidade funcional.	Sistema abrange da extração da argila ao embarque; foco em emissões e consumo energético da fase produtiva.
Inventário (LCI)		Dados primários coletados nas fábricas; insumos: argila, água (com recirculação), serragem (combustível), diesel e eletricidade; emissões de CO ₂ , CO, NO ₂ , vapores e perdas por quebra.	Inventário normalizado por 1 m ² ; empresa A: forno tipo garrafa; empresa B: forno túnel contínuo; maior eficiência energética em B.
Avaliação de Impactos (LCIA)		<i>SimaPro 7.2</i> com método <i>Eco-indicator 99</i> ; categorias: Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema e Recursos.	Queima com serragem domina todas as categorias; Saúde Humana apresenta os maiores danos; A emite 41,9 kg CO ₂ , B emite 21,4 kg CO ₂ .
Interpretação		Identificação de “hotspots” e medidas de mitigação.	Substituição da serragem por gás natural recomendada; ganhos de eficiência energética e redução de emissões em todas as categorias.

Tabela 6: Síntese da aplicação da metodologia em Gomes et al. [2012].



Figura 6: Fluxograma

4.7 Avaliação do Ciclo de Vida de blocos cerâmicos com alperujo (resíduo da extração de azeite)

O estudo de Lopez (2021) realiza uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre blocos cerâmicos convencionais e blocos produzidos com adição de *alperujo*, um resíduo orgânico gerado durante a extração do azeite de oliva. Esse subproduto representa cerca de 80 % do volume processado nas olivícolas e constitui um passivo ambiental relevante, geralmente destinado a aterros ou utilizado como combustível de baixo valor energético. A pesquisa insere-se no contexto da economia circular europeia, buscando demonstrar o potencial de valorização de resíduos agroindustriais como alternativa à extração de recursos minerais não renováveis, reduzindo a pressão sobre o meio ambiente e a dependência de matérias-primas virgens.

O objetivo principal foi quantificar os impactos ambientais da incorporação de diferentes proporções de alperujo (3 %, 7 % e 10 %) em substituição parcial à argila natural. A análise considerou uma unidade funcional de 1 kg de tijolo e uma fronteira do sistema definida como *cradle-to-gate* (do berço ao portão), contemplando todas as etapas desde a extração das matérias-primas até a saída do produto da fábrica. O horizonte temporal adotado foi de 100 anos, em conformidade com as normas ISO 14040 e 14044, assegurando comparabilidade e transparência metodológica.

Os blocos analisados apresentavam dimensões médias de 117 × 28 × 17 mm e foram sinterizados a 850°C, temperatura identificada como ideal para garantir propriedades físico-mecânicas adequadas. Foram comparados quatro cenários: o bloco convencional (0 % de alperujo) e três alternativas contendo 3 %, 7 % e 10 % de substituição em massa. O

limite do sistema incluiu as etapas de extração, transporte e fabricação, excluindo as fases de uso e fim de vida, de modo a isolar os efeitos do processo produtivo.

O inventário do ciclo de vida foi desenvolvido no software *SimaPro 8.3* utilizando a base de dados *Ecoinvent v3*. Foram contabilizadas entradas de argila, alperujo, água, calcário, cal, areia, combustíveis fósseis (óleo leve e pesado), gás natural e eletricidade. Também foram incluídas as emissões atmosféricas resultantes da combustão e da transformação térmica dos materiais, destacando-se CO₂, NO_x, SO₂, HF e HCl. Os fluxos elementares ajustados para 1 kg de tijolo mostraram que a fase de fabricação concentra a maior parte do consumo energético e das emissões diretas, enquanto as etapas de extração e transporte representam uma fração reduzida (entre 1 % e 5 %) do impacto global.

A avaliação de impactos seguiu duas metodologias complementares: o método IPCC 100 anos, empregado para estimar o potencial de aquecimento global (GWP), e o método CML 2000 v2.05, que abrange categorias adicionais como depleção de recursos abióticos, acidificação, eutrofização, toxicidades humana e ecotoxicológica, depleção da camada de ozônio e oxidação fotoquímica. O primeiro fornece equivalentes de CO₂, enquanto o segundo amplia a compreensão dos efeitos ambientais a partir de múltiplos indicadores.

Os resultados indicaram que o GWP do tijolo convencional foi de aproximadamente 260 kg CO₂eq t⁻¹, valor compatível com a literatura para produtos cerâmicos similares. A adição de alperujo, no entanto, elevou o GWP de forma significativa: cerca de +19 % para 3 %, +44 % para 7 % e +63 % para 10 % de substituição. Apesar desse aumento expressivo, algumas categorias do método CML 2000 apresentaram melhorias, notadamente na depleção de recursos abióticos, na depleção da camada de ozônio e na ecotoxicidade terrestre. Esses ganhos estão relacionados à redução do uso de argila virgem e ao aproveitamento de um resíduo agroindustrial que, de outra forma, seria descartado. Por outro lado, foram observados agravamentos em acidificação, eutrofização e toxicidade aquática, decorrentes das emissões de compostos nitrogenados e clorados durante a queima do alperujo, que é altamente orgânico e tende a liberar maiores quantidades de gases ácidos quando incinerado.

Em todos os cenários, a fase de fabricação respondeu por mais de 90 % do GWP total, confirmando-se como a etapa crítica do ciclo de vida dos blocos cerâmicos. A queima, aliada ao uso de gás natural e eletricidade, representou o principal vetor de emissões, enquanto as fases de extração e transporte contribuíram com menos de 6 %. A substituição parcial da argila por alperujo trouxe pequenas reduções nessas fases iniciais, mas não foi suficiente para compensar o aumento de emissões na etapa de sinterização.

A análise comparativa evidencia que a utilização do alperujo tem um efeito ambíguo: embora contribua para o reaproveitamento de resíduos e reduza o consumo de recursos minerais, sua decomposição durante o processo de queima gera emissões adicionais de CO₂ e NO_x, o que anula os benefícios potenciais no balanço global. O caráter altamente orgânico do resíduo confere certa liberação exotérmica, diminuindo ligeiramente o consumo

energético do forno, mas o ganho é marginal frente ao aumento das emissões gasosas.

Dessa forma, o estudo conclui que o aproveitamento do alperujo em blocos cerâmicos não resulta em melhora ambiental global, sendo recomendável limitar sua fração a níveis muito baixos (inferiores a 3 %) ou direcioná-lo para outras aplicações industriais, como combustível alternativo em fornos de cimento. Os autores destacam que o uso de fontes energéticas renováveis e a modernização dos sistemas de queima poderiam alterar esse cenário, reduzindo o impacto climático da produção cerâmica.

A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre o papel dos resíduos agroindustriais na indústria cerâmica e reforça que a simples substituição de matéria-prima não garante um desempenho ambiental melhor. A eficiência energética dos processos e a natureza das emissões atmosféricas continuam sendo fatores determinantes para alcançar resultados sustentáveis.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Es-copo		Comparar blocos cerâmicos tradicionais e blocos com 3–10 % de alperujo (<i>cradle-to-gate</i> , 1 kg, 100 anos).	Foco na substituição parcial da argila por resíduo agroindustrial; amostras sinterizadas a 850 °C.
Inventário (LCI)		Modelagem no <i>SimaPro 8.3</i> com base <i>Ecoinvent v3</i> ; insumos de argila, alperujo, energia elétrica, gás natural e combustíveis fósseis; emissões de CO ₂ , NO _x , SO ₂ , HF e HCl.	Fabricação = principal etapa emissora; extração e transporte < 6 % do total.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Métodos IPCC (100 anos) e CML 2000 v2.05 (múltiplas categorias ambientais).	GWP aumentou até 63 % (10 % alperujo); ganhos em depleção de recursos e ozônio; perdas em acidificação e toxicidade aquática.
Interpretação		Balanço entre benefícios locais e prejuízos globais; identificação da fase crítica de fabricação.	Fabricação responde por > 90 % do GWP; benefícios limitados; substituição com alperujo aumenta o impacto climático total.

Tabela 7: Síntese da aplicação da metodologia em López-García et al. [2021].



Figura 7: Fluxograma

4.8 ACV de sistemas de fechamento vertical no Brasil

O estudo de Horta (2023) aplica a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas da série ISO 14040 e 14044, para comparar o desempenho ambiental de três sistemas de fechamento vertical amplamente utilizados na construção civil brasileira: alvenaria de tijolo cerâmico (CB_r), alvenaria de bloco de concreto (CB_k) e alvenaria de blocos estruturais (SB_k). A pesquisa busca compreender como diferentes tecnologias e materiais empregados na vedação de fachadas afetam o consumo de recursos naturais, a geração de emissões e os impactos ambientais associados à construção de edificações.

A unidade funcional adotada foi 1 m² de parede externa acabada, e a fronteira do sistema abrangeu as etapas de fabricação dos insumos, transporte até o canteiro e execução da alvenaria em obra. Assim, a análise contempla desde a extração das matérias-primas até a montagem da parede, mas não inclui a fase de uso ou descarte, uma vez que o foco é comparar as alternativas construtivas no momento da execução.

Os dados primários foram obtidos junto a fabricantes e construtoras da região metropolitana de Belo Horizonte (MG), garantindo representatividade para as condições produtivas e logísticas brasileiras. Foram considerados insumos como cimento CP-III (contendo até 70 % de escória de alto-forno), aço, concreto, argamassas e blocos. Esse tipo de cimento foi escolhido por seu caráter mais sustentável, já que a substituição parcial do clínquer por escória reduz significativamente as emissões associadas ao processo de calcinação. O inventário, elaborado no software *OpenLCA 1.10.2* com base no banco *ELCD v3.2*, incluiu fluxos de energia, consumo de combustível, transporte rodoviário, emissões atmosféricas e geração de resíduos sólidos. Cada sistema analisado apresentou cerca de 95 entradas e

mais de 400 saídas elementares, entre matérias-primas, energia, água e resíduos.

A etapa de transporte foi considerada com distância média de 30 km, predominando o uso de caminhões a diesel, e o perfil energético da região baseou-se no mix elétrico brasileiro, composto em grande parte por fontes renováveis. Esse fator confere aos resultados uma característica diferenciada em relação a estudos internacionais, nos quais o uso de energia fóssil é mais intenso.

A avaliação de impactos foi conduzida segundo o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), abrangendo 17 categorias ambientais, como potencial de aquecimento global (GWP), acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicológica, escassez de recursos e uso de água. Para verificar a robustez dos resultados, foi aplicada uma análise de sensibilidade com o método ILCD 2011 Midpoint+, que adota fatores de caracterização e normalização distintos. Essa comparação permitiu avaliar o quanto as conclusões dependiam da metodologia escolhida e se o comportamento relativo entre os sistemas se mantinha.

Os resultados mostraram que o sistema SBk, baseado em blocos estruturais de concreto, apresentou o melhor desempenho ambiental geral nas três principais áreas de proteção avaliadas: *recursos naturais*, *saúde humana* e *ecossistemas*. Essa superioridade está associada ao menor consumo de concreto e argamassa, ao uso de blocos de maior resistência mecânica, que reduzem o volume total de material, e à presença do cimento CP-III, que contribui para uma menor emissão de CO₂ na produção. Já o sistema CBk também demonstrou bom desempenho, destacando-se particularmente na categoria *uso de água*, por demandar menor quantidade de eletricidade e apresentar um processo de cura mais simples, reduzindo o consumo hídrico por metro quadrado de parede.

Em contrapartida, o sistema CBr, de tijolos cerâmicos, mostrou os maiores impactos em praticamente todas as categorias ambientais. A etapa de queima nas olarias é intensiva em energia térmica e gera emissões significativas de gases como CO₂, SO₂ e material particulado, o que compromete o desempenho ambiental do sistema, mesmo considerando que o tijolo é um material tradicionalmente associado à durabilidade. Além disso, a necessidade de argamassa em maior proporção durante a execução aumenta o consumo de cimento e, portanto, a pegada de carbono da parede final.

Entre as categorias avaliadas, o potencial de aquecimento global (GWP) apresentou forte influência do cimento e do aço, responsáveis em conjunto por mais de 60 % das emissões totais. O sistema SBk, ainda que utilize vergalhões estruturais, apresentou menor massa total de material por metro quadrado de parede, compensando a contribuição do aço e reduzindo o impacto final. O consumo de água, por sua vez, mostrou variação mais pronunciada: o CBk apresentou resultados cerca de 20 % inferiores aos demais sistemas, evidenciando uma vantagem significativa na gestão hídrica da produção.

A análise comparativa entre os métodos ReCiPe e ILCD mostrou elevada consistência, com diferenças inferiores a 5 % nas categorias mais relevantes. Essa estabilidade metodo-

lógica reforça a confiabilidade dos resultados e a conclusão de que o SBk representa uma alternativa construtiva mais sustentável sob as condições brasileiras.

Os autores ressaltam ainda que as principais oportunidades de melhoria no ciclo de vida das vedações verticais residem na escolha de cimentos com menor teor de clínquer, no uso racional de argamassas e na otimização do transporte de insumos. O estudo demonstra que a substituição de matérias-primas tradicionais por subprodutos industriais, como a escória de alto-forno, é uma estratégia eficaz para reduzir os impactos ambientais sem comprometer o desempenho técnico. Por fim, destaca-se que o contexto energético predominantemente renovável do Brasil confere uma vantagem comparativa importante às soluções de base cimentícia quando comparadas a realidades de países com matriz fóssil.

Em síntese, o sistema SBk foi identificado como o de melhor desempenho ambiental global, seguido pelo CBk, que se destaca em eficiência hídrica. O CBr apresentou os maiores impactos, sobretudo na fase de queima e nas emissões atmosféricas associadas. As conclusões são robustas e indicam caminhos concretos para a redução da pegada ambiental das edificações, tanto pela escolha de materiais quanto pela gestão mais eficiente do ciclo produtivo.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Comparar CBr, CBk e SBk em 1 m ² de parede externa, incluindo fabricação, transporte e execução em obra.	Análise regionalizada em Belo Horizonte; foco nas fases iniciais do ciclo de vida.
Inventário (LCI)		Modelagem no <i>OpenLCA 1.10.2</i> com base ELCD 3.2; insumos de cimento CP-III, aço, argamassa e blocos; transporte médio 30 km.	95 entradas e 435 saídas por sistema; influência positiva do mix elétrico renovável (83
Métodos ReCiPe 2016 e ILCD 2011 Midpoint+ para validação.		SBk melhor em recursos, saúde humana e ecossistemas; CBk mais eficiente no uso de água; CBr com maior GWP.	Avaliação de Impactos (LCIA)
Interpretação		Síntese de resultados e recomendações práticas.	Resultados consistentes entre métodos; principais impactos ligados ao cimento e ao aço; priorizar cimentos com escória e menor consumo de argamassa.

Tabela 8: Síntese da aplicação da metodologia em Horta et al. [2023].

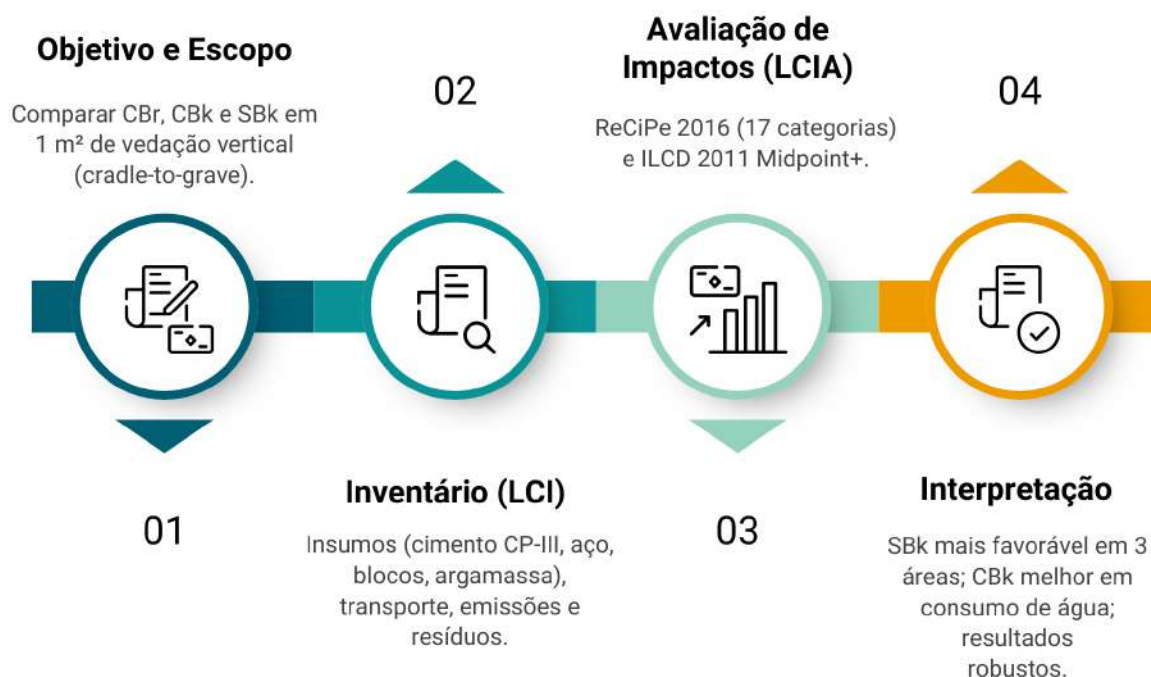


Figura 8: Fluxograma

4.9 Influência do transporte nos impactos ambientais de materiais de construção

O estudo de Estokova (2023) aplica a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar os impactos ambientais associados tanto à produção de materiais de construção quanto ao seu transporte até o canteiro de obras. A análise segue as diretrizes da ISO 14040/44 e da norma europeia EN 15804, com foco em uma residência unifamiliar em alvenaria. A unidade funcional adotada é o próprio edifício, cuja massa total de materiais é de aproximadamente 448 toneladas. As fronteiras do sistema incluem os módulos A1–A3, que cobrem as etapas de extração de matérias-primas, processamento e fabricação dos materiais de construção, e o módulo A4, que corresponde ao transporte desses materiais até o canteiro. Distâncias de transporte entre 5 km e 150 km foram modeladas, considerando caminhões padrão EURO 5 movidos a diesel e gasolina. Estokova (2023) deixa claro que a motivação central do estudo é ampliar o escopo de ACVs tradicionais, que frequentemente param no portão da fábrica (*cradle-to-gate*), e demonstrar que a etapa logística pode alterar de forma relevante o balanço ambiental global da obra.

O inventário de ciclo de vida (LCI) foi construído a partir de um detalhamento das massas e tipologias de materiais empregados em cada subsistema construtivo da residência analisada. As fundações são compostas por blocos e tiras de concreto armado, com uso de agregados como material de apoio sob a base; as paredes e demais elementos verticais utilizam alvenaria portante de concreto celular autoclavado (blocos de concreto aerado), faixas asfálticas e coroamentos de concreto armado; os elementos horizontais incluem lajes em concreto armado, perfis de aço e contrapisos cimentícios; a cobertura é executada

com estrutura de madeira e telha cerâmica, além de fitas e componentes metálicos; e o isolamento térmico recorre a placas de EPS, XPS e lã mineral com diferentes espessuras. Esse inventário também registra insumos energéticos (eletricidade considerando a matriz elétrica da Eslováquia), insumos auxiliares e perdas. O levantamento ignora esquadrias e vedações transparentes, mas inclui materiais de alta massa (por exemplo fundações e lajes) e materiais de alta intensidade ambiental (por exemplo isolantes poliméricos). As massas alimentam o software SimaPro 9.3, com dados de inventário provenientes do banco Ecoinvent para as fases A1–A3, e são associadas a cenários de transporte rodoviário em A4 descritos por rotas de caminhões a diesel e gasolina em distâncias progressivas entre fornecedores e canteiro.

A avaliação de impactos (LCIA) utilizou o método ReCiPe 2016 em nível de midpoint para caracterizar diversas categorias ambientais, incluindo potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential*, GWP), depleção da camada de ozônio (*Ozone Depletion Potential*, ODP), formação fotoquímica de ozônio troposférico (*Photochemical Ozone Creation Potential*, POCP), acidificação (*Acidification Potential*, AP), eutrofização (*Eutrophication Potential*, EP), depleção de recursos abióticos tanto minerais/metálicos quanto fósseis (*Abiotic Depletion Potential*, ADP) e uso de água (*Water Deprivation Potential*, WDP). Para o módulo A4 (transporte), além dessas categorias, o estudo quantifica também material particulado emitido durante o deslocamento dos caminhões, de forma a capturar efeitos adicionais de poluição atmosférica associados à logística. A modelagem faz distinção entre o impacto intrínseco aos materiais em si (módulos A1–A3) e a contribuição adicional trazida pelo deslocamento desses materiais até a obra (A4), permitindo medir quanto da pegada ambiental total do edifício está ligada apenas ao transporte.

Os resultados mostram, primeiro, a distribuição interna dos impactos ambientais ao longo dos diferentes subsistemas construtivos considerando apenas a fase de produto (A1–A3). No potencial de aquecimento global (GWP), por exemplo, as maiores contribuições são associadas ao isolamento térmico (29% do total) e às fundações (25%), seguidas pelas estruturas verticais (19%), horizontais (16%) e cobertura (11%). A alvenaria estrutural de concreto celular autoclavado aparece como o maior emissor individual de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), respondendo por cerca de 16% do GWP total, seguida pelas faixas de fundação (13%) e pela lã mineral (10%). Já no potencial de depleção da camada de ozônio (ODP), o comportamento é bastante diferente: os materiais de isolamento térmico dominam quase integralmente essa categoria, representando cerca de 91% do impacto total, com placas de XPS respondendo por aproximadamente 45% e placas de EPS por 44%, enquanto fundações, paredes, lajes e cobertura participam apenas de forma residual. No caso da formação fotoquímica de ozônio (POCP), as fundações assumem o papel mais crítico (cerca de 30% da contribuição total), seguidas pelas estruturas verticais (22%) e horizontais (20%), enquanto isolamentos e cobertura apresentam participações menores nessa categoria. Em acidificação (AP), destacam-se as estruturas verticais (29%)

e os isolamentos (32%), com contribuição relevante da alvenaria de concreto celular (24%) e da lã mineral (22%). Em eutrofização (EP), os maiores contribuintes são as estruturas horizontais e a cobertura, ambas com cerca de 32% do impacto total, com papel importante do contrapiso cimentício (aproximadamente 17%) e da telha cerâmica (cerca de 16%). Para a depleção de recursos abióticos minerais e metálicos, as estruturas horizontais concentram 96% do impacto, associadas principalmente ao uso de aço (responsável por cerca de 58% dessa categoria), enquanto nas categorias ligadas a recursos fósseis o isolamento térmico assume metade da carga ambiental (aprox. 50%), seguido pelas estruturas horizontais (30%) e pelas fundações (19%). Por fim, no uso de água (WDP), a cobertura e as estruturas horizontais são particularmente relevantes, com participações de cerca de 37% e 25%, respectivamente; elementos de madeira da cobertura e a telha cerâmica aparecem entre os maiores consumidores indiretos de água ao longo do ciclo de vida modelado. Esses resultados reforçam que o impacto ambiental não é concentrado apenas “no concreto” ou “no aço”, mas é distribuído por diferentes sistemas construtivos e materiais específicos, dependendo da categoria analisada.

Em seguida, Estokova (2023) amplia a análise incluindo explicitamente o módulo A4 (transporte dos materiais até o canteiro), que é muitas vezes tratado como secundário em estudos de ACV na construção civil. A simulação mostra que o transporte exerce influência significativa sobre várias categorias ambientais, especialmente quando as distâncias entre fornecedores e obra chegam a 150 km. Nessa condição, o transporte responde por aproximadamente 16% do potencial total de aquecimento global (GWP) do edifício, o que significa que quase um sexto da contribuição climática de toda a construção pode estar associado apenas à logística de entrega de materiais. O efeito é ainda mais marcante na depleção de recursos abióticos, onde o transporte alcança cerca de 53,5% do impacto total, tornando-se a principal fonte dessa categoria ambiental no cenário analisado. O transporte também contribui de maneira expressiva para acidificação e formação fotoquímica de ozônio (entre 15% e 18% do total nessas categorias), além de participar de forma relevante na emissão de material particulado e no potencial de eutrofização. Em média, considerando os cenários de distância avaliados, o transporte representa em torno de 13,2% do GWP total do edifício, valor que cresce conforme aumenta a distância percorrida. Esse comportamento crescente é consistente: quando a distância de entrega passa de 5 km para 150 km, certos indicadores praticamente multiplicam sua relevância (por exemplo, a depleção de recursos abióticos chega a aumentar até 2,3 vezes, a formação fotoquímica de ozônio aumenta cerca de 1,8 vez e efeitos ligados à eutrofização aumentam cerca de 1,6 vez).

Por fim, a interpretação proposta pelos autores destaca duas implicações principais. Primeiro, materiais distintos dominam categorias de impacto diferentes: isolantes poliméricos são críticos para ODP e para categorias ligadas a recursos fósseis; sistemas estruturais de alta massa, como fundações e alvenaria portante de concreto celular autoclavado, pesam fortemente em GWP, acidificação e formação fotoquímica de ozônio; elementos

que incorporam aço concentram praticamente toda a pressão sobre recursos minerais e metálicos. Segundo, o transporte deixa de ser apenas um “detalhe logístico” e passa a ser um hotspot ambiental propriamente dito, especialmente para categorias associadas ao consumo de combustíveis fósseis e à extração de recursos abióticos. No cenário de 150 km, por exemplo, o transporte sozinho responde por mais da metade da depleção de recursos abióticos totais da obra, e por até 16% do aquecimento global total, mostrando que decisões como escolher fornecedores mais próximos, otimizar rotas logísticas ou trocar modal de transporte podem ter impacto ambiental comparável ao de otimizações no próprio material construtivo. Em termos de recomendações, o estudo sugere que estratégias de redução de impacto ambiental na construção precisam considerar simultaneamente a escolha do material (massa, composição, presença de cimento, uso de polímeros, etc.) e a estratégia logística de fornecimento, pois ambas as dimensões podem alterar significativamente a pegada ambiental global do edifício.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Residência unifamiliar em alvenaria; avaliação dos módulos A1–A3 (produção) e A4 (transporte), conforme EN 15804. Unidade funcional: edifício com ≈ 448 t de materiais.	Transporte modelado entre 5 e 150 km por caminhão EURO 5 (diesel/gasolina); foco explícito na influência logística sobre a pegada ambiental total.
Inventário (LCI)		Quantificação de massas por subsistema (fundações, elementos verticais em concreto celular autoclavado, horizontais em concreto e aço, cobertura em madeira e telha cerâmica, isolamentos em EPS/XPS/lã mineral); consumo energético e matriz elétrica local; dados Ecoinvent no SimaPro 9.3.	Impactos de cada subsistema mapeados por categoria: por exemplo, isolamento domina ODP ($\sim 91\%$); estruturas horizontais dominam depleção de minerais/metais ($\sim 96\%$); fundações e isolamento lideram GWP (25% e 29%).
Avaliação de Impactos (LCIA)		Método ReCiPe 2016 (midpoint); categorias como GWP, ODP, POCP, AP, EP, ADP e WDP; análise separada de A1–A3 e A4.	Em GWP (A1–A3): isolamento 29%, fundações 25%, alvenaria de concreto celular $\sim 16\%$ do total. Em ODP: isolantes (XPS 45%, EPS 44%) $\sim 91\%$ do total.
Interpretação		Identificação de hotspots materiais e logísticos.	No cenário de 150 km, transporte responde por $\sim 16\%$ do GWP total e $\sim 53,5\%$ da depleção de recursos abióticos; transporte também contribui 15–18% em acidificação e formação fotoquímica de ozônio.

Tabela 9: Síntese da aplicação da metodologia em Eštoková et al. [2023].

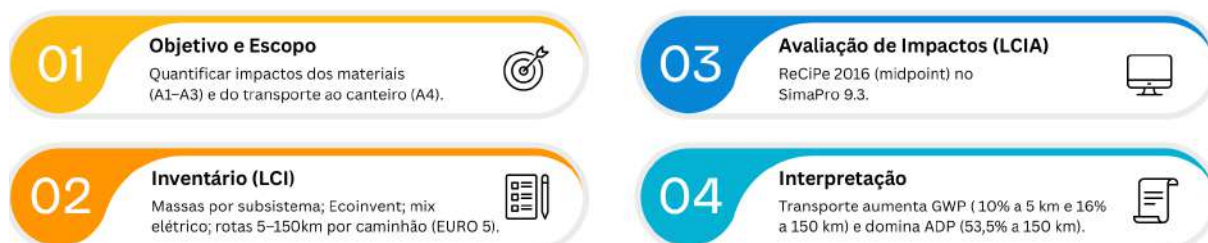


Figura 9: Fluxograma

4.10 ACV de blocos cerâmicos com adição de lodo de ETA

O estudo de Santos (2024) aplicou a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para blocos cerâmicos produzidos com argila e lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), com o objetivo de quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) e a demanda de energia primária em diferentes proporções de substituição de argila por lodo (0–100%, em intervalos de 10%). A unidade funcional foi um bloco cerâmico do tipo VED15 ($9 \times 19 \times 19$ cm).

A análise incluiu também o método de desidratação do lodo, por centrífuga ou filtro prensa, devido ao impacto direto sobre os resultados ambientais. Foram considerados os processos de extração da argila e do lodo, transporte (até 30 km), desidratação e mistura, modelados por meio do sistema Sidac (*Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção*).

O Sidac manteve os princípios da ACV, mas de forma simplificada: calculou apenas dois indicadores de inventário, emissões de CO_2 e energia primária, sem realizar a etapa completa de avaliação de impacto. Os dados incluíram insumos de energia elétrica, matérias-primas e transporte.

Os resultados mostraram que a substituição parcial de argila por lodo é ambientalmente viável. A mistura TA90L10 (90% argila, 10% lodo) apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho técnico e impacto ambiental, sendo considerada a proporção ideal. O filtro prensa apresentou melhor desempenho que a centrífuga, reduzindo em média 5% das emissões de CO_2 e 14% da energia primária. Misturas com maiores teores de lodo aumentaram os impactos ambientais, sobretudo quando desidratadas por centrífuga. Assim,

a escolha adequada do processo de secagem e de teores moderados de lodo é essencial para otimizar a sustentabilidade da produção.

Fase ISO 14040/44	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo	Avaliar emissões de CO ₂ e demanda energética na produção de blocos cerâmicos com lodo de ETA.	Comparação entre proporções (0–100%) e métodos de secagem (centrífuga e filtro prensa).
Inventário (LCI)	Modelagem no Sidac; extração e transporte (30 km); desidratação mecânica (centrífuga ou filtro prensa).	Entradas: energia elétrica, argila e lodo. Saídas: CO ₂ e energia primária.
Avaliação de Impactos (LCIA)	Indicadores: CO ₂ (kg/bloco) e energia primária (MJ/bloco).	Análise simplificada, sem multicategorias; comparação direta entre proporções e tecnologias.
Interpretação	Comparação entre misturas e processos.	TA90L10 = melhor equilíbrio; filtro prensa reduziu 5% do CO ₂ e 14% da energia. Proporções elevadas de lodo aumentaram os impactos.

Tabela 10: Síntese da aplicação da metodologia em Santos et al. [2024].

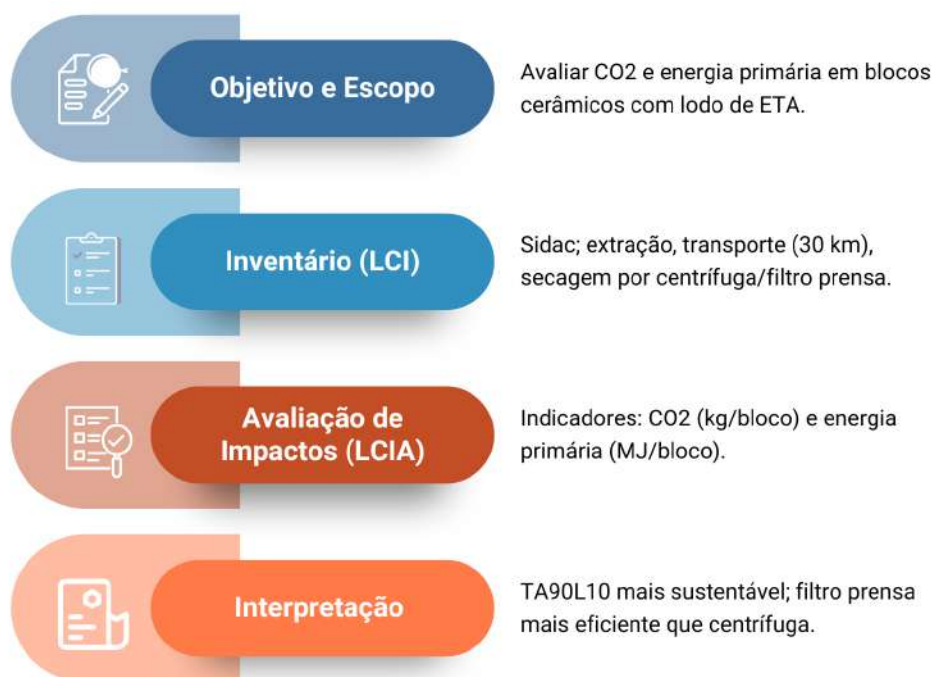


Figura 10: Fluxograma

4.11 Energia e carbono incorporados em materiais de construção

O estudo de Hammond (2008) descreve o desenvolvimento do *Inventory of Carbon and Energy* (ICE), um banco de dados aberto e confiável sobre energia e carbono incorporados em materiais de construção, elaborado pela Universidade de Bath (Reino Unido). O objetivo central foi suprir a carência de dados consistentes e comparáveis para avaliações de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* - LCA) no setor da construção civil, com foco inicial no contexto britânico, mas aplicabilidade internacional. A base foi construída a partir de revisão sistemática de literatura científica, consolidando dados de mais de 250 fontes revisadas por pares e cobrindo aproximadamente 200 materiais de construção.

O ICE foi estruturado para atender a quatro etapas da ISO 14040/44: definição de objetivo e escopo, análise de inventário (LCI), avaliação de impacto (LCIA) e interpretação. Foram definidos critérios rigorosos para inclusão de dados: (1) conformidade com metodologias reconhecidas (preferência por estudos compatíveis com a ISO 14040/44), (2) definição clara de fronteiras do sistema (*cradle-to-site*), (3) origem geográfica dos dados (prioridade ao Reino Unido), (4) atualização temporal e (5) distinção entre emissões energéticas e de processo (por exemplo, CO₂ do clínquer em cimentos).

Os dados foram harmonizados em duas métricas principais: energia incorporada (MJ/kg) e carbono incorporado (kgC/kg), ambos calculados “do berço ao canteiro”. Exemplos típicos incluem concreto comum (0,95 MJ/kg e 0,035 kgC/kg) e tijolos cerâmicos (3 MJ/kg e 0,060 kgC/kg). As maiores variações observadas derivam das diferenças de metodologia, fronteiras e tecnologias de produção, especialmente nos setores de cimento e aço. A abordagem envolveu ajustes para refletir o conteúdo reciclado e o tipo de energia

predominante (carvão, gás natural, eletricidade).

O banco ICE foi validado em 14 estudos de caso reais de edificações residenciais no Reino Unido e nos EUA. Os resultados médios indicaram 5340 MJ/m² de energia incorporada e 110 kgC/m² (equivalente a 403 kgCO₂/m²) de carbono incorporado. Observou-se pouca diferença entre casas e apartamentos, exceto quando consideradas as obras externas (vias e drenagem), que podem representar 22% da energia incorporada total e 19% do carbono.

Os autores concluem que a gestão adequada de materiais e resíduos no canteiro pode reduzir significativamente os impactos de energia e carbono, especialmente no caso do concreto, cujo conteúdo de clínquer e o tipo de combustível do forno influenciam fortemente os resultados. A base ICE tornou-se referência internacional e continua sendo atualizada, servindo a pesquisadores, projetistas e formuladores de políticas de sustentabilidade no ambiente construído.

Fase 14040/44	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
Objetivo e Escopo		Desenvolver o banco de dados ICE para energia e carbono incorporados em materiais de construção (<i>cradle-to-site</i>).	Banco público e revisado por pares, aplicável internacionalmente; cobre 200+ materiais.
Inventário (LCI)		Coleta e harmonização de 250+ fontes; critérios: conformidade ISO, fronteiras claras, origem e idade dos dados.	Materiais: cimento, concreto, tijolos, aço, vidro, madeira; distinção entre energia e emissões de processo.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Conversão e padronização dos dados em MJ/kg e kgC/kg; revisão por especialistas.	Exemplos: concreto (0,95 MJ/kg; 0,035 kgC/kg); tijolos (3 MJ/kg; 0,060 kgC/kg); variações associadas ao clínquer e à queima.
Interpretação		Aplicação em 14 estudos de caso de habitações no Reino Unido e EUA.	Média: 5340 MJ/m ² e 110 kgC/m ² ; concreto e tijolos = maiores contribuintes; resíduos = até 22% da energia incorporada.

Tabela 11: Síntese da aplicação da metodologia em Hammond and Jones [2008].



Figura 11: Fluxograma

4.12 Uptake global de CO₂ por materiais de cimento (1930–2023)

O estudo de Songbin Wu (2024) apresenta uma investigação abrangente sobre o balanço entre as emissões de CO₂ geradas pela produção de clínquer e o sequestro desse mesmo gás pela carbonatação natural de materiais cimentícios ao longo do tempo. A pesquisa cobre o período de 1930 a 2023 e inclui diferentes produtos e subprodutos da cadeia do cimento, como concreto, argamassas, resíduos de construção e o pó de forno de cimento (*Cement Kiln Dust* – CKD). Trata-se de uma das análises mais completas já realizadas nesse campo, combinando amplitude temporal e espacial sem precedentes, ao considerar sete grandes regiões produtoras e consumidoras de cimento. Essa abordagem permitiu compreender não apenas o comportamento global do setor, mas também as diferenças regionais de consumo, durabilidade e potencial de reabsorção de carbono dos materiais.

O objetivo principal foi quantificar o balanço líquido entre as emissões e as absorções de CO₂ da indústria do cimento em escala planetária, avaliando de forma integrada todo o ciclo de vida dos materiais, desde a produção de clínquer até a fase pós-demolição. O modelo desenvolvido pelos autores se fundamenta nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e na metodologia de análise de gases de efeito estufa (GEE), conforme diretrizes do IPCC, e busca responder a uma questão crucial: quanto das emissões de carbono do cimento é compensado ao longo do tempo por processos naturais de carbonatação?

O inventário de dados foi estruturado para abranger todas as principais fontes e fluxos envolvidos na dinâmica do carbono cimentício. Foram incluídos: a produção regional de clínquer e seus fatores de emissão específicos; o uso do cimento em concreto e argamassas com diferentes classes de resistência; o tempo médio de vida útil das estruturas; as taxas

de demolição e reuso; as perdas durante o processo construtivo; e a contribuição do CKD, reconhecido por sua alta capacidade de carbonatação devido à razão área/volume muito elevada. Os dados históricos foram compilados de fontes consolidadas (USGS, UNFCCC, COMTRADE, WBCSD, entre outras) e integrados em um banco com mais de 30 mil registros abertos, disponíveis publicamente no repositório Zenodo.

A modelagem física foi baseada em equações diferenciais de difusão de CO_2 segundo a lei de Fick, considerando parâmetros fundamentais como o coeficiente de difusão (k) e a profundidade de carbonatação (d). Esses parâmetros foram ajustados com base em fatores ambientais, concentração atmosférica de CO_2 , umidade relativa, tipo de exposição, presença de revestimentos e adições minerais, refletindo condições realistas de serviço. O processo de carbonatação foi modelado como um fenômeno contínuo, que se estende por todo o ciclo de vida do concreto e se intensifica após a demolição, quando o material é fragmentado e exposto ao ar. Essa abordagem cumulativa permitiu estimar o sequestro total de carbono em cada estágio: uso, demolição, reuso e descarte.

Para avaliar a sensibilidade e a robustez dos resultados, os autores aplicaram simulações de Monte Carlo recomendadas pelo IPCC, abrangendo 24 variáveis-chave, incluindo teores de clínquer, proporção de CaO , parâmetros cinéticos e taxas regionais de carbonatação. A combinação entre ACV e modelagem probabilística permitiu capturar a variabilidade das condições regionais e fornecer intervalos de confiança robustos para as estimativas globais.

Os resultados apontam que, em 2023, o sequestro anual global por carbonatação alcançou 0,93 GtCO_2/ano , com intervalo de confiança de 0,80 a 1,13 Gt/ano (95 %). O total acumulado no período de 1930 a 2023 foi de 23,89 GtCO_2 , o que equivale a 52,32 % das emissões de processo associadas à produção de clínquer nesse intervalo. Esses resultados reforçam a relevância da carbonatação como mecanismo de mitigação natural, confirmando estimativas de estudos anteriores, situadas entre 43 % e 55 %, mas com maior precisão e granularidade geográfica.

Em termos regionais, a China apresentou a maior taxa acumulada de sequestro (31,7 %), refletindo sua posição dominante na produção e no consumo global de cimento. Em seguida, vieram a Europa e a Eurásia Central (23,6 %) e a América do Norte (14 %). A América Latina e a África contribuíram de maneira mais modesta, devido à menor produção histórica e à prevalência de edificações em alvenaria não estrutural. A análise demonstrou ainda que a maior parte da absorção de carbono ocorre durante o uso das estruturas e na fase pós-demolição, quando há maior área superficial exposta ao ar. O CKD destacou-se como um sumidouro particularmente rápido, pois sua fina granulometria acelera o processo de difusão e reação com o CO_2 .

O modelo revelou que, embora a carbonatação natural compense aproximadamente metade das emissões de processo da indústria do cimento, o balanço líquido ainda é positivo — isto é, as emissões continuam superando a absorção. Mesmo considerando o sequestro natural, o setor permanece responsável por cerca de 7–8 % das emissões antropogênicas

globais. Os autores defendem que políticas públicas voltadas à ampliação do reuso de resíduos de concreto, à extensão da vida útil das estruturas e à substituição parcial do clínquer por materiais pozolânicos de baixo carbono podem aumentar de forma expressiva o potencial de mitigação.

As conclusões do estudo destacam que a carbonatação deve ser reconhecida como um mecanismo natural e relevante de sequestro de CO₂, com papel importante nos inventários nacionais de emissões e absorções. No entanto, sua eficácia depende de fatores estruturais e operacionais, como a durabilidade das edificações, a eficiência dos processos de reciclagem e o grau de exposição do material ao ar. Os autores ressaltam que o aproveitamento desse potencial deve ser complementado por tecnologias de *Carbon Capture and Storage* (CCS), pela otimização do fator clínquer e pela incorporação de cimentos de baixo impacto, para que o setor possa caminhar em direção à neutralidade de carbono.

Além de quantificar a magnitude do sequestro, o estudo fornece uma ferramenta preditiva capaz de ser atualizada anualmente, o que permite acompanhar o desempenho do setor em tempo real e subsidiar políticas de descarbonização. Ao integrar dados regionais detalhados e um modelo físico-químico de alta resolução, o trabalho de Wu et al. (2024) estabelece uma nova referência para a modelagem global das trocas de CO₂ associadas à indústria do cimento — uma das maiores emissoras industriais do planeta.

Fase	ISO	Aplicação no artigo	Resultados principais
14040/44			
Objetivo e Escopo		Quantificar o balanço global entre emissões e absorções de CO ₂ pela indústria do cimento (1930–2023).	Cobertura temporal e geográfica sem precedentes; integração entre emissões e sequestro de CO ₂ em sete regiões.
Inventário (LCI)		Produção de clínquer, fatores regionais, uso em concreto e argamassas, perdas, reuso e CKD.	Fontes: USGS, UNFCCC, COMTRADE, WBCSD; mais de 30 mil registros abertos no Zenodo.
Avaliação de Impactos (LCIA)		Modelo analítico baseado em ACV e simulação de Monte Carlo com 24 variáveis sensíveis.	Sequestro anual: 0,93 GtCO ₂ /ano (2023); acumulado: 23,89 Gt (52,32 % das emissões de processo).
Interpretação		Integração regional, análise de incertezas e recomendações de mitigação.	Carbonatação compensa metade das emissões, mas não atinge neutralidade; CKD é sumidouro rápido; CCS e cimentos alternativos são necessários.

Tabela 12: Síntese da aplicação da metodologia em Wu et al. [2024].

▼ **Objetivo e Escopo**

Quantificar absorção e emissão líquida de CO₂ pela indústria do cimento (1930–2023).

▼ **Inventário (LCI)**

Produção de clínquer, consumo regional, uso em concreto e argamassa, perdas, CKD.



▼ **Avaliação de Impactos (LCIA)**

Modelo analítico de ACV + Monte Carlo; comparação global e regional.

▼ **Interpretação**

52,32% das emissões de processo reabsorvidas; necessidade de estratégias adicionais de mitigação.

Figura 12: Fluxograma

5 Resultados

Após a análise detalhada dos doze estudos selecionados, foi possível consolidar uma visão integrada sobre o desempenho ambiental dos blocos de vedação cerâmicos e de concreto. Este capítulo apresenta a síntese dos principais achados de forma comparativa, evidenciando padrões metodológicos, convergências e divergências entre as pesquisas, bem como as principais fontes de impacto identificadas ao longo do ciclo de vida desses materiais.

5.1 Síntese dos estudos analisados

Os trabalhos revisados aplicaram a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, com o objetivo de avaliar e comparar o desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto utilizados em sistemas de alvenaria. Apesar do alinhamento conceitual, observou-se uma significativa diversidade metodológica entre os estudos, refletida sobretudo na definição das fronteiras de sistema, das unidades funcionais e na escolha dos métodos de avaliação de impacto.

A unidade funcional mais recorrente foi 1 m² de parede executada, o que permite comparações diretas em termos de desempenho construtivo. Contudo, parte dos estudos adotou a massa (1 kg ou 1 tonelada de bloco) como referência, particularmente aqueles voltados à análise de materiais ou processos industriais. Essa diferença de abordagem influenciou a comparabilidade direta entre resultados, exigindo a normalização dos dados e a interpretação relativa das tendências.

Quanto às fronteiras do sistema, predominou o escopo *cradle-to-gate*, que considera as etapas de extração de matérias-primas, beneficiamento, transporte e fabricação. Alguns estudos ampliaram o escopo para *cradle-to-grave*, incluindo transporte até o canteiro, execução, uso e disposição final, como no caso de Horta (2023) e Estokova (2023). Essa ampliação permitiu identificar impactos adicionais, especialmente associados ao transporte e à fase de uso.

Verificou-se também diversidade nas bases de dados utilizadas: o *Ecoinvent* foi a mais frequente, seguido pelo ELCD e bancos regionais, como o Sidac (Brasil). Estudos internacionais como os de Lopez (2021) e Wu (2024) destacaram a importância de utilizar dados primários e de calibrar fatores regionais de energia e transporte, para evitar distorções nos resultados. Essa heterogeneidade metodológica reforça a necessidade de padronização e transparência nas fronteiras e parâmetros adotados.

5.2 Comparação das matérias-primas

A composição dos blocos mostrou-se determinante para o perfil ambiental de cada sistema. Nos blocos de concreto, o cimento Portland, especialmente o clínquer, despontou como o principal hotspot. Sua produção envolve elevadas emissões de CO₂ decorrentes da

descarbonatação do calcário e do consumo de energia térmica nos fornos de clínquer, além de representar grande parcela da energia incorporada total do produto. Estudos como Horta (2023) e Wu (2024) confirmam que o cimento é responsável por até 70% das emissões de todo o ciclo de vida do concreto, sendo, portanto, o fator mais crítico para a mitigação de impactos.

Nos blocos cerâmicos, o impacto está fortemente relacionado ao processo de queima das argilas. A temperatura elevada e a origem do combustível, muitas vezes biomassa não certificada ou lenha de reflorestamento, determinam a magnitude das emissões. Trabalhos como Lopez (2021) e Santos (2024) demonstraram que a substituição parcial da argila por resíduos (como alperujo ou lodo de ETA) pode reduzir o consumo de matéria-prima virgem, mas tende a aumentar o potencial de aquecimento global (GWP) quando a combustão do resíduo eleva as emissões diretas de gases de efeito estufa.

A utilização de adições minerais e resíduos industriais, como escória de alto-forno, cinza volante ou chamote, foi apontada como uma estratégia eficiente para reduzir impactos em ambos os materiais. Essas substituições, ao diminuir a demanda por clínquer ou argila virgem, apresentam benefícios em categorias como depleção de recursos e toxicidade humana. Além disso, estudos recentes indicam que a escolha adequada da matriz energética (biomassa certificada ou eletricidade renovável) exerce papel decisivo na performance ambiental dos blocos cerâmicos.

5.3 Comparação dos impactos ambientais

Os resultados consolidados apontam para um padrão consistente: os blocos de concreto apresentam, em geral, maior Potencial de Aquecimento Global (GWP), enquanto os blocos cerâmicos tendem a concentrar maiores consumos energéticos e impactos associados ao processo térmico. No caso do concreto, o GWP é fortemente influenciado pelo teor de clínquer no cimento e pelo tipo de combustível utilizado na produção. Segundo Wu (2024), a carbonatação natural dos produtos cimentícios pode compensar até 50% das emissões de processo, mas ainda é insuficiente para neutralizar o balanço total do setor.

Nos blocos cerâmicos, o consumo de energia térmica durante a queima é o principal determinante do impacto, podendo representar mais de 90% das emissões do ciclo de vida, conforme observado por Lopez (2021). Esse impacto é agravado quando o combustível é fóssil, mas pode ser mitigado pela adoção de biomassa renovável e tecnologias de queima mais eficientes. Além disso, a substituição de parte da argila por resíduos industriais (como alperujo ou lodo de ETA) traz benefícios em categorias como depleção de recursos e ecotoxicidade terrestre, embora nem sempre resulte em menor GWP.

Em outras categorias de impacto, como acidificação, eutrofização e toxicidade, os resultados variam conforme o tipo de energia empregado e as condições de transporte envolvidas. Em sistemas de concreto, a acidificação está associada principalmente às

emissões de NO_x e SO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis e da produção de clínquer. Já nos blocos cerâmicos, a eutrofização e a toxicidade aquática tendem a ser mais significativas quando há emissão de compostos nitrogenados durante a combustão de materiais orgânicos.

De modo geral, a comparação entre os materiais mostra que: (i) o concreto apresenta maior Potencial de Aquecimento Global (GWP) devido ao clínquer; (ii) a cerâmica demanda mais energia térmica e possui emissões mais difusas; (iii) a eficiência dos fornos e a matriz energética são determinantes para o desempenho ambiental da cerâmica; (iv) as substituições minerais e o uso de resíduos reduzem impactos em ambas as tipologias; e (v) o transporte, especialmente quando envolve longas distâncias ou caminhões movidos a diesel, pode representar até 15% do GWP total, conforme indicado por Estokova (2023).

5.4 Lacunas e inconsistências identificadas

Apesar da evolução das pesquisas, persistem lacunas metodológicas importantes. A maioria dos estudos nacionais ainda adota fronteiras restritas (*cradle-to-gate*), o que limita a compreensão dos impactos associados ao uso, manutenção e fim de vida dos blocos. Poucos trabalhos incluem etapas de demolição, transporte pós-uso ou reciclagem de resíduos cerâmicos e de concreto. Essa limitação reduz a capacidade de comparação direta entre estudos internacionais e locais.

Outra inconsistência observada está na padronização das unidades funcionais e na forma de apresentação dos resultados. Enquanto alguns trabalhos expressam o GWP em kg CO₂eq/kg de produto, outros o fazem por m² de parede ou por tonelada de material. Essa variação dificulta a consolidação de valores absolutos e reforça a importância da harmonização metodológica. Também se constatou que muitos inventários brasileiros ainda dependem de dados genéricos de bancos internacionais, o que pode distorcer os resultados, especialmente em relação à matriz energética nacional.

Por fim, observou-se que a aplicação de diferentes métodos de avaliação (ReCiPe, CML, ILCD e IPCC) leva a pequenas discrepâncias nas magnitudes absolutas dos impactos, embora as tendências relativas entre os materiais se mantenham estáveis. Essa convergência de comportamento reforça a confiabilidade das comparações qualitativas.

5.5 Oportunidades e perspectivas

A consolidação dos resultados indica caminhos claros para a mitigação dos impactos ambientais no setor de blocos de vedação. Para os blocos de concreto, a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (como escória, pozolanas e cinzas volantes) é a estratégia mais promissora, capaz de reduzir substancialmente as emissões de CO₂ e o consumo energético. A adoção de tecnologias de captura e

armazenamento de carbono (CCS) também aparece como solução complementar de médio prazo, conforme sugerido por Wu (2024).

Nos blocos cerâmicos, as principais oportunidades estão ligadas à modernização dos fornos, à substituição de combustíveis fósseis por biomassa de origem controlada e ao aproveitamento de resíduos agroindustriais e lodos de ETA. Essas medidas não apenas diminuem a dependência de recursos não renováveis, como também contribuem para a valorização de resíduos regionais e para a economia circular.

Do ponto de vista metodológico, destaca-se a necessidade de ampliar as fronteiras das análises para o *cradle-to-grave*, incluindo fases de uso, manutenção e reciclagem. Isso permitirá capturar benefícios pós-consumo, como a carbonatação do concreto ou a reutilização de resíduos cerâmicos como agregado reciclado. Também é essencial investir em inventários nacionais atualizados, baseados em dados primários de fábricas brasileiras, a fim de aumentar a precisão das análises e refletir as condições locais de produção e energia.

De forma geral, a comparação entre os estudos demonstra que ambos os sistemas, cerâmico e de concreto, podem evoluir significativamente em termos de sustentabilidade. O avanço depende, sobretudo, da melhoria tecnológica nos processos industriais, da diversificação energética e da integração de resíduos como insumos. Assim, os resultados aqui sintetizados oferecem uma base sólida para as discussões do próximo capítulo, dedicado à interpretação crítica e às implicações práticas dessas evidências no contexto da construção sustentável.

6 Discussão

A análise integrada dos resultados permite uma reflexão crítica sobre os principais fatores que influenciam o desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto, considerando as diferenças metodológicas e contextuais observadas nos estudos revisados. A consolidação dos capítulos anteriores evidencia que, embora ambos os materiais apresentem relevância no setor da construção civil, suas cadeias produtivas possuem características distintas que determinam impactos ambientais contrastantes.

6.1 Implicações dos hotspots identificados

Os resultados comparativos apontam que o cimento Portland, sobretudo pela etapa de produção do clínquer, é consistentemente o maior hotspot ambiental dos blocos de concreto, conforme observado em Muneron (2021), Horta (2023) e Wu (2024). Essa etapa concentra emissões de CO₂ decorrentes tanto da decomposição do calcário quanto do consumo de energia térmica em fornos de alta temperatura. Mesmo em cenários onde o concreto apresentou vantagens construtivas, como padronização e durabilidade, o peso ambiental do cimento manteve-se elevado, reforçando a necessidade de substituições parciais por adições minerais, como: escória, cinza volante ou pozolanas, e pela adoção de cimentos de menor teor de clínquer.

Nos blocos cerâmicos, o processo de queima foi identificado como o ponto crítico em praticamente todos os estudos, devido à elevada demanda energética e às emissões associadas à combustão de lenha e gás natural (GOMES, 2012; LOPEZ-GARCIA, 2021; SANTOS, 2024). A magnitude desses impactos, no entanto, varia conforme a origem e eficiência do combustível utilizado. Trabalhos que consideram biomassa certificada ou fornos modernizados evidenciam reduções significativas no Potencial de Aquecimento Global (GWP) e na energia incorporada, indicando que ganhos tecnológicos e controle de emissões podem alterar substancialmente o perfil ambiental do produto cerâmico.

Além dos processos produtivos, o transporte e a logística de distribuição também se mostraram relevantes, especialmente em estudos com fronteiras cradle-to-grave, como Estokova (2023) e Horta (2023). O impacto do transporte é fortemente dependente da distância entre as fontes de matéria-prima, o local de fabricação e o canteiro de obras, bem como do tipo de combustível utilizado. Em regiões onde o modal rodoviário predomina e a eficiência veicular é baixa, essa etapa pode rivalizar em relevância com os próprios processos industriais.

De modo geral, a análise integrada confirma que os blocos de concreto apresentam maior impacto total em categorias relacionadas às emissões de gases de efeito estufa e à depleção de recursos, enquanto os blocos cerâmicos concentram impactos em energia térmica e emissões diretas do processo de queima. Ambos, portanto, demandam estratégias distintas de mitigação, tecnológicas e logísticas, para se adequarem a um cenário construtivo mais sustentável.

6.2 Limitações da presente revisão e perspectivas para pesquisas futuras

Apesar do avanço representado pela síntese dos estudos recentes, algumas limitações persistem e afetam a comparabilidade entre resultados. A primeira diz respeito à heterogeneidade metodológica. Embora todos os trabalhos sigam as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044, há variação significativa nas fronteiras do sistema, unidades funcionais e métodos de LCIA aplicados (como ReCiPe, CML e ILCD). Essa diversidade reflete a maturidade crescente da área, mas dificulta a obtenção de um panorama padronizado e a aplicação direta dos resultados em contextos locais.

Outro ponto crítico é a escassez de dados primários de inventário no contexto brasileiro, levando muitos autores a utilizarem bancos internacionais, como o Ecoinvent, que não representam com precisão o perfil energético e tecnológico nacional. Estudos como os de Horta (2023) e Santos (2024) destacam a importância de desenvolver bancos de dados regionais, que contemplem as especificidades da matriz elétrica brasileira, dos combustíveis utilizados e da eficiência dos processos produtivos locais.

Também se observam lacunas quanto à integração entre desempenho ambiental e características funcionais dos materiais, como desempenho térmico e acústico. Trabalhos como Baldissera (2020) e Akutsu (2020) demonstram que esses aspectos influenciam diretamente a eficiência energética das edificações, o que sugere a necessidade de abordagens de ACV ampliadas, capazes de incorporar múltiplas dimensões de desempenho para decisões mais equilibradas entre impacto ambiental e conforto térmico.

As perspectivas futuras apontam para a necessidade de análises dinâmicas e contextuais, que considerem as variações regionais de energia e transporte, bem como estudos cradle-to-grave que incluam uso e fim de vida. Além disso, recomenda-se a integração de dados empíricos industriais e o uso de ferramentas híbridas de modelagem que combinem ACV com análises de desempenho energético de edificações. Tais esforços podem ampliar a precisão das comparações e fortalecer a tomada de decisão sustentável no setor da construção.

6.3 Análise crítica

A consolidação dos resultados evidencia um cenário de complementaridade entre os dois sistemas construtivos. Enquanto os blocos de concreto apresentam vantagens técnicas e construtivas, como precisão dimensional e maior resistência, o seu impacto ambiental está fortemente associado à dependência de matérias-primas não renováveis e processos intensivos em carbono. Já os blocos cerâmicos, embora apresentem menores emissões associadas à matéria-prima, dependem de energia térmica significativa durante a queima, o que pode anular seus benefícios quando o combustível é fóssil ou não controlado.

Sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida, observa-se que a sustentabilidade de ambos os materiais depende fortemente do contexto energético e logístico. Em regiões onde a matriz energética é renovável e o transporte é otimizado, os blocos cerâmicos tendem a se destacar; em contrapartida, onde há disponibilidade de adições minerais e infraestrutura eficiente de concreto pré-misturado, os blocos de concreto podem apresentar menor impacto relativo. Portanto, a escolha entre os sistemas não deve ser feita de forma absoluta, mas adaptada às condições locais e ao desempenho exigido.

Por fim, a revisão confirma que a aplicação consistente das normas ISO 14040 e 14044 é essencial para garantir comparabilidade e credibilidade nos resultados. A harmonização das fronteiras de sistema, unidades funcionais e métodos de avaliação de impacto constitui um desafio contínuo, mas também uma oportunidade para consolidar a ACV como ferramenta de referência no planejamento sustentável de materiais de construção. A integração entre dados técnicos, critérios ambientais e requisitos de desempenho tende a conduzir a uma nova geração de estudos mais abrangentes, orientando tanto políticas públicas quanto estratégias industriais voltadas à redução das emissões e ao uso mais racional de recursos naturais.

ID	Material analisado	Unidade funcional	Limites do sistema	Método/ software	Categorias principais	Resultado principal	Hotspots
1	Cerâmico vs concreto	1 m ² de parede	Cradle-to-grave	Eco-indicator 99 / SimaPro	EQ, HH, R	Cerâmico com menor impacto total	Concreto: clínquer; Cerâmico: queima
2	Concreto (térmico)	1 m ² de parede	Gate-to-gate	NBR 15220	U, CT	Necessita isolante para atender norma; EPS é mais eficiente	Transmitância elevada
3	Cerâmico (6 tipologias)	1 m ² de parede	Gate-to-gate	NBR 15220	U, CT	Blocos ANICER atendem simultaneamente U e CT	Geometria dos vazios e massa
4	Concreto	1 m ² de parede	Cradle-to-gate	EN 15804 / OpenLCA	ADPE, ADPF, AP, EP, GWP	Alto impacto associado ao cimento	Clinquerização; argamassas espessas
5	Cerâmico	Parede ensaiada	Gate-to-gate	ISO 10140 / 16283	Rw, Dnt,w	Execução determina desempenho final	Juntas verticais e vedação
6	Cerâmico (2 fábricas)	1 m ² de parede	Cradle-to-gate	Eco-indicator 99 / SimaPro	EQ, HH, R	Forno túnel reduz impactos em 50%	Combustão de seragem
7	Cerâmico com resíduo	1 bloco	Cradle-to-gate	ReCiPe	GWP, energia	Resíduo reduz impacto do bloco	Secagem/queima
8	Cerâmico vs concreto	1 m ² de fechamento	Cradle-to-gate	ReCiPe	GWP, energia, água	Concreto com maior GWP; cerâmico com maior energia térmica	Cimento; combustão
9	Materiais diversos	1 t de material	Gate-to-gate	CML	GWP, AP	Transporte pode representar até 30% dos impactos	Distância logística
10	Cerâmico com lodo de ETA	1 bloco	Cradle-to-gate	ReCiPe OpenLCA	GWP, energia	Substituição reduz emissões	Queima
11	Materiais diversos	Energia incorporada	Cradle-to-gate	Inventário (UK)	Energia, carbono incorporado	Concreto com alta energia e carbono	Produção do cimento
12	Cimento (global)	Massa de cimento	Cradle-to-grave	Modelo global	GWP, uptake	Uptake ocorre, mas emissões seguem altas	Calcinação; clínquer

Tabela 13: Síntese comparativa dos 12 estudos analisados.

7 Considerações finais

Este trabalho apresentou uma análise comparativa do desempenho ambiental de blocos cerâmicos e de concreto a partir da síntese crítica de estudos que aplicaram a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Os resultados permitem compreender não apenas a magnitude dos impactos associados a cada sistema, mas também os principais mecanismos que os originam ao longo do ciclo de vida, indicando que conclusões simplistas ou generalistas não são adequadas para a escolha entre esses materiais.

De forma consistente com a literatura analisada, observou-se que, nos blocos de concreto, o cimento Portland, especialmente a etapa de produção do clínquer, concentra a maior parcela dos impactos ambientais, sobretudo no que se refere ao Potencial de Aquecimento Global. Nos blocos cerâmicos, a etapa de queima das argilas mostrou-se determinante, com desempenho fortemente dependente do tipo de combustível empregado e da eficiência térmica dos fornos. Esses resultados evidenciam que o comportamento ambiental de ambos os sistemas está diretamente associado às escolhas tecnológicas e operacionais adotadas em suas cadeias produtivas.

A análise também mostrou que fatores frequentemente tratados como secundários, como transporte e logística, podem exercer influência relevante nos resultados, especialmente em contextos de maiores distâncias entre unidades produtivas e canteiros de obras. Da mesma forma, a avaliação de alternativas consideradas sustentáveis, como a incorporação de resíduos, indicou que seus benefícios dependem do tipo de resíduo e das condições de processamento, exigindo análise cuidadosa para evitar a transferência de impactos entre etapas do ciclo de vida.

No conjunto, os resultados indicam que não existe um material ambientalmente superior em termos absolutos. O desempenho ambiental dos sistemas de vedação analisados depende da combinação entre processo industrial, matriz energética, disponibilidade de matérias-primas, logística e exigências funcionais do projeto. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida se confirma como ferramenta fundamental para apoiar decisões de engenharia mais alinhadas ao contexto local e às metas de sustentabilidade, reforçando que a redução de impactos passa menos pela substituição direta de materiais e mais pelo aprimoramento sistêmico das cadeias produtivas.

8 Trabalhos futuros

Apesar de a presente pesquisa ter permitido identificar tendências relevantes sobre o desempenho ambiental de blocos cerâmicos e blocos de concreto utilizados em sistemas de vedação, ainda existem diversas oportunidades para aprofundamento do tema.

Uma das principais limitações observadas refere-se à disponibilidade e à representatividade dos dados de inventário utilizados nos estudos analisados. Grande parte das pesquisas recorre a bases de dados internacionais ou a inventários genéricos, o que pode não refletir adequadamente as condições produtivas da indústria brasileira. Assim, estudos futuros podem contribuir para o desenvolvimento de inventários nacionais mais detalhados, especialmente para processos como a produção de cimento Portland, a fabricação de blocos de concreto e os sistemas de queima utilizados na indústria cerâmica.

Outra linha de investigação relevante consiste na ampliação das fronteiras do sistema consideradas nas análises de Avaliação do Ciclo de Vida. Muitos estudos concentram-se nas etapas iniciais do ciclo produtivo, adotando abordagens do tipo *cradle-to-gate*. Pesquisas futuras podem incorporar com maior profundidade as etapas de uso, manutenção, demolição e reciclagem das paredes de vedação, permitindo compreender de forma mais completa o desempenho ambiental dos sistemas ao longo de todo o ciclo de vida das edificações.

Também se destaca a necessidade de integrar análises ambientais com outros critérios de desempenho das edificações, como desempenho térmico, acústico e durabilidade dos materiais. A avaliação conjunta desses aspectos pode fornecer uma base mais robusta para a tomada de decisão em projetos de engenharia e arquitetura, evitando que escolhas ambientalmente favoráveis em uma etapa resultem em prejuízos de desempenho ao longo da vida útil da edificação.

Além disso, futuras pesquisas podem explorar o potencial de materiais alternativos e adições minerais na produção de blocos de concreto e cerâmicos, como resíduos industriais, subprodutos agrícolas e materiais reciclados. A incorporação desses insumos pode reduzir a dependência de matérias-primas naturais e contribuir para a diminuição das emissões associadas à produção de clínquer e ao consumo de energia térmica nos processos de fabricação.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de estudos aplicados que considerem cenários regionais específicos, incorporando diferenças na matriz energética, na disponibilidade de matérias-primas e nas distâncias de transporte. Esse tipo de abordagem pode ampliar a aplicabilidade dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida e contribuir para orientar políticas públicas e estratégias de sustentabilidade no setor da construção civil brasileira.

Referências

- Maria Akutsu, David O. Fratel Junior, Constantino B. Frollini, and Viviane Y. Kiyohara. Análise do potencial de desempenho térmico de diferentes tipologias de blocos cerâmicos. In *18^a Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2020)*, Porto Alegre, Brasil, 2020. ANTAC. Anais do ENTAC 2020.
- Eduarda Baldissera and Patrícia Lovato. Análise do desempenho térmico de sistema de vedação em alvenaria de blocos de concreto em atendimento à nbr 15575. In *18^a Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2020)*, Porto Alegre, Brasil, 2020. ANTAC. Anais do ENTAC 2020.
- Marianne Di-Domênico, Thaísa Leal da Silva, and Lauro André Ribeiro. Impactos ambientais do ciclo de vida de um sistema de vedação vertical com blocos de concreto. In *18^a Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2020)*, Porto Alegre, Brasil, 2020. ANTAC. Anais do ENTAC 2020.
- Adriana Eštoková, Martina Fabianová, and Marek Radačovský. Life cycle assessment and environmental impacts of building materials: Evaluating transport-related factors. *Engineering Proceedings*, 57(1):5, 2023. doi: 10.3390/engproc2023057005.
- David O. Fratel Junior, Constantino B. Frollini, Viviane Y. Kiyohara, Claudio V. Mitidieri Filho, and Luciana A. Oliveira. Análise da influência da execução de alvenarias com blocos cerâmicos no desempenho acústico. In *18^a Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2020)*, Porto Alegre, Brasil, 2020. ANTAC. Anais do ENTAC 2020.
- Jerônimo Moraes Gomes, Ana Luiza Folchini Salgado, and Dachamir Hotza. Life cycle assessment of ceramic bricks. *Materials Science Forum*, 727–728:815–820, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.815.
- Geoffrey P. Hammond and Craig I. Jones. Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2):87–98, 2008. doi: 10.1680/ener.2008.161.2.87. URL <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>.
- Ricardo Augusto dos Santos Horta, Lineker Goulart Silva, Cláudio Henrique Pires e Coelho, and Raquel Diniz Oliveira. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de fechamento vertical: Alvenaria de vedação vs. alvenaria estrutural - um estudo de caso brasileiro. *Contemporânea*, 3(9):16468–16506, 2023. ISSN 2447-0961. doi: 10.56083/RCV3N9-157.
- Ana B. López-García, Teresa Cotes-Palomino, Manuel Uceda-Rodríguez, José Manuel Moreno-Maroto, Carlos Javier Cobo-Ceacero, N. M. Fernanda Andreola, and Carmen Martínez-García. Application of life cycle assessment in the environmental study of sustainable ceramic bricks made with ‘alperujo’ (olive pomace). *Applied Sciences*, 11(5): 2278, 2021. doi: 10.3390/app11052278. URL <https://doi.org/10.3390/app11052278>.
- A. Muneron and outros. Comparison of the environmental performance of ceramic brick and concrete blocks in the vertical seals’ subsystem in residential buildings using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 278:123956, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123956.

Marcos David dos Santos, Adolpho Guido de Araújo, Dayvson Carlos Batista de Almeida, Igor Vieira Fernandes, and Arnaldo Manoel Pereira Carneiro. Aplicação da acv em blocos cerâmicos fabricados com adição do lodo de estações de tratamento de água. In *Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)*, pages 1–15, Maceió, Brasil, 2024. ANTAC.

Songbin Wu, Zi Shao, Robbie M. Andrew, Longfei Bing, Jiaoyue Wang, Le Niu, Zhu Liu, and Fengming Xi. Global co2 uptake by cement materials accounts 1930–2023. *Scientific Data*, 11(1409), 2024. doi: 10.1038/s41597-024-04234-8. URL <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04234-8>.