

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS
PRODUTIVOS

SERGIO COPELIOVITCH

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA FASE DE PRODUÇÃO DE SISTEMA
INSULATED CONCRETE FORMS (ICF) PARA A ELABORAÇÃO DE DECLARAÇÃO
AMBIENTAL DE PRODUTO

São Paulo

Abril/2026

SERGIO COPELIOVITCH

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA FASE DE PRODUÇÃO DE SISTEMA
INSULATED CONCRETE FORMS (ICF) PARA A ELABORAÇÃO DE DECLARAÇÃO
AMBIENTAL DE PRODUTO

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre(a) em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação da Profa. Dra. Sílvia Pierre Irazusta e coorientação da Profa. Dra. Vanessa Montoro Taborianski.

Área de Concentração: Sistemas Produtivos

Linha de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade

Projeto de Pesquisa: Gestão Ambiental e Sustentabilidade

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável relacionados a esta dissertação e seus resultados: 7 (Energia Acessível e Limpa), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

São Paulo

Abril/2026

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CPS CRB8-8390

C782a Copeliovitch, Sergio
Avaliação do ciclo de vida na fase de produção de sistema Insulated Concrete Forms (ICF) para a elaboração de declaração ambiental de produto / Sergio Copeliovitch. – São Paulo: CPS, 2026
98 f. : il.

Orientador (a): Profa. Dra. Sílvia Pierre Irazusta
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2026.

1. Sistemas ICF (Insulated Concrete Forms). 2. Avaliação do ciclo de vida (ACV). 3. Declaração ambiental do produto (DAP). 4. Sustentabilidade. 5. Construção civil. I. Irazusta, Sílvia Pierre. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

SERGIO COPELIOVITCH

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA FASE DE PRODUÇÃO DE SISTEMA
INSULATED CONCRETE FORMS (ICF) PARA A ELABORAÇÃO DE DECLARAÇÃO
AMBIENTAL DE PRODUTO



Documento assinado digitalmente

SILVIA PIERRE IRAZUSTA

Data: 22/06/2026 10:03:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sílvia Pierre Irazusta

Orientadora – CEETEPS



Documento assinado digitalmente

ADEMAR BENEVOLO LUGAO

Data: 16/07/2026 10:02:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ademar Benévolo Lugão

Examinador Externo – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (CNEN/IPEN)



Documento assinado digitalmente

ELIACY CAVALCANTI LÉLIS

Data: 07/07/2026 17:29:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Eliacy Cavalcanti Lélis

Examinadora Interna - CEETEPS

São Paulo, 1 de Abril de 2026

Dedicatória.

Dedico este trabalho aos meus pais Bernardo e Dina (*in memoriam*), pelo exemplo, apoio e incentivo aos estudos, que sempre foram a base da minha formação pessoal e profissional; e a minha esposa Cássia e minha filha Hannah, que estiveram sempre ao meu lado, oferecendo apoio, paciência e incentivo constantes em cada etapa desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, pela oportunidade de realizar um Mestrado pautado na qualidade e na excelência acadêmica.

À Professora Doutora Sílvia Pierre Irazusta, minha orientadora, pela dedicação, disponibilidade e valiosas orientações que contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Doutora Vanessa Montoro Taborianski, minha coorientadora, pelas importantes sugestões e colaborações que enriqueceram esta pesquisa.

À Professora Doutora Eliacy Cavalcanti Lélis, por aceitar participar da banca examinadora e pelas considerações que aprimoraram este estudo.

Ao Professor Doutor Ademar Benévolo Lugão, do IPEN, pela gentileza em aceitar o convite para integrar a banca examinadora e pelas contribuições oferecidas durante a avaliação.

A todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do CEETEPS, pela transmissão de conhecimentos e experiências que ampliaram minha visão acadêmica e profissional.

Aos servidores da Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa (Upep), pelo suporte e atenção prestados durante toda a trajetória acadêmica.

Aos colegas de turma, pela parceria, amizade e apoio mútuo ao longo dessa jornada.

Ao Engenheiro Márcio Miranda Alferes, da Empresa EME Indústria de EPS, pela receptividade, disponibilidade e apoio técnico prestado, cujos esclarecimentos sobre o sistema ICF contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho.

À Engenheira Polyana Guimarães, pela colaboração e pela gentileza de me convidar a integrar a Comissão de Estudo do Sistema de Parede de Concreto Armado com Formas de ICF, do Comitê Brasileiro da Construção Civil da ABNT, oportunidade que proporcionou valioso aprendizado e ampliou os conhecimentos aplicados na elaboração desta pesquisa.

Ao Professor Mestre Valter Yogui, da Fatec Cotia, pelo incentivo e orientação que motivaram meu ingresso neste programa de mestrado.

“A ciência só tem sentido quando está a
serviço do homem.”
(Mário Schenberg)

RESUMO

COPELIOVITCH, S. **Avaliação do Ciclo de Vida na Fase de Produção de Sistema *Insulated Concrete Forms* (ICF) para a elaboração de Declaração Ambiental de Produto.** 98 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

O presente trabalho teve por objetivo identificar as características do sistema ICF (*Insulated Concrete Forms*) e seu potencial em relação ao seu desempenho ambiental, considerando a fase de produção no contexto brasileiro, sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada do tipo berço ao portão (*cradle-to-gate*). A metodologia adotada foi a ACV, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044, com unidade funcional de 1 m² de parede estrutural em sistema ICF, modelagem no software openLCA, base de dados Ecoinvent, método Eco-indicator 99. Os resultados indicam que os impactos ambientais do sistema ICF concentram-se predominantemente na categoria de consumo de recursos naturais, associada à produção do cimento e ao consumo de energia elétrica, enquanto as categorias de saúde humana e qualidade do ecossistema apresentam menor contribuição. Conclui-se que o sistema ICF apresenta desempenho ambiental competitivo na fase de produção, com potencial de melhoria por meio da otimização de insumos, da matriz energética e de estratégias vinculadas à economia circular, demonstrando aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9, 11, 12 e 13). Como produto técnico, foi elaborada uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) alinhada à ISO 14025, para apoiar análises comparativas e a tomada de decisão na construção civil sustentável, atendendo a uma demanda da empresa EME Indústria de EPS. *Linha de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade. Projeto de Pesquisa: Gestão Ambiental e Sustentabilidade.*

Palavras-chave: Sistemas ICF (*Insulated Concrete Forms*), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Declaração Ambiental do Produto (DAP), Sustentabilidade, Construção Civil.

ABSTRACT

COPELIOVITCH, S. Life Cycle Assessment in the Production Phase of Insulated Concrete Forms (ICF) Systems for the preparation of an Environmental Product Declaration. 98 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

"The aim of this study was to identify the characteristics of the ICF (Insulated Concrete Forms) system and its potential in terms of environmental performance, considering the production phase in the Brazilian context, from the perspective of a simplified Life Cycle Assessment (LCA) of the cradle-to-gate type. The methodology adopted was LCA, in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, with a functional unit of 1 m² of structural wall in the ICF system, modeling performed in the openLCA software, using the Ecoinvent database and the Eco-indicator 99 method. The results indicate that the environmental impacts of the ICF system are predominantly concentrated in the category of natural resource consumption, associated with cement production and electricity use, while the categories of human health and ecosystem quality show lower contributions. It is concluded that the ICF system exhibits competitive environmental performance during the production phase, with potential for improvement through the optimization of inputs, the energy matrix, and strategies linked to the circular economy, demonstrating alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs 7, 9, 11, 12, and 13). As a technical deliverable, an Environmental Product Declaration (EPD) was developed, aligned with ISO 14025, to support comparative analyses and decision-making in sustainable civil construction, meeting a demand from the company EME Indústria de EPS. Research Line: Technological Innovation Management and Sustainability. Research Project: Environmental Management and Sustainability.

Keywords: ICF (Insulated Concrete Forms) Systems, Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Product Declaration (EPD), Sustainability, Civil Construction.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Síntese do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema ICF (1 m ² de parede)..
54	
Quadro 2:	Correspondência entre módulos A1–A3 e o inventário do sistema ICF
58	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida do sistema ICF por categoria de dano (unidades físicas – Eco-indicator 99)	52
Tabela 2:	Resultados agregados da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF por categoria de dano (Eco-indicator 99 – Pt)	52
Tabela 3	Contribuição dos materiais por categoria (cenário base)	59
Tabela 4	Comparação entre resultados de energia incorporada para sistemas construtivos com ICF	62
Tabela 5	Cenários de matriz elétrica	65
Tabela 6	Cenários de cimento	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Sistema ICF	18
Figura 2:	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	35
Figura 3:	Preenchimento das formas do Sistema ICF	38
Figura 4:	Corte dos painéis do Sistema ICF	38
Figura 5:	Montagem do Sistema ICF	39
Figura 6:	Parede estrutural ICF.....	39
Figura 7:	Fluxograma do Ciclo de Vida do Sistema ICF	41
Figura 8:	Distribuição dos impactos ambientais do sistema construtivo ICF segundo o método Eco-indicator 99.....	53
Figura 9:	Contribuição dos materiais do sistema ICF (concreto, EPS, aço e outros insumos) para as categorias de dano do Eco-indicator 99, por 1 m ² de parede (cenário base). 63	
Figura 10:	Impacto ambiental total (Pt) do sistema construtivo ICF por 1 m ² de parede em diferentes cenários de matriz elétrica (cenário base, cenário com maior participação de fontes renováveis e cenário com maior participação de fontes fósseis), calculado pelo método Eco-indicator 99.	66
Figura 11:	Impacto ambiental total (Pt) do sistema construtivo ICF por 1 m ² de parede em diferentes cenários de matriz elétrica (cenário base, cenário com maior participação de fontes renováveis e cenário com maior participação de fontes fósseis), calculado pelo método Eco-indicator 99.....	67

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
BIM	<i>Building Information Modelling</i> (Modelagem da Informação da Construção)
CB-02	Comitê Brasileiro da Construção Civil
CEETEPS	Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
CFC	Clorofluorcarbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAP	Declaração Ambiental do Produto
DATec	Documento de Avaliação Técnica
EPS	Poliestireno Expandido
GEE	Gases de Efeito Estufa
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro)
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
ICF	<i>Insulated Concrete Forms</i> (Formas de Concreto Isoladas)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PENRT	<i>Primary Energy Non-Renewable Total</i> (Energia Primária Não Renovável Total)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
UPEP	Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa

LISTA DE SIMBOLOS

CO ₂	Dióxido de Carbono
DALY	<i>Disability Adjusted Life Years</i> (Anos de Vida Ajustados por Incapacidade)
kg	Quilograma
m ²	Metro quadrado
MJ	Megajoule
MJ surplus	Excedente energético associado à extração futura de recursos naturais
Pt	Point (Unidade de Pontuação de Impacto Ambiental do Método Eco-indicator 99)
species·yr	Perda potencial de espécies por ano (unidade de qualidade do ecossistema no Eco-indicator 99)
U	Coeficiente de Transmitância Térmica
W/m ² ·K	Watt por metro quadrado kelvin (Unidade de Transmitância Térmica)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVOS.....	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos.....	22
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
3.1	A construção civil e a sustentabilidade: impactos ambientais e caminhos para a inovação.....	25
3.2	Métodos construtivos inovadores e sustentabilidade	27
3.2.1	<i>O Sistema ICF (Insulated Concrete Forms)</i>	28
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida	30
3.3.1	<i>Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida</i>	31
3.4	Declaração Ambiental de Produto (DAP)	33
3.5	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a Construção Civil.....	34
4.	METODOLOGIA.....	37
4.1	Definição do objetivo e do escopo da ACV	40
4.1.1	<i>Modelagem do sistema e fronteiras do sistema</i>	41
4.2	Coleta de dados e construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	42
4.3	Definição do Software e base de dados utilizados	42
4.3.1	<i>Software openLCA.....</i>	43
4.3.2	<i>Indicadores de avaliação ambiental.....</i>	44
4.3.3	<i>Recursos e funcionalidades do openLCA aplicados no estudo.....</i>	45
4.3.4	<i>Base de dados utilizada</i>	46
4.4	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)	46
4.5	Análise e interpretação dos resultados	47
4.6	Estruturação da Declaração Ambiental do Produto (DAP)	48
4.7	Conexão da ACV com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	Resultados gerais da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF	50

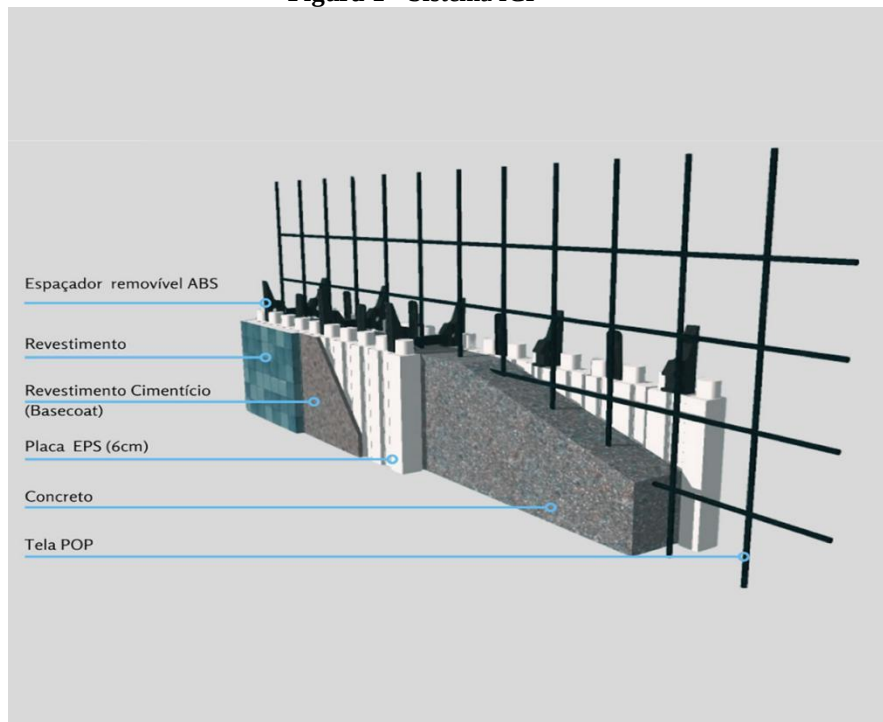
5.2 Inventário de materiais do sistema ICF	53
5.2.1 Entradas e fluxos considerados no modelo de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	55
5.2.1.1 Entradas de materiais (inputs)	56
5.2.1.2 Entradas energéticas	56
5.2.1.3 Processos de transporte	56
5.2.1.4 Saídas e emissões (outputs)	57
5.3 Avaliação dos impactos ambientais por categorias de dano	57
5.3.1 Saúde Humana	59
5.3.2 Qualidade do Ecossistema	60
5.4 Consumo de energia primária não renovável (PENRT) no módulo A1–A3	60
5.5 Impacto ambiental total e interpretação integrada.....	62
5.6 Discussão integrada dos resultados da ACV e implicações ambientais	64
5.7 Análise dos resultados da ACV sob a ótica da Declaração Ambiental do Produto	68
5.7.1 Contribuição dos Recursos para o Potencial de Aquecimento Global (GWP)	69
5.7.2 Contribuição para o Consumo de Energia Primária e Recursos Naturais	70
5.7.3 Contribuição para a Categoria Saúde Humana	71
5.7.4 Contribuição para a Categoria Qualidade do Ecossistema.....	71
5.7.5 Síntese Integrada para Consolidação em DAP.....	72
5.8 Declaração Ambiental do Produto (DAP) do Sistema Construtivo ICF	72
5.9 Conexão com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	73
6. CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICE A – Declaração Ambiental do Produto (DAP) do Sistema ICF.....	93

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das indústrias mais influentes no cenário global, não apenas pela sua contribuição para a economia, mas também pelo impacto ambiental significativo que exerce ao longo de seu ciclo de vida. Nesse contexto, a busca por soluções que promovam a sustentabilidade e a eficiência energética na construção de edifícios se torna essencial.

Entre as inovações que emergiram como alternativas viáveis, destacam-se os sistemas ICF (*Insulated Concrete Forms*), esquematizado na figura 1, que consiste em blocos ou painéis modulares fabricados com material isolante — geralmente poliestireno expandido (EPS) — que permanecem no local após o enchimento com concreto, formando paredes estruturais monolíticas. Esses blocos funcionam simultaneamente como fôrma permanente e isolamento térmico. De acordo com estudos esse sistema fornece elevada eficiência energética, conforto ambiental e durabilidade (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2017; KOSNY et al., 1998).

Figura 1 - Sistema ICF



Fonte: FASE Soluções Construtivas em ICF. Disponível em: <https://faseicf.com.br/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

O sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF) surgiu a partir da necessidade de conciliar desempenho estrutural, eficiência energética e racionalização construtiva, conforme descrito em manuais técnicos e estudos históricos sobre sistemas construtivos industrializados (IRISH AGRÉMENT BOARD, 2025; NAHB RESEARCH CENTER, 2011), especialmente em regiões de clima rigoroso. Seus primeiros registros remontam à Europa do pós-Segunda Guerra Mundial, quando a escassez de materiais e a necessidade de reconstrução rápida estimularam o desenvolvimento de sistemas industrializados baseados em formas permanentes associadas ao concreto.

Na década de 1940, experiências iniciais com blocos leves preenchidos com concreto foram conduzidas na Suíça e na Alemanha, motivadas pelo contexto de reconstrução do pós-guerra e pela escassez de materiais convencionais (MATHEY; ROSSITER, 1988), utilizando materiais alternativos disponíveis à época. Entretanto, o avanço tecnológico decisivo ocorreu a partir da introdução do poliestireno expandido (EPS) como material de forma permanente, a partir das décadas de 1960 e 1970, em função da evolução da indústria petroquímica e do aumento das exigências de desempenho térmico das edificações (PAPADOPOULOS, 2005; AL-HOMOUD, 2005). A partir da década de 1980, o sistema ICF passou a ser amplamente difundido na América do Norte, especialmente nos Estados Unidos e no Canadá, em resposta às demandas por eficiência energética, conforto térmico em climas extremos e elevada durabilidade estrutural (NAHB RESEARCH CENTER, 2011; PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2018), onde encontrou forte aderência em função das exigências de eficiência energética, conforto térmico em climas extremos e elevada durabilidade estrutural. Nesse contexto, o ICF consolidou-se como uma alternativa competitiva à alvenaria convencional e ao sistema *wood frame*, sendo empregado tanto em edificações residenciais unifamiliares quanto em edifícios multifamiliares, comerciais, institucionais e industriais (KOSNY et al., 1998).

Atualmente, o sistema ICF é utilizado em diversos países, incluindo Estados Unidos, Canadá, Alemanha, França, Reino Unido, Suécia, Finlândia, Japão, Austrália e Nova Zelândia, com aplicações em edificações residenciais, comerciais e institucionais que demandam elevado desempenho térmico, acústico e estrutural (PAPADOPOULOS; GIAMA, 2007; EKRAMI; GARAT; FUNG, 2015), com destaque para Estados Unidos, Canadá, Alemanha, França, Reino Unido, Suécia, Finlândia, Japão, Austrália e Nova Zelândia. Seu uso é particularmente recorrente em residências de baixo consumo energético, edifícios comerciais, escolas, hospitais, hotéis e edificações que demandam elevada resistência estrutural, acústica e ao fogo. Em países europeus, o ICF também se insere no contexto das políticas de edificações de energia quase

zero, devido à sua elevada capacidade de isolamento térmico e estanqueidade (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

Do ponto de vista quantitativo, estima-se que, em mercados como o norte-americano, o ICF represente entre 5% e 10% das novas construções residenciais em concreto, com maior participação em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos, como furacões, tornados e grandes amplitudes térmicas. Embora ainda minoritário frente aos sistemas tradicionais, observa-se crescimento contínuo, impulsionado por requisitos normativos de eficiência energética e redução de emissões associadas ao uso operacional das edificações.

No Brasil, o sistema ICF começou a ser introduzido de forma mais sistemática a partir do final da década de 1990 e início dos anos 2000, por meio de empresas especializadas e de aplicações pontuais em edificações residenciais, conforme relatado em estudos técnicos e publicações setoriais (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA, 2018; PAVAN; HENKE, 2023). Diferentemente do contexto europeu e norte-americano, sua adoção não esteve associada a processos de reconstrução ou a climas extremos, mas sim à busca por inovação construtiva, racionalização de obras e melhoria do desempenho térmico e acústico.

O uso do ICF no país permanece restrito e concentrado, ocorrendo principalmente em regiões urbanas com maior poder aquisitivo e acesso a tecnologias construtivas industrializadas, como os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. As aplicações mais frequentes incluem residências unifamiliares, condomínios horizontais, edificações institucionais de pequeno porte e, em menor escala, edificações comerciais (JOHN, 2010; INSULATING CONCRETE FORMS ASSOCIATION, 2016).

Um dos principais fatores que limitam a disseminação do ICF no Brasil é a forte hegemonia dos sistemas tradicionais, especialmente a alvenaria de vedação com revestimento argamassado, amplamente difundida no país por razões culturais, econômicas e normativas (SABBATINI, 2003). Esse predomínio está associado à ampla disponibilidade de mão de obra, ao baixo custo relativo dos materiais convencionais, à cultura construtiva consolidada e à estrutura normativa historicamente voltada à alvenaria.

Do ponto de vista de participação de mercado, não existem dados estatísticos oficiais consolidados que indiquem a proporção exata do sistema ICF no Brasil. Contudo, estudos setoriais e análises de mercado apontam que o ICF representa menos de 1% das edificações residenciais brasileiras, sendo classificado como uma tecnologia inovadora e de nicho, em

contraste com sistemas amplamente difundidos, como alvenaria convencional, concreto moldado in loco tradicional e, mais recentemente, o *light steel frame*.

Em comparação, os sistemas baseados em alvenaria e revestimentos argamassados correspondem à expressiva maioria das edificações no país, superando 80% do total de construções residenciais, o que evidencia a assimetria entre tecnologias consolidadas e sistemas construtivos inovadores. Nesse cenário, o ICF ainda enfrenta desafios relacionados ao custo inicial, à necessidade de capacitação técnica, à cadeia de suprimentos especializada e à percepção de risco por parte de projetistas e construtores.

Apesar dessas limitações, observa-se crescente interesse pelo sistema ICF no Brasil, impulsionado pela entrada em vigor da ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013), pelo aumento das exigências de desempenho e pela ampliação do debate sobre eficiência energética e sustentabilidade na construção civil (ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011; LU; MEMARI, 2013). Nesse contexto, o sistema ICF apresenta potencial de expansão, sobretudo em empreendimentos que valorizam desempenho global, conforto ambiental e redução de custos operacionais ao longo do ciclo de vida.

Embora o poliestireno expandido (EPS) seja o material mais amplamente empregado como forma permanente nos sistemas *Insulated Concrete Forms* (ICF), existem variações tecnológicas que utilizam outros materiais, como poliestireno extrudado (XPS), painéis cimentícios com núcleo isolante e compósitos à base de madeira-cimento. No entanto, o sistema ICF baseado em EPS permanece como a solução mais difundida comercialmente e a mais explorada na literatura técnica e acadêmica, sendo, portanto, o foco do presente estudo.

Diante da relevância do tema e da necessidade de quantificar a sustentabilidade desses sistemas, esta pesquisa busca responder à seguinte questão: Em que medida o sistema construtivo ICF (*Insulated Concrete Forms*) pode ser considerado sustentável no contexto da construção civil brasileira, quando avaliado por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, considerando-se apenas o escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*)?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa dissertação foi identificar as características do sistema ICF (*Insulated Concrete Forms*) que tem potencial em relação ao seu desempenho ambiental na fase de produção, no contexto brasileiro sob a ótica da avaliação do ciclo de vida (ACV) simplificada do tipo berço ao portão (*cradle-to-gate*).

Como produto dessa pesquisa, propõe-se uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) que sistematize seus impactos ambientais, potencialidades e limitações, de forma técnica, transparente e imparcial, no contexto da construção civil. A proposta está aderente a linha de pesquisa *Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade* e ao projeto *Gestão Ambiental e Sustentabilidade*.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Delimitar e modelar o sistema construtivo ICF considerando exclusivamente as etapas de extração de matérias-primas, produção industrial e fabricação do produto, conforme o escopo berço ao portão;
- Construir o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema ICF, quantificando os fluxos de materiais, energia, água e emissões associados à produção do EPS, do concreto e dos componentes complementares;
- Avaliar os impactos ambientais do sistema ICF por meio da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), utilizando o método Eco-indicator 99 (endpoint), reconhecido internacionalmente e em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044;

- Identificar as vantagens ambientais do sistema ICF, bem como suas limitações e pontos críticos, especialmente relacionados ao consumo de recursos, emissões e complexidade de materiais;
- Estruturar uma Declaração Ambiental do Produto (DAP), alinhada aos princípios da ISO 14025, como produto técnico da pesquisa;
- Avaliar o desempenho ambiental do sistema construtivo ICF sob a ótica dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), identificando sua contribuição potencial para metas relacionadas à produção responsável, ação climática e inovação sustentável.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando o caráter interdisciplinar desta pesquisa, que integra conceitos de engenharia civil, sustentabilidade ambiental, desempenho de sistemas construtivos e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a fundamentação teórica desta dissertação foi estruturada a partir de um conjunto abrangente e complementar de referências bibliográficas. A revisão da literatura teve como objetivo contextualizar o sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF) no âmbito da construção civil sustentável, bem como fornecer o suporte conceitual necessário à metodologia adotada e à análise dos resultados apresentados nos capítulos subsequentes. Foram consultadas publicações científicas indexadas em bases de dados nacionais e internacionais, tais como SciELO, Portal de Periódicos da CAPES, Scopus, Web of Science (WoS) e Google Scholar, além de livros técnicos nas áreas de engenharia civil, sustentabilidade e tecnologia de materiais.

Inicialmente, são discutidos os fundamentos da sustentabilidade na construção civil, com ênfase nos impactos ambientais associados aos sistemas construtivos ao longo do seu ciclo de vida, no consumo de recursos naturais e nas emissões decorrentes da produção de materiais e processos construtivos. Essa abordagem estabelece o pano de fundo conceitual para a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta de análise ambiental.

Na sequência, são apresentados os princípios dos sistemas construtivos industrializados, destacando-se suas características técnicas, organização produtiva e implicações ambientais. Nesse contexto, o sistema ICF é detalhado quanto à sua concepção, materiais constituintes — com destaque para o poliestireno expandido (EPS) e o concreto estrutural —, formas de aplicação e potencial de desempenho ambiental, considerando aspectos como isolamento térmico, durabilidade e racionalização construtiva.

Posteriormente, a fundamentação teórica aborda a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como método de suporte à análise ambiental de produtos e sistemas da construção civil. São apresentados os conceitos fundamentais, as etapas da ACV e os principais métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), com destaque para o método Eco-indicator 99, amplamente utilizado em estudos de materiais e sistemas construtivos. Essa discussão fornece a base teórica necessária para a compreensão da modelagem realizada no software openLCA, adotada nesta dissertação.

Por fim, a revisão da literatura incorpora estudos acadêmicos, dissertações e teses que analisam o desempenho ambiental de sistemas construtivos baseados em concreto e materiais poliméricos, incluindo aplicações do EPS em contextos estruturais e de isolamento, à luz dos princípios do desenvolvimento sustentável e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Esses estudos contribuem para o entendimento dos principais fatores de impacto ambiental associados ao sistema ICF e para a contextualização dos resultados obtidos.

3.1 A construção civil e a sustentabilidade: impactos ambientais e caminhos para a inovação

A construção civil é reconhecida como uma das atividades que mais impactam o meio ambiente, tanto pela elevada extração de recursos naturais quanto pela expressiva geração de resíduos sólidos e emissões de poluentes. O setor é responsável por uma parcela significativa do consumo de energia, água e matérias-primas, além de contribuir diretamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de todo o seu ciclo produtivo (GONZALEZ STUMPF et al., 2014; GONÇALVES DE LASSIO; HADDAD, 2016; FARIAS et al., 2022).

A produção de materiais como concreto, aço e cimento está entre as principais fontes de impacto, pela grande geração de resíduos sólidos, além do consumo de energia e água. A avaliação do ciclo de vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta importante para quantificar e mitigar esses impactos (SAMPAIO et al., 2022; PASSUELLO et al., 2019), por exemplo, pela reutilização de resíduos de construção como alternativa para reduzir o uso de matérias-primas virgens e promover a economia circular (COSTA et al., 2022; SILVA et al., 2023).

A gestão dos resíduos da construção e demolição (RCD) também se apresenta como um dos maiores desafios ambientais urbanos. Estudos apontam que o descarte inadequado desses resíduos contribui para a poluição visual, ocupação irregular de áreas e degradação dos ecossistemas (SILVA; FERNANDES, 2012; QUAGLIO; ARANA, 2020). A implementação de práticas de gestão integrada de resíduos, aliada à economia circular, tem sido apontada como alternativa eficaz para minimizar tais impactos.

Além disso, a escolha de técnicas construtivas e materiais alternativos pode contribuir para construções mais eficientes e sustentáveis. Estudos demonstram que edificações com certificações ambientais tendem a apresentar melhor desempenho energético e menor impacto ambiental ao longo de sua vida útil (PICCOLI et al., 2010). O uso de metodologias como o BIM (Modelagem da Informação da Construção) também tem sido destacado como facilitador na simulação e otimização do desempenho ambiental das obras desde sua concepção (SOUZA et al., 2020).

Com o crescimento das demandas urbanas e a necessidade de conciliar desenvolvimento com responsabilidade ambiental, torna-se imperativo adotar práticas sustentáveis no setor. A sustentabilidade na construção civil não se limita a reduzir impactos ambientais, mas também envolve dimensões econômicas e sociais, compondo o chamado tripé da sustentabilidade (BRUM et al., 2021; PEREIRA et al., 2022).

Os estudos apontam que a incorporação de materiais recicláveis, o reaproveitamento de resíduos e o uso de tecnologias limpas têm sido fundamentais para mitigar os impactos do setor (LIMA et al., 2016; EHRENBRING et al., 2020).

No Brasil, a sustentabilidade na construção civil ainda enfrenta inúmeros desafios, mas os avanços nas últimas décadas indicam um caminho promissor. Empresas brasileiras vêm implementando tecnologias voltadas à redução de impactos, como reaproveitamento de água e energia, uso de materiais com menor pegada ecológica e reciclagem de entulhos (MACHADO et al., 2018; MELO et al., 2021; LEITE; SILVA, 2020). Essas práticas estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial aos ODS 9, 11 e 12, que tratam de inovação, cidades sustentáveis e consumo responsável (BARBOSA JÚNIOR et al., 2024; SOUZA et al., 2020).

Apesar dos avanços, persistem desafios relacionados à cultura organizacional, capacitação técnica e incentivos econômicos, que dificultam a consolidação de práticas sustentáveis (VIEIRA et al., 2020; TAVARES et al., 2022). Outro obstáculo recorrente é a dificuldade de integrar os princípios da sustentabilidade ao planejamento e à execução das obras (SANTOS; SOUZA, 2021; RIBEIRO et al., 2019).

Assim, a sustentabilidade na construção civil deve ser entendida como um processo contínuo de aprimoramento tecnológico e de mudança cultural. A disseminação do conhecimento técnico, o fortalecimento das políticas públicas e a valorização das práticas

sustentáveis no mercado são elementos fundamentais para transformar o setor e promover o desenvolvimento urbano alinhado às metas globais de sustentabilidade.

3.2 Métodos construtivos inovadores e sustentabilidade

A inovação na construção civil tem assumido papel central diante dos desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade, à eficiência produtiva e à necessidade de redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações.

A intensificação das discussões relacionadas à sustentabilidade, à eficiência energética e à racionalização dos processos produtivos tem impulsionado, nas últimas décadas, o desenvolvimento e a adoção de métodos construtivos inovadores no setor da construção civil. Esses sistemas buscam reduzir impactos ambientais, otimizar o uso de recursos naturais e aumentar a eficiência global das edificações, especialmente frente às limitações associadas aos métodos construtivos tradicionais.

De acordo com o Manual de Oslo (OCDE, 2018), a inovação abrange não apenas novos produtos, mas também novos processos e métodos organizacionais. No contexto da construção civil, essa abordagem se reflete na adoção de sistemas construtivos industrializados, que buscam maior previsibilidade, controle de qualidade e redução de desperdícios ao longo do processo construtivo.

Nesse contexto, diferentes soluções construtivas vêm sendo investigadas, como os sistemas *Wood Frame*, Concreto-PVC, a reutilização de contêineres marítimos e o emprego de materiais alternativos, incluindo polímeros reforçados, resíduos recicláveis e compósitos leves. Estudos indicam que sistemas em concreto-PVC e contêineres reutilizados apresentam potencial para construções modulares e industrializadas, com redução de resíduos, especialmente em projetos padronizados (ARRAIZ et al., 2020).

O sistema *Wood Frame* destaca-se pelo uso de madeira de reflorestamento, leveza estrutural, rapidez de montagem e bom desempenho térmico, apresentando resultados ambientais favoráveis em análises de ciclo de vida focadas na fase de produção (DORO; GUIMARÃES; NETO, 2023). Paralelamente, a inovação em materiais, como o uso de

polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) em substituição ao aço e o aproveitamento de resíduos na produção de materiais construtivos, tem ampliado as estratégias de sustentabilidade no setor (SILVA, 2024; BARBOSA; NASCIMENTO; LIMA, 2022; SILVA et al., 2022; SOUSA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2023).

Entre os sistemas industrializados, o *Steelframe* consolidou-se como alternativa aos métodos tradicionais, apresentando vantagens relacionadas à leveza, ao uso de materiais recicláveis e à redução de impactos logísticos. No Brasil, vem se consolidando como alternativa aos métodos tradicionais em alvenaria e concreto armado, especialmente em empreendimentos residenciais de pequeno e médio porte. O sistema apresenta vantagens relacionadas à leveza estrutural, à racionalização construtiva e à redução de resíduos. Contudo, no contexto climático brasileiro, demanda soluções complementares de isolamento térmico e acústico para atendimento aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15575.

Nesse cenário evolutivo, o sistema ICF (*Insulated Concrete Forms*) emerge como uma evolução conceitual dos sistemas construtivos industrializados, ao integrar, em um único elemento construtivo, função estrutural, isolamento térmico e racionalização produtiva. Diferentemente dos sistemas convencionais, nos quais essas funções são atendidas por camadas distintas e executadas em etapas sucessivas, o ICF incorpora essas funções em um único sistema construtivo. Essa abordagem contribui para a racionalização do processo executivo e para a redução de interfaces construtivas, aspectos frequentemente associados à diminuição de perdas e retrabalhos. Contudo, essa mesma integração pode limitar a flexibilidade de intervenções futuras e demandar maior atenção ao projeto e à especificação dos materiais.

3.2.1 O Sistema ICF (*Insulated Concrete Forms*)

Dentre os métodos construtivos inovadores, o sistema ICF (*Insulated Concrete Forms*) tem sido apontado na literatura científica como uma alternativa com elevado potencial técnico e ambiental, por integrar desempenho estrutural, eficiência térmica e energética e durabilidade em um único sistema construtivo. Estudos experimentais e numéricos indicam que edificações executadas com paredes em ICF apresentam maior estabilidade térmica e redução significativa no consumo de energia operacional, quando comparadas a sistemas convencionais de vedação,

especialmente em climas quentes e temperados, o que contribui para o conforto ambiental e para a mitigação de impactos ao longo da vida útil da edificação (NUNES; MIOTTO, 2022).

Sob a perspectiva ambiental, análises de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicadas a sistemas construtivos com ICF indicam que, embora a fase de produção apresente impactos relevantes associados principalmente ao uso de concreto e materiais poliméricos, o desempenho energético superior ao longo da vida útil pode compensar parte desses impactos quando comparado a sistemas tradicionais. Avaliações comparativas conduzidas segundo as diretrizes da ISO 14044 demonstram que edificações em ICF podem apresentar desempenho ambiental competitivo em análises de ciclo de vida completo, sobretudo devido à redução da demanda energética na fase de uso, reforçando o potencial do sistema como solução alinhada aos princípios da construção sustentável (MARCEAU; VANGEEM, 2008).

O sistema ICF é composto por formas de poliestireno expandido (EPS) que permanecem no local após o enchimento com concreto estrutural, atuando simultaneamente como fôrma e isolamento térmico. Essa característica elimina a necessidade de remoção das fôrmas e confere à parede elevada capacidade de isolamento e durabilidade, além de permitir execução ágil e com menor geração de resíduos. Apesar de o poliestireno expandido (EPS) ser o material mais comumente utilizado como fôrma permanente nos sistemas de *Insulated Concrete Forms* (ICF), há inovações tecnológicas que empregam alternativas, tais como poliestireno extrudado (XPS), placas cimentícias com miolo isolante e materiais compósitos derivados de madeira e cimento. Contudo, o sistema ICF à base de EPS continua sendo a opção mais consolidada no mercado e a mais investigada em publicações técnicas e científicas, constituindo, assim, o objeto principal desta pesquisa.

Estudos recentes têm demonstrado que o desempenho ambiental e funcional do sistema construtivo ICF (*Insulated Concrete Forms*) está diretamente relacionado à sua configuração integrada, na qual as formas permanentes de EPS atuam conjuntamente com o concreto estrutural, proporcionando simultaneamente função estrutural, isolamento térmico e racionalização construtiva. Pesquisas que avaliam o uso do EPS em matrizes cimentícias e sistemas construtivos indicam que sua principal contribuição não se limita às propriedades isolantes, mas também à melhoria do desempenho global da edificação, especialmente no que se refere à eficiência energética (PASSOS; CARASEK, 2018).

No contexto do ICF, o EPS não deve ser analisado de forma isolada, mas como componente de um sistema industrializado que combina leveza, isolamento e durabilidade estrutural. Silva e Cordeiro (2022) destacam que materiais à base de EPS apresentam

características favoráveis para aplicação em elementos construtivos, como redução de peso próprio e melhoria do desempenho termoacústico. Essas propriedades são potencializadas no sistema ICF, no qual o EPS permanece incorporado à edificação, contribuindo para o conforto ambiental e para a redução das demandas energéticas ao longo da vida útil do edifício.

Além disso, estudos que investigam o uso do EPS em componentes cimentícios indicam que sua incorporação pode ocorrer sem prejuízo significativo ao desempenho técnico quando adequadamente associado a outros materiais estruturais. Fabiche e Minillo (2023), ao analisarem blocos vazados com substituição parcial de agregados por EPS, demonstraram que o desempenho mecânico pode ser mantido dentro de limites aceitáveis. Esses resultados reforçam a lógica do sistema ICF, no qual o concreto assume a função estrutural principal, enquanto o EPS desempenha papel complementar, ampliando o desempenho térmico e reduzindo a massa do sistema construtivo.

De forma complementar, Strecker, Silva e Panzera (2014) evidenciam que a incorporação de EPS em compósitos cimentícios resulta em materiais com menor massa específica, facilitando o transporte, o manuseio e a execução em canteiro, sem comprometer significativamente a resistência mecânica. Tais características são particularmente relevantes para o sistema ICF, que se beneficia da leveza das fôrmas isolantes para otimizar a logística, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência do processo construtivo.

Dessa forma, o sistema construtivo ICF pode ser caracterizado como um sistema industrializado que integra funções estruturais e de isolamento térmico por meio da associação entre formas permanentes de EPS e concreto estrutural. Essa configuração resulta em um sistema com características específicas de desempenho térmico, estrutural e produtivo, cuja aplicação está relacionada à padronização construtiva e à racionalização dos processos de execução. Tais características tornam o sistema ICF um objeto pertinente de análise sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida, permitindo a investigação de seus impactos ambientais, potencialidades e limitações no contexto da sustentabilidade da construção civil.

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia reconhecida internacionalmente para a identificação, quantificação e interpretação dos impactos ambientais associados a produtos, processos ou sistemas ao longo de seu ciclo de vida. Seu objetivo é fornecer uma visão abrangente dos fluxos de matéria e energia, bem como das emissões, efluentes e resíduos gerados, considerando diferentes etapas do ciclo de vida, conforme os limites definidos no estudo.

No setor da construção civil, a aplicação da ACV tem se mostrado particularmente relevante devido à elevada complexidade dos sistemas construtivos, à diversidade de materiais empregados e à expressiva contribuição do setor para impactos ambientais globais, como o consumo de recursos naturais e as emissões de gases de efeito estufa (CABEZA et al., 2014; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Diferentemente de análises pontuais, a ACV permite avaliar o desempenho ambiental de forma integrada, evitando a transferência de impactos entre etapas do ciclo de vida.

De acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, a ACV é estruturada em quatro fases principais: definição do objetivo e do escopo; inventário do ciclo de vida (ICV); avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV); e interpretação dos resultados. Essas fases são interdependentes e devem ser conduzidas de maneira iterativa, assegurando consistência metodológica e transparência na comunicação dos resultados.

No contexto de sistemas construtivos industrializados, como o ICF (*Insulated Concrete Forms*), a ACV apresenta-se como uma ferramenta adequada para a avaliação do desempenho ambiental, pois possibilita analisar de forma integrada os impactos associados à produção dos diferentes materiais que compõem o sistema. A adoção do escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*) é amplamente utilizada em estudos voltados à fase de produção e à elaboração de Declarações Ambientais de Produto, uma vez que permite maior controle sobre os dados e maior precisão na identificação dos processos mais impactantes (PASSER et al., 2015; BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

3.3.1 Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida

A operacionalização da Avaliação do Ciclo de Vida é viabilizada por meio do uso de softwares especializados, que auxiliam na modelagem dos sistemas produtivos, na organização do inventário e no cálculo dos impactos ambientais. Entre as ferramentas mais utilizadas destacam-se SimaPro, GaBi, Umberto, Brightway e openLCA, amplamente reconhecidas no meio acadêmico e profissional (GUINÉE et al., 2011).

O SimaPro é um dos softwares de ACV mais tradicionais e amplamente difundidos no meio acadêmico e profissional. Desenvolvido pela PRé Sustainability, o SimaPro é reconhecido por sua interface amigável, ampla disponibilidade de métodos de avaliação de impacto e integração com bases de dados consolidadas, como a Ecoinvent. Sua utilização é frequente em estudos comparativos e em Declarações Ambientais de Produto, especialmente em contextos industriais. Contudo, trata-se de um software proprietário, com custos de licenciamento que podem limitar seu uso em ambientes acadêmicos.

O GaBi, desenvolvido pela Sphera, é amplamente utilizado em aplicações industriais e corporativas, destacando-se pela robustez na modelagem de processos complexos e pela integração com extensas bases de dados específicas por setor. O software é frequentemente empregado em estudos de ACV voltados à indústria de manufatura, energia e construção, apresentando elevado nível de detalhamento técnico. Assim como o SimaPro, o GaBi possui licença proprietária, o que pode restringir sua acessibilidade para pesquisas acadêmicas de longo prazo.

O Umberto é uma ferramenta que combina conceitos de ACV com análise de fluxo de materiais e energia (Material Flow Analysis – MFA). Desenvolvido pela Ifu Hamburg, o software é particularmente adequado para estudos que envolvem simbiose industrial, ecoeficiência e análise de sistemas produtivos complexos. Sua abordagem baseada em fluxogramas facilita a visualização dos fluxos, embora sua aplicação em estudos estritamente voltados à construção civil seja menos frequente em comparação com outras ferramentas.

O Brightway consiste em um conjunto de bibliotecas de código aberto desenvolvidas em linguagem Python, amplamente utilizadas em pesquisas avançadas de ACV. Diferentemente dos softwares com interface gráfica tradicional, o Brightway exige conhecimento em programação, oferecendo elevado grau de flexibilidade e controle sobre os modelos. Essa característica o torna particularmente atraente para pesquisadores experientes e estudos metodológicos, embora possa representar uma barreira para aplicações mais diretas ou para usuários sem formação em programação.

O openLCA foi desenvolvido pela GreenDelta e destaca-se como um software de código aberto, amplamente adotado em pesquisas acadêmicas e estudos de sustentabilidade. O software oferece interface gráfica intuitiva, suporte a diferentes métodos de avaliação de impacto e compatibilidade com bases de dados internacionais, como a Ecoinvent. Além disso, o openLCA foi desenvolvido em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, permitindo a modelagem transparente e documentada dos sistemas avaliados.

3.4 Declaração Ambiental de Produto (DAP)

A Declaração Ambiental de Produto (DAP) é um documento técnico padronizado que comunica o desempenho ambiental de um produto com base em resultados quantificados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Trata-se de uma declaração ambiental do Tipo III, conforme estabelecido pela ISO 14025 (ISO, 2006a), que comunica de forma padronizada e verificada os impactos ambientais de um produto com base em ACV. Diferentemente dos rótulos ambientais do Tipo I, que envolvem certificação com critérios qualitativos múltiplos, e do Tipo II, que correspondem a autodeclarações ambientais do fabricante, a Declaração Ambiental do Tipo III apresenta informações ambientais quantitativas, verificadas por terceira parte independente, com base em regras específicas de categoria de produto. Essas regras garantem a comparabilidade entre produtos pertencentes à mesma categoria, desde que elaboradas sob os mesmos critérios metodológicos.

A base metodológica para elaboração de uma DAP está fundamentada na Avaliação do Ciclo de Vida, conforme definido nas normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006b; ISO, 2006c), que estabelecem os princípios, requisitos e diretrizes para condução de estudos de ACV. Dessa forma, a robustez da DAP depende diretamente da consistência metodológica do inventário de ciclo de vida e da modelagem dos impactos ambientais.

No setor da construção civil, a estruturação das DAPs é orientada pela norma EN 15804 (CEN, 2012), que define regras de categoria de produto (PCR) e organiza os resultados ambientais em módulos do ciclo de vida (A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4 e módulo D). Os módulos A1–A3 correspondem à etapa denominada berço ao portão (*cradle-to-gate*),

contemplando extração de matérias-primas, transporte interno e processos industriais de fabricação.

Embora a EN 15804 seja uma norma europeia, seus princípios têm sido amplamente utilizados como referência técnica internacional, inclusive em pesquisas acadêmicas brasileiras voltadas à avaliação ambiental de materiais de construção (BUENO; ROSSIGNOLO, 2020).

A DAP não constitui um selo de desempenho superior, mas um instrumento de transparência ambiental, permitindo a comunicação padronizada de indicadores como Potencial de Aquecimento Global (GWP), consumo de energia primária, uso de recursos naturais e geração de resíduos (IBÁÑEZ-FORÉS; BOVEA; AZAPAGIC, 2013). Nesse sentido, sua credibilidade está associada à qualidade dos dados de inventário e à aderência às normas internacionais.

No presente estudo, a definição do escopo berço ao portão está alinhada aos módulos A1–A3 da EN 15804 (CEN, 2012), assegurando coerência entre a metodologia da ACV adotada e a estrutura técnica necessária à futura elaboração de uma DAP para o sistema ICF no contexto brasileiro.

3.5 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a Construção Civil

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos em 2015 pela Organização das Nações Unidas (ONU) como parte da Agenda 2030, com o propósito de orientar políticas públicas, práticas empresariais e iniciativas acadêmicas em torno de 17 objetivos globais que buscam erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e assegurar prosperidade para todos até 2030 (ONU, 2015). Diferentemente dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), que tinham foco mais restrito em áreas sociais, os ODS ampliam o escopo para dimensões ambientais, econômicas e institucionais, formando um arcabouço global de sustentabilidade (SACHS, 2015).

Considerando-se a necessidade de estudos e ações voltados ao atendimento dos ODS, conforme referendado em discussões e tratados junto aos países membros do acordo de Paris, este estudo contribui fortemente com alguns destes objetivos. A Figura 2 ilustra os Objetivos

de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que servem como referência global para o desenvolvimento sustentável. Essa representação reforça a importância de integrar as dimensões ambiental, social e econômica nas práticas da construção civil.

Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Organização das Nações Unidas (2015).

Os ODS constituem uma agenda universal, integrada e indivisível, que exige articulação entre diferentes setores e escalas de atuação (LE BLANC, 2015; COSTA et al., 2021). Nesse sentido, o setor da construção civil tem papel central, visto que é responsável por elevada parcela do consumo de recursos naturais, geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (WORLD GREEN BUILDING COUNCIL, 2018). Assim, sistemas construtivos inovadores e eficientes, como o ICF (*Insulated Concrete Forms*), podem contribuir para a materialização de metas associadas à eficiência energética, sustentabilidade urbana e mitigação das mudanças climáticas.

Estudos destacam a relevância dos ODS para orientar práticas mais sustentáveis na construção civil. Segundo Silvestre et al. (2019), o cumprimento de metas vinculadas ao ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e ao ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) depende da adoção de novos materiais e processos construtivos que conciliem desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Além disso, o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) estão diretamente relacionados ao desafio de reduzir impactos ambientais associados ao ciclo de vida de edificações.

No contexto brasileiro, a integração dos ODS à construção civil vem sendo discutida em diretrizes públicas, normas técnicas e programas de certificação ambiental, que buscam alinhar o setor às metas globais de sustentabilidade. A NBR 15575 reforça a importância de soluções que garantam eficiência energética, conforto ambiental e gestão responsável de resíduos, em consonância com os compromissos internacionais da Agenda 2030.

Portanto, a análise de sistemas construtivos inovadores sob a ótica da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), como desenvolvida nesta dissertação, oferece uma contribuição direta ao avanço do conhecimento aplicado e às políticas alinhadas aos ODS, especialmente os de números 7, 9, 11, 12 e 13, que dialogam com eficiência energética, inovação, sustentabilidade urbana, consumo responsável e combate às mudanças climáticas.

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma metodologia estruturada, sistemática e replicável, respeitando os princípios estabelecidos pelas normas ISO 14040 e ISO 14044 para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A pesquisa é classificada como aplicada, pois busca gerar conhecimento com finalidade prática, direcionado à avaliação ambiental de um sistema construtivo real e à proposição de um produto técnico (Declaração Ambiental do Produto – DAP). Quanto à abordagem, caracteriza-se como mista, combinando:

- abordagem quantitativa, empregada na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e no cálculo dos impactos ambientais por meio da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV);
- abordagem qualitativa, utilizada na interpretação dos resultados, na identificação de vantagens, limitações e pontos críticos do sistema ICF e na discussão de implicações técnicas e ambientais.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa configura-se como um estudo de avaliação ambiental baseado em ACV, aplicado a um sistema construtivo industrializado.

O objeto da pesquisa é o sistema construtivo ICF (*Insulated Concrete Forms*), baseado em formas permanentes de Poliestireno Expandido (EPS) preenchidas com concreto estrutural. Como etapa de apoio à caracterização do sistema e à validação das premissas adotadas na modelagem do inventário do ciclo de vida, foi realizada visita técnica a uma obra localizada no município de Cotia (SP), cuja alvenaria estrutural foi executada utilizando o sistema ICF (ilustrado nas figuras 3, 4, 5 e 6), com formas permanentes fabricadas pela empresa Eme Indústria de EPS. As informações observadas em campo subsidiaram a compreensão do processo construtivo, das etapas de montagem e do consumo de materiais, sem, contudo, configurar a obra visitada como estudo de caso específico ou fonte primária de dados quantitativos para a modelagem da ACV.

Figura 3 - Preenchimento das formas do Sistema ICF



Fonte: Foto tirada pelo autor em 7 abr. 2025.

Figura 4 - Corte dos painéis do Sistema ICF



Fonte: Foto tirada pelo autor em 7 abr. 2025.

Figura 5 - Montagem do Sistema ICF



Fonte: Foto tirada pelo autor em 7 abr. 2025.

Figura 6 - Parede estrutural ICF



Fonte: Foto tirada pelo autor em 7 abr. 2025.

As etapas da Metodologia da Pesquisa foram: Definição do objetivo e do escopo da ACV; Modelagem do sistema e fronteiras do sistema; Coleta de dados e construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Escolha de software e base de dados; Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV); Análise e interpretação dos resultados e Estruturação da Declaração Ambiental do Produto (DAP).

4.1 Definição do objetivo e do escopo da ACV

Em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044, a primeira etapa consistiu na definição clara do objetivo e do escopo da ACV.

O objetivo da ACV é avaliar o desempenho ambiental do sistema construtivo ICF, identificando seus impactos ambientais associados às etapas iniciais do ciclo de vida e fornecendo subsídios técnicos para a elaboração de uma Declaração Ambiental do Produto (DAP).

A unidade funcional adotada foi definida como 1 m² de parede estrutural em sistema ICF, considerando vida útil de referência de 50 anos, em conformidade com a Vida Útil de Projeto mínima estabelecida pela ABNT NBR 15575 para sistemas estruturais. A escolha dessa unidade funcional permite a comparação com estudos semelhantes disponíveis na literatura, além de ser compatível com análises de desempenho ambiental e com a estruturação de uma Declaração Ambiental do Produto.

O escopo da ACV foi definido como do berço ao portão (*cradle-to-gate*), abrangendo exclusivamente a fase de produção do sistema construtivo. As fronteiras do sistema incluem os processos de extração e processamento de matérias-primas, produção industrial do EPS, produção de cimento e agregados, fabricação do concreto e fabricação dos componentes do sistema ICF, conforme ilustrado na Figura 7. Foram excluídas do escopo as etapas de transporte para a obra, construção, uso, manutenção e fim de vida, uma vez que o foco do estudo está alinhado à elaboração da Declaração Ambiental de Produto (DAP) e à análise da fase de produção do sistema.

Figura 7 - Fluxograma do Ciclo de Vida do Sistema ICF



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.1 Modelagem do sistema e fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema foram definidas de forma a incluir todos os processos relevantes para a produção do sistema ICF dentro do escopo berço ao portão. Para fins de replicabilidade, a modelagem seguiu as seguintes etapas sequenciais:

- Identificação de todos os materiais constituintes do sistema ICF por m² de parede;
- Quantificação das massas de EPS, concreto, aço complementar e demais insumos;
- Associação de cada material a um processo equivalente presente na base de dados selecionada;
- Definição dos fluxos de entrada (materiais, energia, água) e de saída (emissões e resíduos).

4.2 Coleta de dados e construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) foi realizada a partir da combinação de dados primários e dados secundários, conforme descrito a seguir:

- Dados primários: informações técnicas fornecidas por fabricante nacional de sistemas ICF, referentes à composição do sistema, dimensões dos blocos, espessuras, consumo de concreto e características do EPS;

- Dados secundários: dados extraídos da base de dados Ecoinvent, adaptados ao contexto brasileiro sempre que possível, especialmente no que se refere à matriz energética e aos processos industriais.

4.3 Definição do Software e base de dados utilizados

A modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) do sistema construtivo ICF foi realizada com o auxílio do software openLCA, em conjunto com a base de dados Ecoinvent. A escolha dessas ferramentas fundamenta-se em sua ampla utilização em estudos acadêmicos e técnicos de Avaliação do Ciclo de Vida, bem como em sua aderência às diretrizes metodológicas estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044.

A base de dados principal utilizada foi a Ecoinvent, reconhecida por sua abrangência, consistência metodológica e recorrente aplicação em estudos de ACV no setor da construção civil. Sempre que necessário, foram realizados ajustes e aproximações para representar o contexto brasileiro, especialmente no que se refere à matriz elétrica e ao tipo de cimento empregado.

A compatibilidade do openLCA com bases de dados gratuitas, como Eco-Indicator 99, possibilitou a quantificação dos impactos ambientais e a adaptação do modelo ao contexto brasileiro, com ajustes relacionados ao uso de cimento CP-III e ao mix energético local. Além disso, a flexibilidade do software para a geração de gráficos e exportação de dados para planilhas eletrônicas atendeu às necessidades de elaboração de um guia técnico e de uma base

de dados replicável, alinhando-se aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável — ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

4.3.1 *Software openLCA*

O openLCA, versão 2.5 (2025), é um software de código aberto que permite a modelagem detalhada de sistemas complexos por meio da organização de processos e fluxos de materiais, energia e emissões ao longo das etapas do ciclo de vida consideradas. Sua arquitetura modular possibilita a definição clara da unidade funcional e das fronteiras do sistema, favorecendo a transparência metodológica, a rastreabilidade dos dados e a reprodutibilidade dos resultados.

No presente estudo, o software foi empregado para a estruturação do Inventário do Ciclo de Vida e para a aplicação integrada do método de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida selecionado, assegurando coerência entre as etapas de modelagem, avaliação e interpretação dos resultados.

De forma simplificada, o openLCA aplica a seguinte fórmula:

$$P_{ti} = \text{Valori} \times F_{\text{normalização},i} \times F_{\text{ponderação},i}, \text{ onde:}$$

- P_{ti} (Pontuação de impacto para o tema i) é o valor final do impacto ambiental para a categoria temática i (i = Saúde Humana, Ecossistema ou Recursos). Geralmente expresso em pontos (Pt) por unidade funcional ou por fluxo avaliado;

- Valori (Valor de impacto bruto para i) é a soma dos impactos observados/estimados na categoria i antes de normalização e ponderação. Obtido aplicando fatores de caracterização (do método Eco-indicator 99) aos inventários de emissões/recursos — por exemplo, DALY-

equivalentes para Saúde Humana, perda de potencial de espécie·ano para Ecossistemas, e extração/escassez para Recursos.

- $F_{normalização,i}$ (Fator de normalização para i) é o fator que converte o $Valori$ para uma escala comum ao dividir (ou multiplicar) pelo impacto de referência (normalização) — tipicamente o impacto total anual per capita ou total de uma região/ano, para tornar os valores comparáveis entre categorias. Indica a ordem de grandeza relativa do impacto da unidade funcional em relação a um contexto de referência.

- $F_{ponderação,i}$ (Fator de ponderação para i) é o peso que reflete a importância relativa atribuída à categoria i na perspectiva hierárquica padrão do Eco-indicator 99. Converte valores normalizados em pontos finais, permitindo agregar as três categorias numa única pontuação ponderada conforme preferências (p.ex. ética/valoración humana do método);

- i = Saúde Humana, Ecossistema, Recursos: as três áreas de dano do Eco-indicator 99 (hierarchical perspective) que representam diferentes tipos de consequências ambientais; cada uma é tratada separadamente até a fase de ponderação/agrupamento.

Ressalta-se que os valores expressos em pontos (Pt) não correspondem a uma conversão direta das unidades físicas de impacto (DALY, species·yr e MJ surplus), mas resultam do processo de normalização, ponderação e agregação previsto no método Eco-indicator 99.

4.3.2 Indicadores de avaliação ambiental

Na Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), os indicadores ambientais são utilizados para quantificar os impactos potenciais associados aos fluxos de materiais, energia e emissões ao longo do ciclo de vida do sistema analisado. No openLCA, a escolha dos indicadores está diretamente associada ao método de avaliação de impacto adotado.

Neste estudo, foi utilizado o método Eco-indicator 99 (*endpoint*), que organiza os impactos ambientais em três categorias de dano, permitindo uma interpretação integrada dos resultados:

Saúde Humana, expressa em Disability Adjusted Life Years (DALY), relacionada a impactos decorrentes de emissões atmosféricas, substâncias tóxicas e outros fatores que afetam a saúde da população;

Qualidade do Ecossistema, expressa em species·year, associada a alterações em ecossistemas naturais causadas por emissões, uso do solo e poluição ambiental;

Recursos Naturais, expressa em megajoules (MJ) surplus, relacionada ao consumo e à escassez de recursos minerais e energéticos.

O método Eco-indicator 99 realiza a normalização, ponderação e agregação desses indicadores, resultando em um indicador ambiental único, expresso em pontos (Pt), que facilita a comparação entre categorias de dano e a interpretação global do desempenho ambiental do sistema construtivo ICF no escopo analisado.

Embora o openLCA possibilite a aplicação de outros métodos amplamente reconhecidos — como ReCiPe, CML, ILCD e IMPACT 2002+ —, o Eco-indicator 99 foi selecionado por sua adequação à abordagem adotada na pesquisa, especialmente por permitir a análise integrada dos impactos ambientais da fase produtiva do sistema construtivo.

Os indicadores apresentados nesta seção referem-se às categorias de impacto ambiental consideradas no estudo. O procedimento metodológico utilizado para o cálculo desses impactos é descrito na seção 4.4, referente à Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), conforme estabelecido pela ISO 14044.

4.3.3 Recursos e funcionalidades do openLCA aplicados no estudo

O openLCA disponibiliza um conjunto de recursos que ampliam sua aplicabilidade em estudos de ACV. No presente trabalho, foram utilizados os seguintes recursos principais:

- Inventário do Ciclo de Vida (ICV): estruturação detalhada dos fluxos de entrada (matérias-primas, energia e recursos naturais) e de saída (emissões e resíduos) associados às etapas de produção do sistema ICF;
- Modelagem de processos e sistemas: organização dos processos elementares em cadeias produtivas representativas do escopo berço ao portão;
- Análise de contribuição: identificação dos processos e materiais que mais contribuem para os impactos ambientais totais;
- Geração de gráficos e tabelas: apoio à apresentação e interpretação dos resultados.

Essas funcionalidades permitiram avaliar de forma consistente os impactos ambientais do sistema construtivo ICF, assegurando alinhamento entre a modelagem do inventário, a avaliação de impactos e a análise dos resultados.

4.3.4 Base de dados utilizada

A base de dados utilizada para a modelagem dos processos foi a Ecoinvent, versão 3.10, reconhecida internacionalmente como uma das principais bases de dados de Avaliação do Ciclo de Vida. Desenvolvida por um consórcio suíço, a Ecoinvent disponibiliza inventários detalhados e revisados de processos industriais, produção de materiais, transporte, energia e atividades do setor da construção civil.

A Ecoinvent caracteriza-se por sua abrangência global, transparência metodológica, estrutura modular e compatibilidade com diferentes softwares de ACV, incluindo o openLCA. No contexto desta pesquisa, a base forneceu dados essenciais para a modelagem da produção de cimento, concreto, poliestireno expandido (EPS), transporte de materiais e consumo de energia elétrica.

Sempre que possível, os dados da Ecoinvent foram ajustados para representar o contexto brasileiro, especialmente no que se refere à matriz elétrica e às condições produtivas, de modo a aumentar a representatividade e a confiabilidade dos resultados obtidos. A utilização dessa base assegurou consistência metodológica, comparabilidade com outros estudos de ACV e aderência às normas ISO 14040 e ISO 14044.

4.4 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Após a definição dos indicadores ambientais considerados no estudo, esta seção apresenta o procedimento metodológico adotado para a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), etapa responsável pela conversão dos fluxos do inventário em potenciais impactos ambientais por meio de métodos de caracterização apropriados.

A Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida foi conduzida por meio do método Eco-indicator 99, selecionado por sua abordagem de ponto final (*endpoint*), que permite a agregação dos impactos em categorias de dano:

- Saúde humana;
- Qualidade do ecossistema;
- Recursos naturais.

O método foi aplicado diretamente no ambiente do openLCA, a partir do inventário previamente construído, gerando resultados quantitativos para cada categoria de impacto e para o impacto ambiental total.

No método Eco-indicator 99, implementado no ambiente openLCA, o cálculo dos impactos seguiu três níveis hierárquicos: (i) Inventário do Ciclo de Vida (ICV), no qual são quantificados os fluxos de matérias-primas, energia, emissões e resíduos associados à produção de 1 m² de parede ICF; (ii) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), que converte os fluxos do inventário em categorias de dano do tipo endpoint — Saúde Humana (DALY), Qualidade do Ecossistema (species·yr) e Recursos Naturais (MJ surplus); e (iii) agregação final (*single score*), na qual as categorias são normalizadas, ponderadas e convertidas para uma unidade comum, pontos (Pt).

4.5 Análise e interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados seguiu as diretrizes estabelecidas pela ISO 14044, considerando:

- Identificação dos processos mais impactantes;
- Avaliação das contribuições relativas do EPS, do concreto e dos demais insumos;
- Análise crítica das vantagens ambientais e das limitações do sistema ICF no escopo avaliado;
- Verificação da coerência entre os resultados obtidos e os objetivos definidos inicialmente.

Essa etapa incluiu análise gráfica, comparação entre categorias de impacto e discussão dos resultados à luz da literatura científica.

As análises de sensibilidade apresentadas no capítulo de resultados são tratadas como instrumentos de interpretação, não alterando o escopo da ACV nem os resultados do cenário base.

Adicionalmente, os resultados obtidos na etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) serão posteriormente analisados sob a perspectiva dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, especialmente aqueles relacionados à produção e consumo responsáveis, ação climática, indústria e infraestrutura sustentável. Essa análise complementar não altera o escopo metodológico da ACV, mas amplia a interpretação dos resultados ao conectá-los com diretrizes globais de sustentabilidade, conferindo maior contextualização estratégica ao desempenho ambiental do sistema construtivo estudado.

4.6 Estruturação da Declaração Ambiental do Produto (DAP)

Com base nos resultados da ACV, foi estruturada uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) alinhada aos princípios da norma ISO 14025. A DAP incluiu:

- Descrição do produto e da unidade funcional;
- Definição do escopo e das fronteiras do sistema;
- Resultados quantitativos dos impactos ambientais;
- Indicação de limitações metodológicas;
- Informações destinadas à comparação técnica, sem caráter comercial.

Embora o escopo da ACV tenha sido limitado às etapas de produção (berço ao portão), reconhece-se que sistemas construtivos como o ICF apresentam impactos relevantes também nas fases de uso e fim de vida. Assim, aspectos relacionados ao desempenho térmico, consumo energético operacional, durabilidade e gestão de resíduos são discutidos qualitativamente no capítulo de resultados, com base em evidências técnicas e normativas, sem que sejam incorporados aos resultados quantitativos da ACV.

4.7 Conexão da ACV com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A conexão entre os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas no âmbito da Agenda 2030, foi estruturada como etapa interpretativa complementar da pesquisa.

A metodologia adotada consistiu na correlação entre os indicadores ambientais obtidos na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) — especialmente aqueles relacionados ao Potencial de Aquecimento Global (GWP), consumo de energia primária e uso de recursos naturais — e os ODS diretamente associados à sustentabilidade ambiental, eficiência produtiva e mitigação climática.

A vinculação entre indicadores e ODS foi realizada com base em três critérios metodológicos:

I – Relação direta entre categoria de impacto e meta ambiental do ODS (ex.: emissões de gases de efeito estufa e ODS 13);

II – Relação indireta associada ao desempenho técnico do sistema construtivo (ex.: eficiência térmica e ODS 7);

III – Contribuição sistêmica vinculada à inovação produtiva e racionalização de recursos (ex.: ODS 9, 11 e 12).

Considerando que o escopo da ACV foi delimitado como berço ao portão, a análise dos ODS concentrou-se predominantemente nos impactos relacionados à fase de produção, reconhecendo-se que contribuições associadas à fase de uso da edificação configuram potencial indireto, não quantificado no presente estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do sistema construtivo analisado, considerando o escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*) e os módulos A1–A3 do ciclo de vida. A análise foi realizada a partir da modelagem desenvolvida no software openLCA, utilizando a base de dados Ecoinvent e o método de avaliação de impactos Eco-indicator 99, conforme os procedimentos metodológicos descritos no Capítulo 4.

Os resultados referem-se à Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) do sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF), considerando como unidade funcional 1 m² de parede estrutural, com vida útil de referência de 50 anos. Inicialmente são apresentados os indicadores ambientais obtidos a partir da modelagem, incluindo categorias de impacto ambiental e indicadores de uso de recursos associados à fase de produção do sistema.

Ressalta-se que os resultados quantitativos apresentados referem-se exclusivamente às etapas de extração de matérias-primas, produção industrial e fabricação dos componentes do sistema ICF. As etapas posteriores do ciclo de vida — como transporte para a obra, construção, fase de uso, manutenção e fim de vida — não foram modeladas quantitativamente nesta ACV, em função do escopo adotado.

Ainda assim, na etapa de interpretação dos resultados, aspectos relacionados ao desempenho térmico, durabilidade e potencial de redução de resíduos na construção são discutidos de forma qualitativa, com base em literatura técnica, normas brasileiras e documentos de avaliação de desempenho. Essa abordagem permite contextualizar os impactos ambientais associados à fase de produção com características do sistema construtivo que podem influenciar seu desempenho ambiental ao longo da vida útil das edificações.

5.1 Resultados gerais da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF

Os resultados apresentados nesta seção referem-se à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF), baseado em formas permanentes de poliestireno expandido (EPS) preenchidas com concreto estrutural. A modelagem foi realizada no software openLCA (versão 2.5, 2025), utilizando o método Eco-indicator 99 e a base de

dados Ecoinvent v3.10, ajustada ao contexto brasileiro, especialmente no que se refere à matriz elétrica e ao uso de cimento CP-III.

Embora a modelagem do inventário tenha sido conduzida no escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*), considerando apenas os módulos A1–A3 do ciclo de vida, a interpretação dos resultados é realizada à luz das características de desempenho do sistema construtivo analisado. Nesse contexto, aspectos como desempenho térmico, durabilidade e potencial de redução de resíduos construtivos são considerados para contextualizar os resultados ambientais obtidos na fase de produção. Essa abordagem permite relacionar os impactos associados à fabricação dos materiais com benefícios potenciais do sistema ao longo de sua vida útil, contribuindo para uma análise mais abrangente da sustentabilidade do sistema ICF.

O impacto ambiental total obtido para o sistema ICF foi de aproximadamente 730 pontos (Pt). Esse valor resulta da agregação ponderada das três categorias de dano do método Eco-indicator 99: Recursos Naturais, Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema. Observa-se a predominância da categoria Recursos Naturais, associada principalmente ao consumo de cimento e energia na fase de produção, seguida pela categoria Saúde Humana, relacionada às emissões atmosféricas, e pela Qualidade do Ecossistema, que apresentou contribuição menos expressiva. Estes dados podem ser conferidos na Tabela 1, onde também se observa que a categoria Recursos Naturais a principal responsável pelo resultado agregado, com cerca de 230 MJ surplus.

Os resultados obtidos para o sistema construtivo ICF são apresentados a seguir, considerando as categorias de dano Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema e Recursos Naturais.

As categorias Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema apresentaram valores da ordem de $1,5 \times 10^{-6}$ DALY e $1,6 \times 10^{-4}$ species·yr, respectivamente, magnitudes compatíveis com estudos de Avaliação do Ciclo de Vida aplicados a sistemas construtivos à base de concreto e isolamento térmico contínuo. Esses resultados confirmam a predominância dos impactos associados ao consumo de recursos minerais e energéticos na fase de produção dos materiais constituintes do sistema ICF.

Tabela 1 – Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida do sistema ICF por categoria de dano (unidades físicas – Eco-indicator 99)

Categoria do Dano	Unidade	Valor
Recursos Naturais	MJ surplus	230
Saúde Humana	DALY	1,5E-06
Qualidade do Ecossistema	species·yr	1,6E-04
Total	Pt	730

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em dados modelados no openLCA 2.5 (2025).

Nesse método, cada categoria de dano é inicialmente expressa em sua unidade específica e, posteriormente, convertida em pontos (Pt) por meio de fatores de normalização e ponderação, permitindo a comparação e a soma dos impactos em um indicador agregado (single score). Dessa forma, os valores apresentados na Tabela 2 refletem a contribuição relativa de cada categoria de dano para o impacto ambiental total do sistema ICF, conforme calculado automaticamente pelo software openLCA.

Tabela 2 – Resultados agregados da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF por categoria de dano (Eco-indicator 99 – Pt)

Categoria do Dano	Impacto (Pt)
Recursos Naturais	420
Saúde Humana	230
Qualidade do Ecossistema	80
Total	730

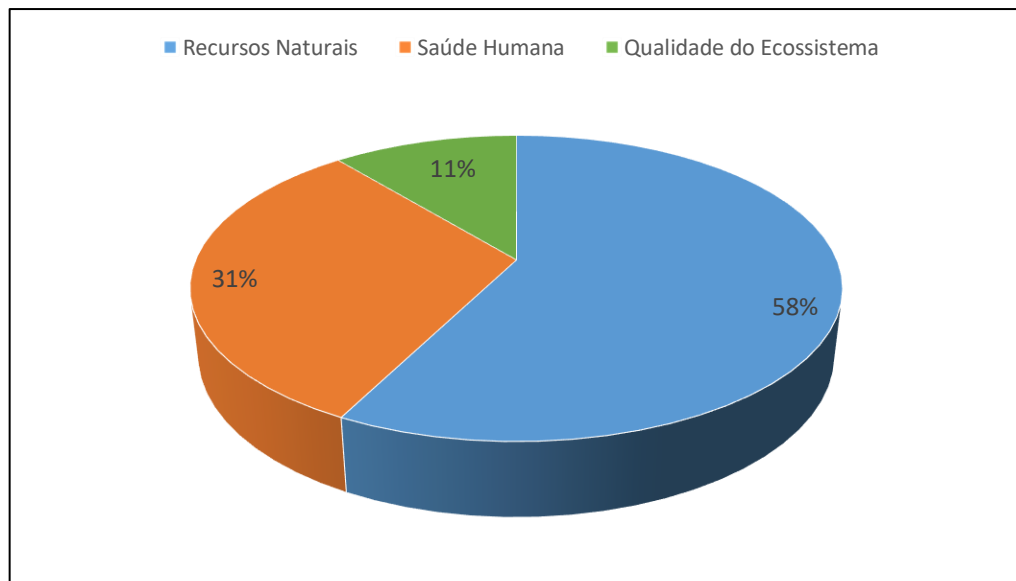
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em dados modelados no openLCA 2.5 (2025).

A Figura 8 apresenta a distribuição dos impactos ambientais do sistema construtivo ICF segundo as categorias de dano do método Eco-indicator 99. Observa-se que a categoria Recursos Naturais responde por aproximadamente 58% do impacto ambiental total, evidenciando o consumo intensivo de matérias-primas e energia na fase de produção, sobretudo associado ao cimento empregado no núcleo estrutural de concreto e à energia incorporada nos processos industriais do EPS e dos insumos complementares. Esse comportamento é consistente com a literatura de ACV aplicada à construção civil, que identifica o consumo de recursos não renováveis como o principal fator de impacto em sistemas estruturais à base de concreto (GOEDKOOOP, M.; SPIRENSMA, F, 2001).

A categoria Saúde Humana contribui com cerca de 31% do impacto total, refletindo principalmente as emissões atmosféricas associadas à produção de cimento, à geração de energia elétrica e aos processos industriais envolvidos na fabricação dos componentes do sistema ICF. Por sua vez, a categoria Qualidade do Ecossistema apresenta a menor contribuição

relativa, em torno de 11%, indicando que, no escopo berço ao portão adotado, os impactos relacionados à ecotoxicidade, acidificação e uso do solo são menos expressivos quando comparados às demais categorias.

Figura 8 – Distribuição dos impactos ambientais do sistema construtivo ICF segundo o método Eco-indicator 99.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados globais apresentados nesta seção representam, portanto, o desempenho ambiental agregado da fase de produção do sistema ICF, permitindo a identificação das categorias de impacto mais relevantes e servindo como base para as análises de contribuição por material e para as análises de sensibilidade desenvolvidas nas seções subsequentes.

5.2 Inventário de materiais do sistema ICF

O inventário de materiais constitui uma das etapas fundamentais da Avaliação do Ciclo de Vida, correspondendo à fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), na qual são quantificados os fluxos de entrada e saída associados ao sistema analisado. No presente estudo, o inventário contempla os principais materiais utilizados na produção do sistema construtivo *Insulated*

Concrete Forms, considerando a unidade funcional definida e os limites de sistema estabelecidos para os módulos A1–A3.

O levantamento do inventário realizado no openLCA indica que, para cada 1 m² de parede estrutural em sistema ICF, a composição material é dominada pelo concreto estrutural, responsável por aproximadamente 360 kg/m², seguido pelo aço de reforço (cerca de 5 kg/m²) e pelo EPS (aproximadamente 3 kg/m²), totalizando cerca de 368 kg/m². Essa configuração decorre da natureza monolítica do sistema, na qual o concreto ocupa integralmente o núcleo estrutural, enquanto o EPS atua como forma permanente e camada de isolamento térmico contínuo.

Embora a massa inicial do sistema seja elevada quando comparada a sistemas construtivos leves, estudos indicam que paredes maciças associadas a isolamento térmico contínuo apresentam benefícios relevantes ao longo do ciclo de vida, especialmente em climas tropicais e subtropicais, em função da redução da demanda energética operacional e do aumento da durabilidade da edificação (EKRAMI; GARAT; FUNG, 2015; KOSNY; DESJARLAIS; CHRISTIAN, 1998).

Com o objetivo de explicitar as entradas e os fluxos considerados na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), apresenta-se, no Quadro 1, uma síntese dos principais materiais, insumos energéticos e processos de transporte incorporados ao modelo desenvolvido no software openLCA. Esse quadro tem a finalidade de reforçar a rastreabilidade entre as etapas de inventário, a avaliação de impactos ambientais e os resultados apresentados nas seções subsequentes, assegurando transparência metodológica quanto às premissas adotadas na Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF.

Quadro 1 – Síntese do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema ICF (1 m² de parede)

Categoria	Entrada / Processo	Descrição no modelo openLCA	Base de dados / Fonte
Materiais	Cimento Portland CP-III	Ligante hidráulico utilizado na produção do concreto estrutural do núcleo do sistema ICF	Ecoinvent v3.10 – processo ajustado
	Agregados naturais (areia e brita)	Materiais minerais utilizados na composição do concreto estrutural	Ecoinvent v3.10
	Poliestireno Expandido (EPS)	Formas permanentes e isolamento térmico contínuo da parede ICF	Ecoinvent v3.10
	Aço para armaduras	Aço CA utilizado como reforço estrutural do concreto	Ecoinvent v3.10
	Aditivos para concreto	Insumos auxiliares para melhoria de desempenho do concreto	Ecoinvent v3.10
	Água de processo	Água utilizada na produção do concreto estrutural	Ecoinvent v3.10
Energia	Energia elétrica	Energia consumida nos processos industriais de produção dos materiais	Ecoinvent v3.10 – matriz elétrica brasileira
	Combustíveis fósseis	Energia incorporada nos processos industriais e de transporte	Ecoinvent v3.10
Transporte	Transporte de matérias-primas	Transporte rodoviário das matérias-primas até as unidades industriais	Ecoinvent v3.10 – transporte padrão
	Transporte dos componentes	Transporte dos componentes do sistema ICF até o portão da fábrica / fornecimento	Ecoinvent v3.10
Emissões e resíduos (saídas)	Emissões atmosféricas	Emissões de CO ₂ , NO _x , SO ₂ e material particulado associadas aos processos produtivos	Calculado pelo método Eco-indicator 99
	Resíduos industriais	Resíduos gerados durante a produção dos insumos	Ecoinvent v3.10
	Consumo de recursos	Consumo de recursos minerais e energéticos não renováveis	Categoria Recursos (MJ surplus)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida no software openLCA 2.5, utilizando a base de dados Ecoinvent v3.10.

5.2.1 Entradas e fluxos considerados no modelo de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema construtivo ICF foi estruturado no software openLCA (versão 2.5, 2025) a partir da definição explícita dos fluxos de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) associados à produção de 1 m² de parede estrutural, no escopo berço ao portão. As principais entradas consideradas no modelo incluem matérias-primas, insumos energéticos e processos auxiliares, conforme descrito a seguir.

5.2.1.1 Entradas de materiais (inputs):

- Cimento Portland CP-III, utilizado na produção do concreto estrutural;
- Agregados naturais (areia e brita), provenientes de extração mineral;
- Poliestireno Expandido (EPS), empregado como forma permanente e isolamento térmico;
- Aço para armaduras, utilizado no reforço estrutural do concreto;
- Aditivos químicos para concreto, considerados como insumos auxiliares;
- Água de processo, utilizada na produção do concreto.

5.2.1.2 Entradas energéticas:

- Energia elétrica, modelada com base na matriz elétrica brasileira, ajustada na base de dados Ecoinvent v3.10;
- Combustíveis fósseis, associados às etapas de produção industrial dos insumos e aos processos de transporte.

5.2.1.3 Processos de transporte:

- Transporte das matérias-primas até as unidades de produção;

- Transporte dos componentes até o portão da fábrica ou local de fornecimento, conforme os processos padrão da base Ecoinvent.

5.2.1.4 Saídas e emissões (outputs):

- Emissões atmosféricas, incluindo CO₂, NO_x, SO₂ e material particulado;
- Resíduos industriais associados às etapas de produção dos insumos;
- Consumo de recursos minerais e energéticos, refletido na categoria Recursos Naturais (MJ surplus).

Todos os fluxos foram modelados com base em processos secundários da base de dados Ecoinvent v3.10, selecionados e ajustados para representar o contexto brasileiro, especialmente no que se refere à matriz elétrica e ao tipo de cimento empregado. A quantificação dos fluxos foi normalizada para a unidade funcional adotada, garantindo a consistência dos resultados apresentados nas seções subsequentes.

5.3 Avaliação dos impactos ambientais por categorias de dano

A interpretação dos resultados da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida foi realizada com base no método Eco-indicator 99, implementado no software openLCA. Nesse método, os impactos ambientais são estruturados em três níveis hierárquicos: (i) Inventário do Ciclo de Vida (ICV), no qual são quantificados os fluxos de matérias-primas, energia, emissões e resíduos associados à unidade funcional; (ii) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), que converte os fluxos do inventário em categorias de dano do tipo *endpoint* — Saúde Humana (DALY), Qualidade do Ecossistema (species·yr) e Recursos Naturais (MJ surplus); e (iii) agregação final (*single score*), na qual os resultados são normalizados e ponderados, sendo expressos em uma unidade comum denominada pontos (Pt).

A Avaliação do Ciclo de Vida desenvolvida nesta pesquisa foi estruturada desde sua concepção metodológica com o objetivo de subsidiar a elaboração de uma Declaração Ambiental do Produto (DAP), em conformidade com os princípios da norma ISO 14025. Nesse contexto, a modelagem buscou garantir rastreabilidade, transparência e coerência entre inventário, avaliação de impactos e comunicação dos resultados ambientais, requisitos fundamentais para a estruturação de uma DAP do tipo III.

A definição da unidade funcional, a delimitação do escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*) e a estruturação do inventário foram realizadas de forma alinhada à lógica de comunicação ambiental de produtos da construção civil. Observa-se no Quadro 2 que o escopo definido corresponde integralmente aos módulos A1–A3 estabelecidos pela norma EN 15804, que estrutura as DAPs para produtos da construção civil. O módulo A1 contempla a extração e o processamento das matérias-primas; o módulo A2 abrange o transporte interno até as unidades industriais; e o módulo A3 compreende os processos industriais de fabricação. Essa correspondência assegura que o inventário modelado na ACV esteja estruturado de forma compatível com os requisitos técnicos para elaboração de uma DAP.

Quadro 2 – Correspondência entre módulos A1–A3 e o inventário do sistema ICF

Módulo (EN 15804)	Descrição do Módulo	Aplicação no Estudo	Principais Recursos / Processos Considerados	Indicadores Impactados
A1	Extração e processamento de matérias-primas	Produção de matérias-primas utilizadas no EPS, cimento e agregados	Petróleo (estireno), calcário, argila, areia, brita, água	GWP, consumo de energia primária, uso de recursos minerais
A2	Transporte interno até a fábrica	Transporte de matérias-primas até unidades industriais	Transporte rodoviário de insumos	GWP (combustível fóssil), consumo energético
A3	Processos industriais de fabricação	Produção do EPS, produção do cimento, fabricação do concreto e moldagem dos blocos ICF	Expansão do poliestireno, clínquerização, moagem, mistura e moldagem	GWP, consumo de energia elétrica e térmica, geração de resíduos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base na norma EN 15804 (2012) e na modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida realizada nesta pesquisa.

A análise de contribuição dos processos e materiais, realizada no ambiente do software openLCA, foi empregada como instrumento para identificar os principais recursos responsáveis

pelos impactos ambientais do sistema ICF, permitindo que os resultados da ACV fossem diretamente transpostos para os indicadores ambientais apresentados na DAP.

A partir dos dados de inventário apresentados na seção anterior, aplicou-se o método Eco-indicator 99 para quantificar os impactos ambientais nas três categorias de dano consideradas: Recursos Naturais, Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema. Os resultados apresentados na Tabela 3 fornecem uma visão agregada do desempenho ambiental do sistema construtivo ICF e permitem identificar a contribuição relativa dos principais materiais e processos para cada categoria de impacto.

Tabela 3 – Contribuição dos materiais por categoria (cenário base)

Material	Saúde humana (DALY)	Qualidade do ecossistema (species·yr)	Recursos (MJ surplus)	Impacto total (Pt)
Concreto	1,17E-06	1,10E-04	180	520
EPS	1,50E-07	2,00E-05	30	90
Aço	1,00E-07	1,50E-05	20	65
Outros insumos (água, aditivos etc.)	8,00E-08	1,00E-05	0	55
Total	1,50E-06	1,60E-04	230	730

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em dados modelados no openLCA 2.5 (2025).

Os valores apresentados correspondem aos resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida obtidos a partir do processamento dos fluxos do inventário no software openLCA, segundo os fatores de caracterização, normalização e ponderação do método Eco-indicator 99. Essa análise permite avaliar a participação relativa dos principais componentes do sistema — concreto, EPS, aço e demais insumos — em cada categoria de dano e no impacto ambiental total.

5.3.1 Saúde Humana

Os impactos associados à categoria Saúde Humana, expressos em DALY (*Disability-Adjusted Life Years*), estão majoritariamente relacionados às emissões atmosféricas decorrentes da produção do cimento e do consumo de energia elétrica ao longo da cadeia produtiva.

A predominância do concreto como principal contribuinte para a categoria Saúde Humana está alinhada com a literatura, que identifica a produção de cimento, especialmente a etapa de clínquerização, como uma das mais críticas em termos de emissões de CO₂, NO_x e material particulado (CABEZA et al., 2014; LU; MEMARI, 2013). O EPS, embora derivado de fonte fóssil, apresenta contribuição proporcionalmente reduzida, em função de sua baixa massa por unidade funcional.

5.3.2 Qualidade do Ecossistema

Na categoria Qualidade do Ecossistema, medida em species·yr, o impacto estimado para o sistema ICF indica um efeito relativamente baixo sobre a biodiversidade quando comparado às demais categorias de impacto. Esse resultado reflete principalmente os efeitos associados à extração de agregados minerais, à ocupação do solo e a processos industriais relacionados à produção de insumos.

Resultados semelhantes são reportados na literatura, que apontam a cadeia produtiva do cimento como fator dominante nessa categoria em sistemas construtivos convencionais e industrializados, mesmo quando consideradas soluções construtivas inovadoras (ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011; LU; MEMARI, 2013).

5.4 Consumo de energia primária não renovável (PENRT) no módulo A1–A3

O consumo de energia primária não renovável (PENRT – *Primary Energy Non-Renewable Total*) representa a quantidade total de energia proveniente de recursos fósseis ou não renováveis utilizada ao longo das etapas iniciais do ciclo de vida do produto. No contexto da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), esse indicador é amplamente utilizado para avaliar a

intensidade energética associada à extração de matérias-primas, processamento e fabricação de materiais.

No presente estudo, o indicador PENRT foi calculado para o módulo A1–A3 (berço ao portão), abrangendo as etapas de extração de matérias-primas, transporte interno e processos industriais de fabricação dos componentes do sistema construtivo ICF. A unidade funcional adotada foi 1 m² de parede estrutural em sistema ICF.

Os resultados obtidos indicam um consumo total de 208,7 MJ de energia primária não renovável por m² de parede, valor que reflete principalmente a contribuição energética associada à produção dos materiais constituintes do sistema, especialmente o concreto e o poliestireno expandido (EPS).

Com o objetivo de contextualizar os resultados obtidos, foi realizada uma comparação com valores reportados na literatura internacional para sistemas construtivos em concreto e tecnologia ICF.

A comparação apresentada na Tabela 4 indica que o valor de 208,7 MJ de energia primária não renovável por m² de parede ICF, obtido neste estudo para o escopo A1–A3 (berço ao portão), encontra-se dentro da faixa reportada na literatura internacional para sistemas construtivos baseados em concreto e tecnologias ICF.

Os intervalos reportados em estudos conduzidos pelo MIT *Concrete Sustainability Hub*, pela *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA) e por pesquisas comparativas realizadas nos Estados Unidos e no Canadá indicam valores típicos entre 150 e 350 MJ/m² para paredes estruturais de concreto ou sistemas equivalentes. Dessa forma, o resultado obtido nesta pesquisa demonstra coerência metodológica e consistência com dados internacionais, considerando diferenças de composição dos sistemas construtivos, fronteiras do sistema e bases de dados utilizadas nos inventários de ciclo de vida.

Esse enquadramento reforça a confiabilidade do modelo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desenvolvido no openLCA, bem como a adequação dos parâmetros adotados para representar o sistema construtivo ICF analisado.

Tabela 4 – Comparação entre resultados de energia incorporada para sistemas construtivos com ICF

Estudo	Unidade funcional	Escopo da ACV	Indicador	Resultado
Este estudo	1 m ² de parede ICF	A1–A3	Energia primária não renovável (PENRT)	208,7 MJ
MIT Concrete Sustainability Hub	Parede de concreto	Cradle-to-gate	Energia incorporada	150–350 MJ/m ²
National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)	Sistemas de parede de concreto	Cradle-to-gate	Energia incorporada	200–320 MJ/m ²
Estudos comparativos de sistemas ICF (EUA/Canadá)	Parede residencial	Cradle-to-gate	Energia incorporada	180–300 MJ/m ²

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Massachusetts Institute of Technology – Concrete Sustainability Hub (2011), National Ready Mixed Concrete Association (2018), Kosny et al. (1998) e Insulating Concrete Forms Association (2016).

Essa consistência sugere que os resultados obtidos na modelagem realizada no openLCA apresentam coerência com dados reportados em estudos internacionais de Avaliação do Ciclo de Vida.

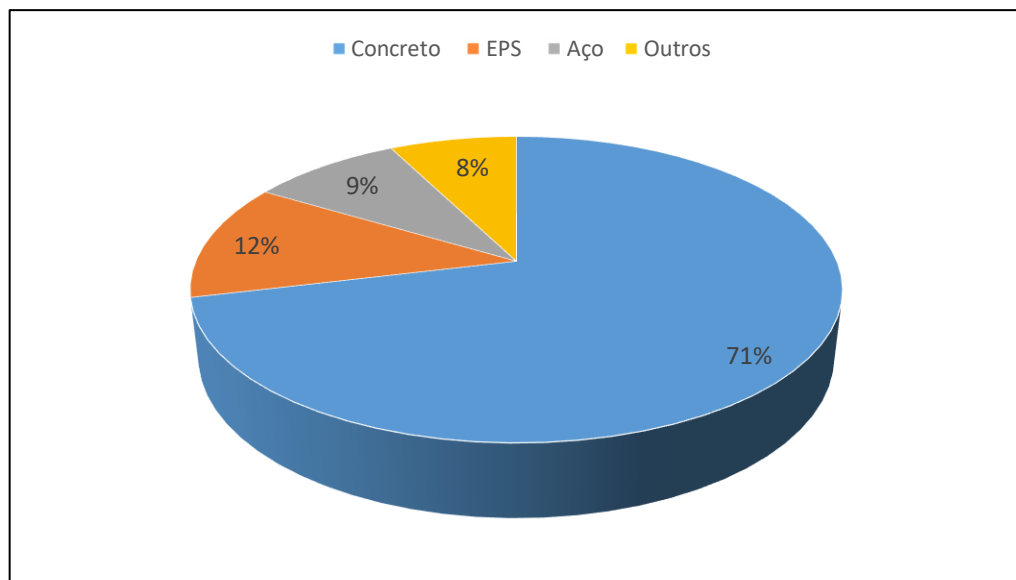
5.5 Impacto ambiental total e interpretação integrada

Esta subseção corresponde à etapa de agregação e interpretação dos resultados, conforme descrito na Seção 4.5 da Metodologia, na qual as categorias de dano são normalizadas, ponderadas e somadas, resultando no indicador de impacto ambiental total (Pt).

A Figura 9 sintetiza a contribuição dos principais materiais para os impactos absolutos do sistema ICF, de acordo com a Tabela 2. O concreto, com aproximadamente 360 kg/m², responde por cerca de 1,0E-06 DALY em Saúde humana, 1,1E-04 species·yr em Qualidade do ecossistema, 180 MJ surplus em Recursos e 520 Pt, ou seja, em torno de 70–75% do impacto total. O EPS contribui com 1,5E-07 DALY, 2,0E-05 species·yr, 30 MJ surplus e 90 Pt, enquanto o aço e outros insumos somam 1,3E-07 DALY, 2,5E-05 species·yr, 20 MJ surplus e cerca de 120 Pt, confirmando que, embora em menor massa, esses materiais têm participação relevante, especialmente em Recursos.nrmca+, que corresponde ao indicador Recursos Naturais (MJ surplus) do método Eco-indicator 99.

A categoria “Outros insumos” agrega materiais e fluxos auxiliares do sistema ICF que apresentam baixa participação individual em massa, mas que, quando considerados em conjunto, contribuem de forma não desprezível para o impacto total. Nessa categoria estão incluídos, principalmente, a água de processo, os aditivos químicos utilizados na produção do concreto, o consumo de energia elétrica auxiliar e etapas secundárias de transporte e operação. Ressalta-se que os principais materiais estruturais — concreto, EPS e aço — foram avaliados de forma individualizada, de modo que a categoria “Outros” não inclui esses componentes, nem sistemas de acabamento fora do escopo da análise.

Figura 9 – Contribuição dos materiais do sistema ICF (concreto, EPS, aço e outros insumos) para as categorias de dano do Eco-indicator 99, por 1 m² de parede (cenário base).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A agregação dos resultados por meio do método Eco-indicator 99 resultou em um impacto ambiental total de 730 pontos (Pt) para a unidade funcional analisada. Esse valor corresponde ao indicador agregado (*single score*), obtido a partir da normalização e ponderação das categorias de dano saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais. No contexto do método, 1000 Pt representam aproximadamente o impacto ambiental médio anual de um cidadão europeu, sendo o valor obtido utilizado principalmente para fins comparativos entre sistemas ou cenários avaliados. A categoria Recursos Naturais responsável pela maior parcela do impacto, seguida por Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema. Essa distribuição confirma que, no escopo berço ao portão, os impactos ambientais do sistema ICF estão fortemente associados à fase de produção dos materiais constituintes, especialmente o concreto

estrutural. Tal comportamento é consistente com estudos de ACV aplicados à construção civil, que apontam a fase de produto como predominante nos impactos ambientais globais de sistemas estruturais à base de concreto.

A interpretação integrada dos resultados permite identificar os principais pontos críticos ambientais do sistema ICF na fase de produção, evidenciando a contribuição relativa dos materiais constituintes e dos processos industriais associados. Esses resultados fornecem subsídios técnicos para a avaliação comparativa futura entre sistemas construtivos, embora tal comparação não faça parte do escopo quantitativo desta dissertação.

5.6 Discussão integrada dos resultados da ACV e implicações ambientais.

Os resultados quantitativos obtidos a partir da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), modelada no software openLCA no escopo berço ao portão, mostram-se coerentes com estudos internacionais que analisam sistemas construtivos industrializados sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida. Sistemas com elevado grau de industrialização e potencial de desempenho térmico aprimorado tendem a apresentar melhor desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida, especialmente quando associados a matrizes energéticas menos intensivas em carbono (LU; MEMARI, 2013; ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011; CABEZA et al., 2014).

O cenário com maior participação de fontes renováveis considera uma matriz elétrica composta por aproximadamente 85–90% de fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar e biomassa) e 10–15% de fontes fósseis. Por outro lado, o cenário com maior participação de fontes fósseis assume uma matriz com cerca de 40–50% de fontes renováveis e 50–60% de geração termelétrica, representando sistemas elétricos com maior intensidade de carbono. Os valores apresentados na Tabela 5 indicam que a adoção de uma matriz elétrica com maior participação de fontes renováveis reduz o impacto ambiental total em aproximadamente 10% (730 → 660 Pt), enquanto um cenário com maior participação de fontes fósseis resulta em um aumento da ordem de 12% (730 → 820 Pt). Essas variações são compatíveis com intervalos reportados na literatura para Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas construtivos, evidenciando a sensibilidade dos resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida à

intensidade de carbono da eletricidade utilizada nos processos produtivos (CABEZA et al., 2014; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

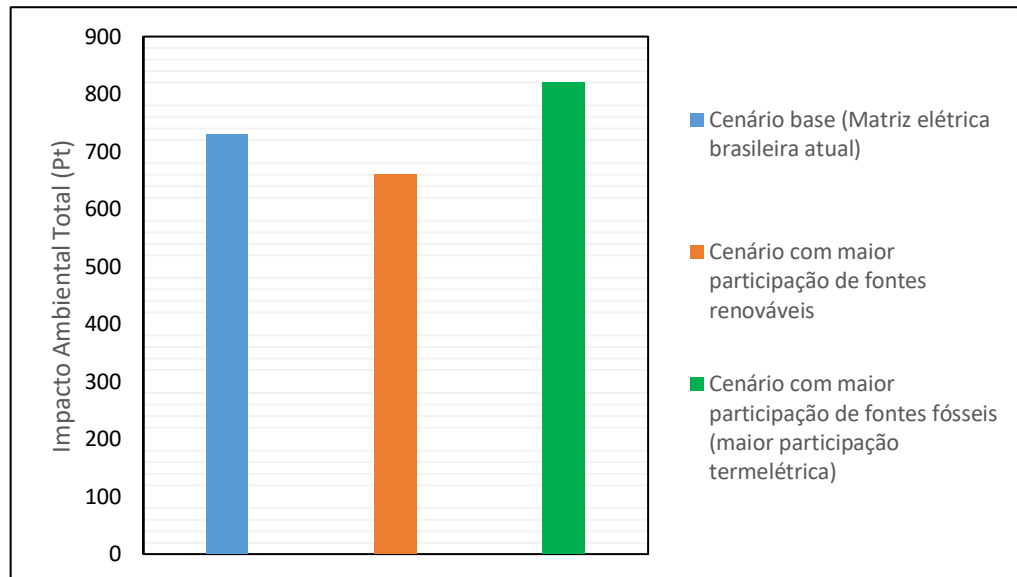
Tabela 5 – Cenários de matriz elétrica

Cenário de matriz elétrica	Descrição	Saúde humana (DALY)	Ecossistemas (species·yr)	Recursos (MJ surplus)	Pt total
Cenário base	Matriz elétrica brasileira atual	1,5E-06	1,6E-04	230	730
Matriz com maior participação de fontes renováveis	Redução relativa do uso de fontes fósseis	1,3E-06	1,4E-04	210	660
Matriz com maior participação de fontes fósseis	Aumento da participação termelétrica	1,8E-06	1,9E-04	260	820

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em dados modelados no openLCA 2.5 (2025).

A Figura 10 ilustra o impacto ambiental total do sistema ICF em três cenários de matriz elétrica — cenário base, cenário com maior participação de fontes renováveis e cenário com maior participação de fontes fósseis — reforçando a influência significativa do mix energético sobre os resultados da AICV. A literatura de Avaliação do Ciclo de Vida aponta que variações no perfil energético do contexto de estudo, particularmente na proporção entre fontes renováveis e fósseis, alteram de forma relevante os impactos ambientais agregados de sistemas construtivos (CABEZA et al., 2014; ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011; LU; MEMARI, 2013). Observa-se, assim, que políticas energéticas voltadas à ampliação da participação de fontes renováveis têm potencial para reduzir de forma expressiva os impactos ambientais associados à cadeia produtiva do sistema ICF, potencializando os benefícios ambientais de sistemas construtivos industrializados.

Figura 10 – Impacto ambiental total (Pt) do sistema construtivo ICF por 1 m² de parede em diferentes cenários de matriz elétrica (cenário base, cenário com maior participação de fontes renováveis e cenário com maior participação de fontes fósseis), calculado pelo método Eco-indicator 99.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No que se refere à análise de sensibilidade relacionada ao tipo de ligante, os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram que a substituição de um cimento com maior teor de clínquer por um cimento com maior adição mineral, como o CP III, proporciona uma redução de aproximadamente 8% na categoria Recursos (250 → 230 MJ surplus) e de cerca de 6% no impacto ambiental total (780 → 730 Pt). Esses valores são consistentes com resultados reportados em estudos *cradle-to-gate* de concretos ecoeficientes, que apontam reduções significativas nos impactos ambientais associadas à diminuição do teor de clínquer (ZABALZA BRIBIÁN; VALERO CAPILLA; ARANDA USÓN, 2011; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009; PASSUELLO et al., 2019; COSTA et al., 2022). Tais resultados confirmam o papel do cimento como um dos principais *hotspots* ambientais do sistema construtivo ICF, conforme amplamente discutido na literatura de Avaliação do Ciclo de Vida aplicada à construção civil (CABEZA et al., 2014; FARIAS et al., 2022).

Tabela 6 – Cenários de cimento

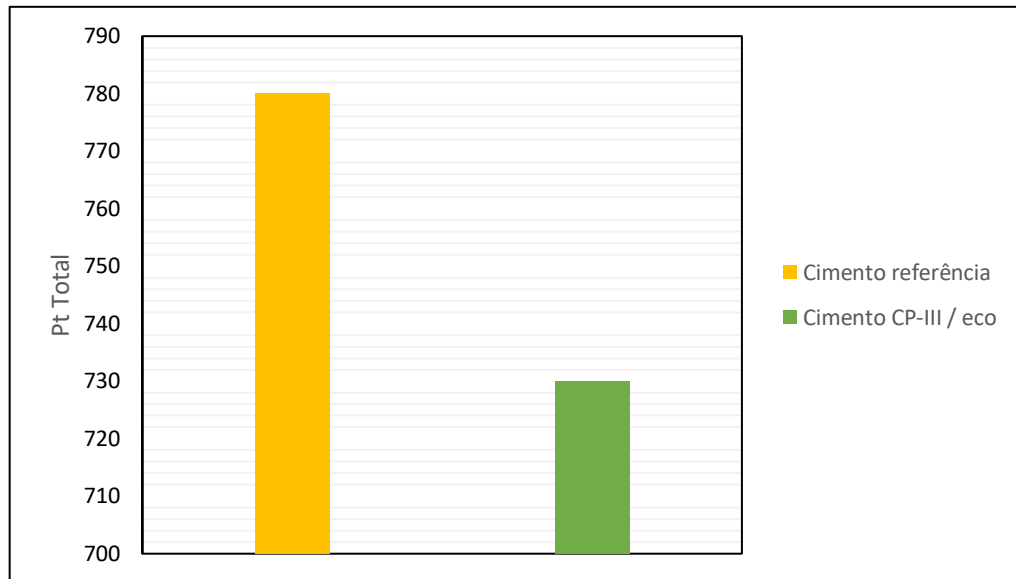
Cenário de cimento	Descrição	Recursos (MJ surplus)	Pt total
Cimento referência	Maior teor de clínquer	250	780
Cimento CP-III / eco	Maior adição mineral (cenário base)	230	730

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em dados modelados no openLCA 2.5 (2025).

A Figura 11 evidencia que a adoção de cimentos com menor intensidade ambiental constitui uma estratégia efetiva de mitigação de impactos, ao reduzir significativamente tanto o consumo de recursos naturais quanto o impacto ambiental total do sistema. Nesse contexto, a priorização de ligantes com maior teor de adições minerais apresenta-se como uma diretriz técnica relevante para projetos que adotem o sistema ICF, especialmente quando considerados critérios de sustentabilidade ambiental.

Para a análise de sensibilidade associada ao tipo de ligante, adotou-se como cenário de referência um cimento Portland convencional, caracterizado por elevado teor de clínquer e menor proporção de adições minerais, representativo da prática corrente da indústria da construção civil. Como cenário alternativo, foi considerado o uso de cimento CP III, com maior teor de adições minerais, em especial escória de alto-forno, reconhecido por apresentar menor intensidade energética e menores impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Figura 11 – Impacto total (Pt) do sistema ICF por 1 m² de parede para dois cenários de ligante: cimento de referência com maior teor de clínquer e cimento CP-III/eco com maior adição mineral.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

À luz dos objetivos desta dissertação e da abordagem metodológica baseada na Avaliação do Ciclo de Vida, os resultados da AICV assumem papel central no processo de avaliação e aprimoramento do sistema construtivo ICF. A identificação dos principais *hotspots* ambientais — em especial o consumo de cimento e de energia elétrica — fornece subsídios técnicos para decisões relacionadas à especificação de materiais, à seleção de insumos e à proposição de estratégias de mitigação ambiental.

A análise integrada dos resultados evidencia que o desempenho ambiental do sistema ICF não depende exclusivamente de sua configuração física, mas também de fatores sistêmicos associados à cadeia produtiva, à matriz energética e às estratégias de gestão de resíduos. Dessa forma, a Avaliação do Ciclo de Vida conduzida no openLCA, com aplicação do método Eco-indicator 99, constitui uma ferramenta robusta para a comparação de cenários e para a identificação de oportunidades de melhoria ambiental, em consonância com os princípios da sustentabilidade.

Os resultados quantitativos da Avaliação do Ciclo de Vida apresentados neste capítulo subsidiaram a estruturação de uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) para o sistema construtivo ICF, elaborada conforme os princípios da norma ISO 14025. Essa DAP foi desenvolvida exclusivamente com base nos resultados modelados no escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*), não possuindo verificação por terceira parte independente nem finalidade

comercial. A versão completa da DAP encontra-se apresentada no Apêndice A desta dissertação.

A discussão integrada apresentada nesta seção consolida, portanto, os principais resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF, permitindo uma compreensão sistêmica dos impactos ambientais associados à fase produtiva e reforçando a importância de estratégias de otimização de materiais e processos industriais como meio de redução dos impactos ambientais identificados.

5.7 Análise dos resultados da ACV sob a ótica da Declaração Ambiental do Produto

A avaliação de impactos ambientais foi realizada utilizando indicadores de nível midpoint e endpoint. Os indicadores midpoint definidos pela EN 15804+A2 foram utilizados para a quantificação detalhada dos impactos ambientais associados aos módulos do ciclo de vida considerados no estudo. Esses indicadores permitem identificar categorias específicas de impacto, como mudanças climáticas, acidificação e uso de recursos.

Adicionalmente, indicadores de nível endpoint foram utilizados para apoiar a interpretação integrada dos resultados, permitindo a agregação dos impactos ambientais em categorias de dano relacionadas à saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos. Para essa finalidade, foi empregado o método Eco-indicator 99, amplamente utilizado em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida para comunicação sintética do desempenho ambiental.

A combinação de indicadores midpoint e endpoint permite uma análise mais abrangente dos resultados, na qual os indicadores midpoint fornecem maior detalhamento das categorias de impacto ambiental, enquanto os indicadores endpoint facilitam a interpretação integrada e a comunicação dos danos ambientais potenciais associados ao sistema analisado.

Os valores consolidados apresentados nesta seção correspondem aos resultados numéricos obtidos nos itens 5.1 a 5.6, todos referentes exclusivamente ao módulo A1–A3 (berço ao portão). O Potencial de Aquecimento Global (GWP), bem como os indicadores de Recursos Naturais, Saúde Humana e Qualidade do Ecossistema, foram detalhados nos itens 5.1 a 5.4. O item 5.5 apresentou a normalização e ponderação dos impactos segundo o método Eco-

indicador 99, permitindo a leitura integrada do desempenho ambiental do sistema ICF. A presente seção consolida esses resultados sob a ótica da estrutura de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP), mantendo coerência metodológica com o inventário modelado no software openLCA.

Dessa forma, a partir do mesmo inventário modelado no software openLCA, foram extraídos indicadores adicionais, incluindo:

- Potencial de Aquecimento Global (GWP – kg CO₂ eq);
- Consumo de Energia Primária (MJ);
- Uso de Recursos Fósseis (MJ);
- Uso de Recursos Minerais (kg extraídos).

Esses indicadores não substituem os resultados agregados apresentados anteriormente, mas os complementam, permitindo a organização dos dados em formato compatível com DAP no escopo berço ao portão (A1–A3).

5.7.1 Contribuição dos Recursos para o Potencial de Aquecimento Global (GWP)

O valor total obtido para o módulo A1–A3 foi de 159,76 kg CO₂ eq por m². A análise de contribuição indica:

- Concreto (cimento + agregados): 127,17 kg CO₂ eq (79,6%);
- EPS: 30,04 kg CO₂ eq (18,8%);
- Demais insumos: 2,55 kg CO₂ eq (1,6%).

Os resultados evidenciam que o concreto é o principal responsável pelo impacto climático do sistema, sendo o clínquer o elemento determinante desse desempenho. O processo de calcinação do calcário e o consumo de combustíveis térmicos na produção do cimento explicam essa predominância.

Sob a ótica da DAP, esse resultado indica que eventuais estratégias de melhoria ambiental devem priorizar:

- Redução do fator clínquer;

- Uso de adições minerais;
- Otimização do traço do concreto.

5.7.2 Contribuição para o Consumo de Energia Primária e Recursos Naturais

O consumo total de energia primária foi de 1.458,92 MJ por m², distribuído da seguinte maneira:

- EPS: 742,15 MJ (50,9%);
- Concreto: 671,32 MJ (46,0%);
- Demais insumos: 45,45 MJ (3,1%).

Diferentemente do GWP, o EPS é o principal responsável pelo consumo energético acumulado, devido à energia incorporada do polímero e ao processo de expansão térmica.

No indicador de uso de recursos fósseis (1.102,64 MJ), o EPS responde por 73,4%, evidenciando a dependência petroquímica do sistema nessa categoria. Já no uso de recursos minerais (1.864,52 kg extraídos), o concreto representa 91,2%, confirmando a intensidade mineral característica de sistemas estruturais à base de cimento.

Sob a perspectiva da DAP, observa-se a existência de dois vetores críticos distintos:

- Concreto → dominante em GWP e recursos minerais;
- EPS → dominante em energia primária e recursos fósseis.

5.7.3 Contribuição para a Categoria Saúde Humana

Na categoria Saúde Humana, expressa em DALY pelo método Eco-indicator 99, os impactos estão majoritariamente associados às emissões atmosféricas da cadeia produtiva do cimento, especialmente:

- Óxidos de nitrogênio (NO_x);

- Dióxido de enxofre (SO₂);
- Material particulado.

A contribuição do EPS mostrou-se menos significativa nessa categoria, indicando que o desempenho do sistema ICF sob a ótica da saúde humana é condicionado principalmente pela produção do clínquer.

5.7.4 Contribuição para a Categoria Qualidade do Ecossistema

A categoria Qualidade do Ecossistema, expressa em species·year, apresentou menor contribuição relativa no impacto global. Os impactos identificados decorrem principalmente de:

- Extração de matérias-primas minerais;
- Ocupação de solo associada à cadeia do cimento

O EPS, enquanto fôrma permanente, não apresentou contribuição expressiva nessa categoria quando comparado à intensidade mineral do concreto.

Esse resultado sugere que, na fase de produção, o sistema ICF não apresenta pressão ecossistêmica elevada quando comparado a sistemas que demandam maior volume de materiais cerâmicos e processos de queima.

5.7.5 Síntese Integrada para Consolidação em DAP

A leitura integrada dos resultados demonstra que os impactos ambientais do sistema ICF concentram-se em poucos recursos-chave, especialmente:

- Cimento Portland;
- Energia elétrica utilizada na produção do EPS.

A análise quantitativa evidencia que:

- 79,6% do GWP está associado ao concreto;
- 50,9% da energia primária está associada ao EPS;
- 73,4% dos recursos fósseis estão vinculados ao EPS;
- 91,2% dos recursos minerais estão vinculados ao concreto.

Essa concentração de impactos reforça o papel da DAP como instrumento de transparência ambiental e suporte à tomada de decisão técnica, permitindo identificar com clareza onde se encontram os principais pontos de melhoria do produto avaliado.

5.8 Declaração Ambiental do Produto (DAP) do Sistema Construtivo ICF

Como produto técnico desta pesquisa, foi elaborada uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) para o sistema construtivo ICF, estruturada a partir dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresentados neste estudo.

A DAP foi desenvolvida com base nos princípios das normas ISO 14025, ISO 14040 e ISO 14044, considerando o escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*) e a unidade funcional de 1 m² de parede estrutural em sistema ICF. O documento sintetiza as principais informações sobre o produto, as fronteiras do sistema, os dados do inventário e os indicadores ambientais obtidos na avaliação de impactos do ciclo de vida.

Em razão de seu caráter técnico e documental, a versão completa da Declaração Ambiental do Produto (DAP) do sistema construtivo ICF é apresentada no APÊNDICE A desta dissertação.

5.9 Conexão com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os resultados obtidos a partir da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) do sistema construtivo ICF permitem estabelecer uma conexão direta entre o desempenho ambiental analisado e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela

Organização das Nações Unidas no âmbito da Agenda 2030. Considerando o escopo berço ao portão adotado neste estudo, a análise evidencia contribuições relevantes do sistema ICF para os ODS relacionados à eficiência energética, inovação tecnológica, sustentabilidade urbana, consumo responsável e mitigação das mudanças climáticas.

No que se refere ao ODS 7 – Energia Acessível e Limpa, embora a ACV tenha sido limitada à fase de produção, os resultados indicam que o sistema ICF apresenta potencial de contribuição indireta para a redução do consumo energético ao longo do ciclo de vida da edificação. A presença contínua do EPS como isolamento térmico integrado à parede estrutural favorece o desempenho térmico do edifício, reduzindo a demanda por sistemas de climatização artificial durante a fase de uso, aspecto amplamente reconhecido na literatura técnica. Assim, mesmo não quantificado nesta ACV, o desempenho térmico do sistema reforça sua aderência aos princípios de eficiência energética associados ao ODS 7.

Em relação ao ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, o sistema ICF caracteriza-se como uma solução construtiva inovadora, baseada em processos industrializados e na integração de funções estruturais e de isolamento em um único elemento construtivo. A aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta de suporte à análise ambiental reforça o papel da inovação tecnológica orientada à sustentabilidade, contribuindo para a qualificação da infraestrutura construída e para a disseminação de práticas produtivas mais eficientes.

A conexão com o ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis manifesta-se na medida em que o sistema ICF apresenta potencial para edificações mais duráveis, eficientes e com melhor desempenho ambiental global. A racionalização construtiva, a redução de resíduos em obra e o desempenho térmico associado ao sistema contribuem para a melhoria da qualidade do ambiente construído, favorecendo a sustentabilidade urbana e a resiliência das edificações ao longo de sua vida útil.

O ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis é diretamente contemplado pelos resultados desta pesquisa, uma vez que a ACV permite identificar e quantificar os principais impactos ambientais associados à produção do sistema ICF. A análise evidencia a concentração dos impactos na categoria de consumo de recursos naturais, sobretudo relacionada ao uso de cimento e energia, fornecendo subsídios técnicos para a otimização de processos produtivos, a seleção de materiais alternativos e a melhoria da eficiência dos sistemas construtivos. A proposição de uma Declaração Ambiental do Produto (DAP) reforça esse alinhamento, ao promover transparência e padronização na comunicação de impactos ambientais.

Por fim, a relação com o ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima decorre principalmente da identificação das emissões associadas aos processos industriais que compõem o sistema ICF, especialmente aquelas relacionadas à produção de cimento e ao consumo energético. Embora o escopo berço ao portão não contemple a fase de uso, os resultados indicam que estratégias de otimização dos materiais e da matriz energética podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, o potencial de eficiência energética do sistema ao longo da vida útil da edificação reforça sua contribuição indireta para a mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma, a análise da conexão entre os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema ICF e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável evidencia que os impactos ambientais identificados, bem como os potenciais de melhoria associados ao sistema, não se restringem a uma avaliação técnica isolada, mas se inserem em um contexto mais amplo de sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e responsabilidade produtiva. Essa articulação entre resultados quantitativos de ACV e diretrizes globais da Agenda 2030 estabelece a base conceitual para as considerações finais desta dissertação, permitindo que a conclusão consolide, de forma integrada, os achados técnicos, as limitações do escopo adotado e as contribuições do sistema ICF para a construção civil sustentável no contexto brasileiro.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na presente dissertação permitiram quantificar os impactos associados à fase produtiva do sistema ICF, evidenciando a contribuição diferenciada de seus principais componentes — especialmente concreto, EPS e aço — nas categorias de impacto analisadas. A análise demonstrou que os maiores impactos concentram-se nos materiais de maior intensidade energética e emissões associadas ao processo produtivo, confirmando tendências observadas na literatura internacional para sistemas construtivos que utilizam cimento Portland e derivados petroquímicos.

O estudo também possibilitou identificar os materiais com maior contribuição relativa em cada categoria de impacto, atendendo ao objetivo específico de mapear os pontos críticos do sistema sob a ótica ambiental. Essa identificação constitui ferramenta estratégica para futuras iniciativas de melhoria de desempenho, seja por meio da substituição de insumos, otimização de processos ou incorporação de materiais de menor pegada ambiental.

No que se refere à articulação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) demonstraram aderência direta a metas relacionadas à produção e consumo responsáveis, ação climática e inovação na indústria da construção, conforme agenda estabelecida pela Organização das Nações Unidas. Tal conexão amplia a relevância do estudo ao posicionar a avaliação ambiental não apenas como instrumento técnico, mas também como ferramenta de alinhamento estratégico com políticas globais de sustentabilidade.

Importa destacar que os resultados devem ser interpretados dentro das limitações metodológicas estabelecidas, especialmente quanto à delimitação do escopo à etapa produtiva (berço ao portão), à utilização predominante de dados secundários e à ausência de análise de sensibilidade aprofundada. Assim, as conclusões refletem o desempenho ambiental do sistema exclusivamente na fase de produção, não contemplando potenciais benefícios associados ao uso e à eficiência operacional ao longo da vida útil da edificação.

De forma geral, a pesquisa alcançou plenamente os objetivos propostos, demonstrando a aplicabilidade da ACV como instrumento robusto para avaliação ambiental de sistemas construtivos inovadores no contexto brasileiro. Além disso, contribui para o avanço da discussão sobre sustentabilidade na construção civil, oferecendo base técnica consistente para

futuras comparações com sistemas convencionais, desenvolvimento de Declarações Ambientais de Produto (DAP) e ampliação do escopo para análises de ciclo de vida completas.

REFERÊNCIAS

AL-HOMOUD, M. S. **Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials**. Building and Environment, v. 40, n. 3, p. 353–366, 2005.

ALVES, J.; BORGES, I. B.; NADAE, J. de. **Sustainability in complex projects of civil construction: bibliometric and bibliographic review**. Gestão & Produção, v. 28, n. 4, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C578: Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ARRAIZ, Camilla Gomes et al. **Estudo comparativo entre o sistema construtivo de contêiner marítimo e sistema de concreto-PVC em São Luís - MA**. Enciclopédia Biosfera, [S. l.], v. 17, n. 33, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-3: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas**. Rio de

Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-6: Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.** Rio de Janeiro, 2013.

BAPTISTA JÚNIOR, J. C.; VIEIRA, G. L.; ROMANEL, C. **Reciclagem de resíduos de alvenaria e argamassa para uso em blocos prensados.** Revista Matéria, v. 18, n. 3, p. 213–227, 2013.

BAPTISTA JUNIOR, J.; VIEIRA, R.; ROMANEL, C. **Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras.** Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 5, n. 2, p. 27-37, 2013.

BARBOSA JÚNIOR, I. de O.; MARTINS, V. W. B.; NEVES, R. M. das; MACÊDO, A. N. **Sustainable practices in the construction sector: an overview of companies operating in Brazil and their contributions to achieving the UN SDGs sector.** Ambiente Construído, v. 24, 2024.

BARBOSA, Fabricio Lima; NASCIMENTO, Diogo Wagnacker; LIMA, Lucas Barbosa. **Estudo sobre os efeitos da adição do resíduo de vidro laminado (RVL) em concretos.** Revista Mosaicum, [S. l.], n. 35, 2022.

BARCELLOS, Geórgia Schiller; SCHWADE, Paula Vieira; SILVA, Schana Andréia da. **Tinta à base de poliestireno expandido.** Revista Liberato, Novo Hamburgo: Fundação Liberato, v. 14, n. 22, p. 75–82, 2013.

BATAGLIN, Fernanda Saidelles; DIETZ VIANA, Daniela; FORMOSO, Carlos Torres. **Design Principles and Prescriptions for Planning and Controlling Engineer-to-Order Industrialized Building Systems.** Sustainability, v. 14, n. 24, p. 16822-16822, 2022.

BEGUM, S. M.; ROSSI, S. **Delivering Sustainable Housing through Material Choice.** Sustainability, v. 15, n. 4, p. 3331, 2023.

BISSOLI-DALVI, M.; MARCON, L. M.; ALVAREZ, C. E. de; FUICA, G. E. S. A

sustainability tool to assess buildings from the environmental, social, and economic perspective. Ambiente Construído, v. 20, n. 2, p. 99-113, 2020.

BRASIL. **Agenda 2030 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Brasília: Ipea, 2020.

BRASIL. **Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM BR.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 abr. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 abr. 2021.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes para o gerenciamento de resíduos da construção civil.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 out. 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 431, de 24 de maio de 2011. Altera a Resolução nº 307/2002.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 maio 2011.

BROUN, Reza; BABAIZADEH, Hamed; ZAKERSALEHI, Abolfazl; MENZIES, Gillian. **Integrated Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Analysis of Exterior Wall Systems for Residential Buildings.** Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 12, p. 8592-8603, nov. 2014.

BRUM, E.; MADEIRA, A.; PANDOLFO, R.; BERTICELLI, K.; RITIELLI, P.; KALIL, R. M. L.; PASQUALI, P. B. **Economic, social and environmental aspects of the sustainability of**

a construction waste recycling plant. *Gestão & Produção*, v. 28, n. 3, 2021.

BUENO, C.; ROSSIGNOLO, J. A. **Avaliação do ciclo de vida aplicada à construção civil no Brasil: panorama e desafios.** *Ambiente Construído*, 2020.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. **Life cycle assessment in the construction sector: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 379–388, 2013.

CABEZA, L. F. et al. **Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 394–416, 2014.

CEN. EN 15804:2012. **Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products.** Brussels, 2012.

CORDEIRO, Carol Cardoso Moura et al. **Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 1, 2020.

COSTA, J. F. et al. **Reaproveitamento de resíduos de concreto como agregado reciclado em obras de pavimentação.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 3, p. 1–12, 2022.

COSTA, J. M. H.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, M. C. **Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: desafios para políticas públicas.** *Revista de Administração Pública*, v. 55, n. 4, p. 1056-1074, 2021.

COSTA, Laís Cristina Barbosa et al. **Eco-efficient steel slag concretes: an alternative to achieve circular economy.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 2, 2022.

DE MORAES, Natália Cristiane; DA SILVA, José Margarida; CURI, Adilson. **Avaliação de Cobertura Seca de Entulho de Construção Civil para Remediação de Drenagem Ácida em Mina.** *Revista de Medio Ambiente y Minería*, p. 13-24, 2017.

DORO, Vinicio Cunha; GUIMARÃES, Luiz Carlos Souza; NETO, Aurélio Rúbio. **Análise do potencial sustentável da madeira empregada no sistema Wood frame**. Revista Caribeña de Ciencias Sociales, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 1099–1110, 2023.

DOS SANTOS HENTSCHE, Cynthia; TORRES FORMOSO, Carlos; SOARES ECHEVESTE, Márcia Elisa. **A Customer Integration Framework for the Development of Mass Customised Housing Projects**. Sustainability, v. 12, n. 21, p. 8901-8901, 2020.

ECoinvent Association. **Ecoinvent Database v3.9. Zurich: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2022**. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org>. Acesso em: 11 ago. 2025.

EHRENBRING, H. Z.; OTT, M. J.; CADORE, B. C.; CARLIN, S. D. L.; TUTIKIAN, B. F. **Evaluation of mechanical properties of grouts substituting the natural coarse aggregate for ceramic civil construction waste**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.

EKRAMI, Navid; GARAT, Anais; FUNG, Alan S. **Thermal Analysis of Insulated Concrete Form (ICF) Walls**. Energy Procedia. Elsevier, v. 75, p. 2150-2156, ago. 2015.

EKRAMI, Navid; KAMEL, Raghad S.; GARAT, Anais; AMIRIRAD, Afarin; FUNG, Alan S. **Applications of Active Hollow Core Slabs and Insulated Concrete Foam Walls as Thermal Storage in Cold Climate Residential Buildings**. Energy Procedia. Elsevier, v. 78, p. 459-464, nov. 2015.

ELIAS, Saeed Talebi; KOSKELA, Lauri; TZORTZOPULOS, Patrícia; KAGIOGLOU, Mike; KRULIKOWSKI, Alex. **Deploying Geometric Dimensioning and Tolerancing in Construction**. Buildings, v. 10, n. 4, p. 62-62, 2020.

EL-MAGHRABY, Yosra; TARABIEH, Khaled; SHARKASS, Meral; MASHALY, Islam; FAHMY, Ezzat. **Thermal and Structural Performances of Screen Grid Insulated Concrete Forms (SGICFs) Using Experimental Testing**. Buildings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 9, p. 2599, ago. 2024.

EMAMJOME KASHAN, Mohammad; FUNG, Alan S.; EISAPOUR, Amir Hossein. **Insulated concrete form foundation wall as solar thermal energy storage for Cold-Climate building heating system**. Energy Conversion and Management: X. Elsevier, v. 19, p. 100391, jul. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU**. Brussels: European Commission, 2019.

FARIAS, Emmanuel Eduardo Vitorino de et al. **Avaliação do ciclo de vida da construção civil habitacional brasileira**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 1, p. e58011125360, 2022.

FIGUEIREDO, R. S. de; SOUZA, A. A.; LIMA, F. N. S.; BARRETO, I. M. **Integrating sustainability and innovation in the construction industry**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 8, n. 2, 2019.

FURET, Benoit; POULLAIN, Philippe; GARNIER, Sébastien. **3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete**. Additive Manufacturing. Elsevier, v. 28, p. 58-64, ago. 2019.

GOEDKOOOP, M.; SPIRENSMA, F. **The Eco-indicator 99: a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment; Methodology report, 2001**. Pré-publicado. Disponível em: https://pre-sustainability.com/wp-content/uploads/2013/10/EI99_methodology_v3.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

GONÇALVES DE LASSIO, João Gabriel; NAKED HADDAD, Assed. **Life cycle assessment of building construction materials: case study for a housing complex**. Revista de la construcción, v. 15, n. 2, p. 69-77, 2016.

GONZALEZ STUMPF, Marco Aurelio et al. **A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings**. Revista de la construcción, v. 13, n. 2, p. 9-14, 2014.

GREENDELTA. **openLCA 1.11 – User Manual**. Berlim: GreenDelta, 2020. Disponível em: <https://www.openlca.org>. Acesso em: 11 ago. 2025.

GREGORY, J.; MILLER, S.; KIRCHAIN, R. **Life-cycle impacts of residential building structures**. Cambridge: MIT Concrete Sustainability Hub, 2011.

GUINÉE, J. B. et al. **Life Cycle Assessment: Past, present, and future**. Environmental Science & Technology, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.

HAMMOND, G.; JONES, C. Inventory of Carbon and Energy (ICE). University of Bath, 2011.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, p. 138–147, 2017.

IBÁÑEZ-FORÉS, V.; BOVEA, M. D.; AZAPAGIC, A. **Assessing sustainability through life cycle approaches**. Journal of Cleaner Production, 2013.

IFFA, Emishaw; TARIKU, Fitsum. **Hygrothermal Performance Assessment of ICF Walls with Different Moisture Control Strategies and Wall Designs**. Journal of Green Building, v. 12, n. 4, p. 35-52, 2017.

INSULATING CONCRETE FORMS ASSOCIATION. **ICF Environmental and Energy Performance Study**. Glenview: ICFA, 2016.

IRISH AGRÉMENT BOARD (IAB). **Amvic insulating concrete formwork system: Certificate No. 07/0277**. Dublin: National Standards Authority of Ireland (NSAI), 2025.

ISO. ISO 14025: **Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

ISO. ISO 14040: **Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

ISO. ISO 14044: **Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

JESUS TAINARA, Andressa Campelo de; MENNA BARRETO, Maria Fernanda Fávero. **Análise comparativa dos sistemas construtivos em alvenaria convencional, alvenaria estrutural e moldes isolantes para concreto (ICF)**. E&S Engineering and Science, Campo Grande: Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, v. 1, n. 2, p. 45–57, 2018.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Materiais de construção e o meio ambiente**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2010.

JRC – JOINT RESEARCH CENTRE. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

KANAGARAJ, Balamurali; KIRAN, Tattukolla; GUNASEKARAN, Jayakumar; NAMMALVAR, Anand; ARULRAJ, Prince; GURUPATHAM, Beulah Gnana Ananthi; ROY, Krishanu. **Performance of Sustainable Insulated Wall Panels with Geopolymer Concrete. Materials**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute., v. 15, n. 24, p. 8801, dez. 2022.

KIRAN, B.; EREN, H. A. **Chemical recycling of expanded polystyrene: recent advances and challenges**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 6, 2021.

KOSNY, J.; CHRISTIAN, J. E.; DESJARLAIS, A. O.; KOSSECKA, E.; BERRENBURG, L. **Performance check between whole building thermal performance criteria and exterior wall measured clear wall R-value, thermal bridging, thermal mass, and airtightness**. ASHRAE Transactions, v. 104, n. 2, p. 1379–1389, 1998.

KOZLOVSKA, Maria; SPISAKOVA, Marcela; MACKOVA, Daniela. **Potential of Progressive Construction Systems in Slovakia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 245, p. 072022, out. 2017.

LE BLANC, D. **Towards integration at last? The sustainable development goals as a network of targets**. Sustainable Development, v. 23, n. 3, p. 176-187, 2015.

LEITE, G. R.; SILVA, T. S. **Sustainable practices in construction: an exploratory study on Brazilian companies**. Gestão & Produção, v. 27, n. 1, p. 107-120, 2020.

LIMA, M. G. S.; COSTA, A. F.; FERREIRA, L. D. The feasibility of recycled materials in civil construction. *Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. 88-102, 2016.

LIMA, S. F. de S.; BULIGON, L. B.; ZAMBONATO, B.; GRIGOLETTI, G. de C. **Sustainable construction management practices in a Brazilian medium-sized city**. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 4, p. 329-342, 2021.

LIPUSCH, Nikolaus; DELLERMANN, Dominik; BRETSCHNEIDER, Ulrich; EBEL, Philipp; LEIMEISTER, Jan Marco. **Designing for Crowdfunding Co-creation**. *Business & Information Systems Engineering*, v. 62, n. 6, p. 483-499, 2020.

LU, Xinrui; MEMARI, Ali. **Comparative energy analysis and life-cycle assessment of innovative residential wall systems in cold regions**. *Journal of Architectural Engineering (ASCE)*, 2013.

MACHADO, L. R.; ANDRADE, J. C.; SILVA, J. H. **Sustainable practices and construction waste management: a case study in São Paulo**. *Sociedade & Natureza*, v. 30, n. 1, 2018.

MARCEAU, Medgar L.; VANGEEM, Martha G. **Life Cycle Assessment of an Insulating Concrete Form House Compared to a Wood Frame House**. Skokie: Portland Cement Association, 2008.

MARTINELLI, Alessandra; SCIOTI, Albina; FATIGUSO, Fabio; FIORITO, Francesco. **Conceptual Design of a Modular Expanded Polystyrene (EPS) Formwork for Sustainable Prefabricated Concrete Slab**. *MATEC Web of Conferences*, v. 403, p. 05004, set. 2024.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Concrete Sustainability Hub – Life Cycle Assessment studies**. Cambridge: MIT, 2011.

MATHEY, R. G.; ROSSITER, W. J. **A review of autoclaved aerated concrete products**. Gaithersburg: National Bureau of Standards, 1988. (NBSIR 87-3670)

MELO, J. R.; COSTA, L. P.; LIMA, J. A. **Sustainable strategies in urban construction and architectural projects**. *Ambiente & Sociedade*, v. 24, n. 1, p. 40-60, 2021.

NAHB RESEARCH CENTER. **Insulating Concrete Forms (ICFs): a guide for builders and designers**. Upper Marlboro: NAHB Research Center, 2011.

NAIM, Mohamed Mohamed; GOSLING, Jonathan. **Revisiting the whole systems approach: designing supply chains in a turbulent world**. The International Journal of Logistics Management, v. 34, n. 1, p. 5-33, 2022.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Industry-Wide Environmental Product Declaration (EPD) for Ready Mixed Concrete**. Silver Spring: NRMCA, 2018.

NUNES, Gustavo Henrique; MIOTTO, José Luiz. **Thermo-energetic performance of Insulated Concrete Forms: improvements in low-income houses in the climate of São Paulo**. HOLOS, v. 38, n. 1, 2022.

OLIVEIRA, Tamara de Lima et al. **Telhado verde na captura de CO₂: estudo de caso em Garanhuns-PE**. Revista de Gestão Social e Ambiental, [S. l.], v. 17, n. 10, p. e04111, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 05 set. 2025.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. **Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 1, p. 28–39, 2009.

OUELLET-PLAMONDON, C.; HABERT, G. **Life cycle assessment of insulated concrete form (ICF) wall systems**. Journal of Cleaner Production, 2015.

PAPADOPOULOS, A. M. **State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments**. Energy and Buildings, v. 37, n. 1, p. 77–86, 2005.

PAPADOPOULOS, A. M.; GIAMA, E. **Environmental performance evaluation of thermal**

insulation materials and its impact on the building. Building and Environment, v. 42, n. 5, p. 2178–2187, 2007.

PASSER, A. et al. **Environmental product declarations entering the building sector: Critical reflection based on 5 to 10 years experience in different European countries.** International Journal of Life Cycle Assessment, v. 20, p. 1199–1212, 2015.

PASSOS, Paulo Martins dos; CARASEK, Helena. **Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto.** Cerâmica, São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, v. 64, n. 371, p. 374–382, 2018.

PASSUELLO, Ana Carolina et al. **Valorização de resíduos de ágata em argamassas e concretos: avaliação do ciclo de vida.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 2, 2019.

PATZLAFF, J.; STUMPF GONZÁLEZ, M. A.; PARISI KERN, A. **Evaluación de la sustentabilidad de la construcción en micro empresas o empresas pequeñas de la construcción: Caso de estudio en el sur de Brasil.** Revista ingeniería de construcción, v. 29, n. 2, p. 151-158, 2014.

PAVAN, J. V. P.; HENKE, P. C. **Estudo de viabilidade para utilização do método construtivo Insulated Concrete Forms (ICF).** REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 19, n. 2, p. 216 - 229, 2023.

PEÇANHA, G. P.; SOUZA, L. D.; DIAS, A. A.; GOMES, L. A. de A.; SILVA, E. P. **Environmental impacts of traditional and sustainable alternatives for the construction of low-income houses.** Ambiente Construído, v. 21, n. 3, p. 177-192, 2021.

PEREIRA, Francisco Luciano Alves et al. **Os benefícios da utilização do grafeno na construção civil.** Research, Society and Development, [S. l.], v. 12, n. 4, p. e3712440781, 2023.

PEREIRA, M. T.; BITTENCOURT, A.; SILVA, A. L. **Analysis of the environmental impact of building materials in the construction industry.** Gestão & Produção, v. 29, n. 1, 2022.

PFISTER, Stephan; KOEHLER, Annette; HELLWEG, Stefanie. **Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA.** Environmental Science &

Technology, v. 43, n. 11, p. 4098-4104, jun. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es802423e>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PICCOLI, Rossana et al. **A certificação de desempenho ambiental de prédios: exigências usuais e novas atividades na gestão da construção**. Ambiente Construído, v. 10, n. 3, p. 69-79, 2010.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Energy and environmental performance of insulated concrete form walls**. Skokie: Portland Cement Association, 2017.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Insulating concrete forms**. Skokie: Portland Cement Association, 2018.

PYTEL, Norman; ZIEGLER, Christian; WINKELMANN, Axel. **From Dissonance to Dialogue: A Token-Based Approach to Bridge the Gap Between Manufacturers and Customers**. ACM Transactions on Management Information Systems, v. 15, n. 1, p. 1-20, 2024.

QUAGLIO, Renam Serraglio; ARANA, Alba Regina Azevedo. **Diagnosis of civil construction waste management from the reading of the urban landscape**. Sociedade & Natureza, v. 32, p. 437-450, 2020.

RIBEIRO, G. R. de A.; SILVA, A. A.; SOUZA, L. E. **Technological impacts in the industrialization of construction**. Revista Engenharia e Tecnologia, v. 9, n. 3, p. 243-259, 2019.

SABBATINI, F. H. **Sistemas construtivos industrializados**. São Paulo: Edusp, 2003.

SACHS, J. **The age of sustainable development**. New York: Columbia University Press, 2015.

SALEHPOUR, B.; GHOBADI, M.; MOORE, T.; GE, H. **Component sequence and thermal mass effects on the transient thermal performance of concrete walls**. Journal of Physics: Conference Series, v. 2069, n. 1, p. 012091, nov. 2021.

SAMPAIO, Daniel Oliveira de Azevedo et al. **Avaliação do ciclo de vida de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu pré-moldadas pré moldadas**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 27, n. 2, 2022.

SANTOS, R. G.; SOUZA, M. G. **Sustainability in civil construction: a study on waste management practices**. *Produção*, v. 31, 2021.

SHAFIEE, Sara; PIROOZFAR, Poorang; FARR, Eric R.P.; HANSEN, Hans Nørgaard; FARR, Eric R.P. **Enhancing efficiency and sustainability in construction: a product configurator for customizable off-site building solutions**. *Architectural Engineering and Design Management*, 2024.

SILVA, Bruno Sanches da et al. **Tijolo de solo-cimento: incorporação de resíduos e viabilidade na construção civil no Brasil**. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 2, p. e19011225605, 2022.

SILVA, Fernanda Monique da et al. **From coconut waste to the production of cementitious composites as an alternative for civil construction**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 28, n. 3, 2023.

SILVA, José Igor Gonçalves da. **Vergalhões de GFRP em substituição aos de aço na armadura de concreto armado**. *Revista Foco*, [S. l.], v. 17, n. 3, p. e4705, 2024.

SILVA, L. M.; FERNANDES, L. C. **Utilização de resíduos de alvenaria como agregados reciclados**. *Revista Engenharia Civil*, v. 64, p. 55–66, 2012.

SILVA, V. A. da; FERNANDES, A. L. T. **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG**. *Sociedade & Natureza*, v. 24, n. 2, p. 333-344, 2012.

SILVEIRA, M. D.; GUEDES, A. R.; NASCIMENTO, G. R. **Management and waste reduction practices in the construction industry**. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 9, n. 3, p. 189-199, 2017.

SILVESTRE, J. D.; BRAGANÇA, L.; ANDRADE, U. **Sustainable construction management: a systematic review of the literature with meta-analysis**. *Journal of Cleaner*

Production, v. 219, p. 122–132, 2019.

SOLOMON, A. Arun; HEMALATHA, G.; SUDHEER, G.; SHELTON, J. Joel; CARMICHAEL, M. Jemimah. **Exploring the impact of EPS incorporation on insulated concrete form (ICF) wall panels under axial compression and flexure**. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. Elsevier, v. 36, n. 3, p. 207-215, mar. 2024.

SOUSA, Luana Pontes; PEREIRA, Maurício de Sousa; LIMA, Maria Emanuelle Aragão. **Análise de custos para implantação de telhados verdes em região semiárida com reutilização de águas cinzas**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e15511729770, 2022.

SOUZA, Adriana Ireno de et al. **Environmental performance and economic feasibility in an interlocking concrete paving industry**. Revista de Administração da UFSM, v. 13, n. 4, p. 664-684, 2020.

STANGE, Raphael; SCHIELE, Holger; HENSELER, Jörg. **Advancing purchasing as a design science: Publication guidelines to shift towards more relevant purchasing research**. Journal of Purchasing and Supply Management, v. 28, n. 1, p. 100750-100750, 2022.

STRECKER, Kurt; SILVA, Carlos Antonio Cardoso da; PANZERA, Túlio Hallak. **Fabricação e caracterização de compósitos à base de cimento com incorporação de poliestireno expandido (isopor)**. Cerâmica, São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, v. 60, n. 353, p. 23–29, 2014.

UIDHIR, Tomás Mac; ROGAN, Fionn; COLLINS, Matthew; CURTIS, John; Ó GALLACHÓIR, Brian. **Residential stock data and dataset on energy efficiency characteristics of residential building fabrics in Ireland**. Data in Brief. Elsevier, v. 29, p. 105247, abr. 2020.

WERNET, G. et al. **The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, p. 1218–1230, 2016.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon**. London: WGBC, 2018.

ZABALZA BRIBIÁN, Ignacio; VALERO CAPILLA, Antonio; ARANDA USÓN, Alfonso.
Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.
Building and Environment, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

APÊNDICE A – Declaração Ambiental do Produto (DAP) do Sistema ICF

Este apêndice apresenta a Declaração Ambiental do Produto (DAP) elaborada para o sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF), baseado em formas permanentes de Poliestireno Expandido (EPS) preenchidas com concreto estrutural.

A DAP foi estruturada com base nos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desenvolvida nesta dissertação, modelada no software openLCA (versão 2.5, 2025), utilizando o método Eco-indicator 99 e a base de dados Ecoinvent v3.10, no escopo berço ao portão (*cradle-to-gate*). A unidade declarada corresponde a 1 m² de parede estrutural em sistema ICF, com vida útil de referência de 50 anos, conforme a ABNT NBR 15575-1.

A estrutura da DAP foi adaptada a partir de modelos consolidados utilizados na indústria da construção civil, em especial documentos de referência no formato de Declarações Ambientais de Produto, sendo ajustada às limitações metodológicas do estudo.

A inclusão desta DAP como apêndice tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade prática dos resultados da ACV, bem como evidenciar o potencial do sistema ICF para a comunicação estruturada de desempenho ambiental, em consonância com os princípios da ISO 14025 e com a abordagem de sustentabilidade adotada nesta dissertação.

DECLARAÇÃO AMBIENTAL DE PRODUTO (DAP) DO SISTEMA CONSTRUTIVO ICF

Produto: Sistema construtivo *Insulated Concrete Forms* (ICF) à base de Poliestireno Expandido (EPS)

Fabricante de referência: EME Indústria de EPS

Tipo de DAP: Tipo III (ISO 14025)

Responsável pela declaração: Sergio Copeliovitch.

Instituição: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos.

Ano: 2026.

A. Unidade Declarada: - 1 m² de parede estrutural executada com sistema ICF

B. Fronteiras do Sistema: Berço ao portão (A1–A3):

- A1 – Extração e processamento de matérias-primas;
- A2 – Transporte;
- A3 – Processos de fabricação.
- Os módulos A4 a D não estão incluídos nesta declaração.

C. Método de Avaliação do Ciclo de Vida:

- Método de AICV: EN 15804+A2:2019 – indicadores *midpoint*;
- Software: openLCA;
- Base de dados: processos compatíveis com Ecoinvent;
- Escopo geográfico: Brasil;
- Matriz elétrica: mix elétrico brasileiro.

D. Indicadores de Impacto Ambiental (EN 15804+A2):

A Tabela I apresenta os resultados consolidados da ACV do sistema ICF no escopo berço ao portão, calculados pelo método Eco-indicator 99 (*endpoint*), para 1 m² de parede estrutural. Os resultados estão organizados por categorias de dano — saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais — permitindo a visualização quantitativa dos principais

impactos associados à produção de 1 m² de parede estrutural em ICF.

Tabela I: Indicadores de impacto ambiental – A1–A3. Unidade declarada: 1 m² de parede ICF

Categoria de impacto	Unidade	A1–A3
Potencial de aquecimento global – total (GWP-total)	kg CO ₂ eq	159,8
Potencial de aquecimento global – fóssil (GWP-fóssil)	kg CO ₂ eq	152,4
Potencial de aquecimento global – biogênico (GWP-biogênico)	kg CO ₂ eq	≈ 0,0
Potencial de aquecimento global – uso da terra (GWP-luluc)	kg CO ₂ eq	7,4
Potencial de destruição da camada de ozônio (ODP)	kg CFC-11 eq	$2,1 \times 10^{-6}$
Potencial de acidificação (AP)	mol H ⁺ eq	1,42
Eutrofização – água doce (EP-freshwater)	kg P eq	$2,9 \times 10^{-3}$
Eutrofização – marinha (EP-marine)	kg N eq	$3,8 \times 10^{-2}$
Eutrofização – terrestre (EP-terrestrial)	mol N eq	0,41
Formação de ozônio fotoquímico (POCP)	kg NMVOC eq	0,46
Depleção de recursos fósseis (ADPF)	MJ	230
Potencial de escassez hídrica (WDP)	m ³ world eq	1,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela II apresenta a contribuição dos principais materiais e processos para as categorias de impacto ambiental identificadas na ACV. Essa desagregação permite identificar os *hotspots* ambientais do sistema, com destaque para a produção de cimento, concreto e EPS, subsidiando a interpretação técnica dos resultados e a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental do produto.

Tabela II: Indicadores de uso de recursos – A1–A3

Indicador	Unidade	A1–A3
Uso de energia primária renovável, exceto combustíveis renováveis (PERE)	MJ	18,6
Uso de energia primária renovável, incluindo combustíveis renováveis (PERT)	MJ	21,3
Uso de energia primária não renovável, exceto combustíveis fósseis (PENRE)	MJ	96,8
Uso de energia primária não renovável, incluindo combustíveis fósseis (PENRT)	MJ	208,7
Uso de material secundário (SM)	kg	≈ 0,0
Uso de recursos fósseis (FR)	kg	6,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

E. Coerência com Resultados Endpoint (Eco-indicator 99):

Os indicadores *endpoint* foram utilizados para interpretação integrada e comunicação do dano ambiental, enquanto os indicadores *midpoint* definidos pela EN 15804+A2 foram adotados para estruturar a Declaração Ambiental de Produto, conforme exigência normativa. Ambos derivam do mesmo inventário, garantindo consistência metodológica. *Midpoints* explicam o impacto; *endpoints* explicam o dano. Os indicadores *midpoint* apresentados são plenamente coerentes com os resultados previamente obtidos por método *endpoint* (Eco-indicator 99), observando-se:

- Predominância do uso de energia fóssil (PENRT e ADPF);
- Elevados valores de GWP-fóssil, associados à produção de clínquer e ao consumo de energia;
- Contribuições relevantes de acidificação e eutrofização, compatíveis com emissões atmosféricas do setor cimenteiro.

Não foram identificadas inconsistências conceituais entre as abordagens *midpoint* e *endpoint*.

O Quadro I demonstra a coerência metodológica entre o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), os indicadores *midpoint* da EN 15804+A2 e os resultados *endpoint* (Eco-indicator 99).

Quadro I: Rastreabilidade – Inventário × Midpoint × Endpoint

Processo / Fluxo do Inventário	Categoria Midpoint (EN 15804+A2)	Indicador Midpoint	Categoria Endpoint (Eco-indicator 99)	Justificativa Técnica
Produção de clínquer (combustão e calcinação)	Mudança climática	GWP-fossil	Saúde Humana / Recursos	Emissões diretas de CO ₂ e alto consumo energético
Produção de clínquer (NO _x , SO ₂)	Acidificação	AP	Saúde Humana	Formação de chuva ácida e efeitos respiratórios
Produção de cimento	Eutrofização terrestre	EP-ter	Qualidade do Ecossistema	Deposição atmosférica de compostos nitrogenados
Extração mineral (calcário, agregados)	Uso da água	WDP	Qualidade do Ecossistema	Alteração de habitats e consumo hídrico

Processo / Fluxo do Inventário	Categoria Midpoint (EN 15804+A2)	Indicador Midpoint	Categoria Endpoint (Eco-indicator 99)	Justificativa Técnica
Geração de energia elétrica	Mudança climática	GWP-fossil	Saúde Humana	Emissões indiretas da matriz energética
Produção de EPS (insumos petroquímicos)	Depleção de recursos fósseis	ADPF	Recursos	Uso de matérias-primas não renováveis
Produção de EPS (VOC)	Formação de ozônio fotoquímico	POCP	Saúde Humana	Formação de smog fotoquímico
Transporte de matérias-primas	Mudança climática	GWP-fossil	Saúde Humana	Combustão de diesel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

F. Interpretação dos Resultados:

O perfil ambiental do sistema ICF, considerando os módulos A1–A3, é predominantemente condicionado por:

- Produção de cimento e clínquer, responsável pela maior parcela dos impactos de GWP, AP e EP;
- Consumo de energia elétrica, influenciando GWP-fóssil, POCP e uso de recursos;
- Produção de EPS, com contribuição significativa para depleção de recursos fósseis.

As etapas relacionadas ao transporte até o canteiro e à execução da obra não foram consideradas na modelagem, pois o estudo adota a fronteira de sistema berço ao portão (módulos A1–A3), limitando a análise às fases de extração de matérias-primas, transporte interno e fabricação dos materiais.

G. Hotspots Ambientais (Visão Midpoint):

O Quadro II apresenta a síntese interpretativa dos resultados da ACV aplicada ao sistema ICF, estruturada segundo os princípios da ISO 14044 e alinhada às diretrizes para Declaração Ambiental de Produto estabelecidas pela ISO 14025. A sistematização permite relacionar os impactos identificados às potencialidades, limitações e implicações estratégicas do sistema no contexto da construção civil sustentável.

Quadro II: Processo × Indicadores *Midpoint*

Processo	Indicadores midpoint dominantes
Produção de clínquer	GWP, AP, EP-ter, ADPF
Produção de EPS	ADPF, GWP-fóssil
Geração de energia elétrica	GWP-fóssil, POCP
Extração mineral	WDP, EP-freshwater

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda: GWP – Potencial de Aquecimento Global; AP – Potencial de Acidificação; EP-ter – Potencial de Eutrofização Terrestre; EP-freshwater – Potencial de Eutrofização de Água Doce; POCP – Potencial de Formação de Ozônio Fotoquímico; ADPF – Depleção de Recursos Abióticos – Combustíveis Fósseis; WDP – Potencial de Depleção de Recursos Hídricos.

H. Potencial de Melhoria Ambiental:

As estratégias com maior potencial de redução de impactos incluem:

- Redução do teor de clínquer nos cimentos;
- Uso de materiais cimentícios suplementares (adições minerais);
- Otimização energética na produção de EPS;
- Ampliação do uso de fontes elétricas de menor intensidade de carbono.

Essas ações atuam diretamente sobre os indicadores de maior magnitude absoluta.

I. Limitações e Declaração de Prontidão para Auditoria:

Limitações:

- Resultados limitados aos módulos A1–A3;
- Benefícios térmicos do sistema ICF em fase de uso não foram considerados;
- Cenários de fim de vida não foram avaliados;
- DAP não verificada por terceira parte independente.

Prontidão para auditoria:

- Esta DAP atende à estrutura, terminologia e indicadores exigidos pela EN 15804+A2. Para certificação formal é necessária verificação independente por organismo acreditado.

J. Declarações Obrigatórias (EN 15804):

- DAPs provenientes de diferentes programas podem não ser comparáveis entre si;
- Comparações só são válidas se realizadas com a mesma unidade declarada, fronteiras e metodologia;

Esta declaração representa o desempenho ambiental médio do produto avaliado.