

CÁSSIA RAFAELA BRUM SOUZA

**ESTUDO DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA APLICADO À
RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR COM FOCO EM ECO-ANÁLISES E
DIAGNÓSTICOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
JUNHO – 2025

CÁSSIA RAFAELA BRUM SOUZA

ESTUDO DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA APLICADO À
RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR COM FOCO EM ECO-ANÁLISES E
DIAGNÓSTICOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
JUNHO – 2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Brum Souza, Cássia Rafaela

Estudo de Análise do Ciclo de Vida aplicado à residência unifamiliar com foco em eco-análises e diagnósticos de impactos ambientais / Cássia Rafaela Brum Souza; orientador Samuel Nelson Melegari de Souza; coorientador Jair Antônio Cruz Siqueira. -- Cascavel, 2025.

84 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2025.

1. Análise do ciclo de vida. 2. Eco análises. 3. Análise do ciclo de vida residencial. I. Melegari de Souza, Samuel Nelson, orient. II. Cruz Siqueira, Jair Antônio, coorient. III. Título.

CÁSSIA RAFAELA BRUM SOUZA

**Estudo de Análise do Ciclo de Vida aplicado à residência unifamiliar com foco em
eco-análises e
diagnósticos de impactos ambientais**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA**
Data: 20/06/2025 16:43:04-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Orientador - Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **HITOMI MUKAI**
Data: 20/06/2025 15:36:17-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Hitomi Mukai
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **DOGLAS BASSEGIO**
Data: 18/06/2025 18:12:02-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Doglas Bassegio
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **HEITOR OTHELO JORGE FILHO**
Data: 18/06/2025 16:22:32-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Heitor Othelo Jorge Filho
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

ASSINADO DIGITALMENTE
MARCIO LUIZ MODOLO
Assinatura eletrônica com a assinatura pessoal ou verificada em
<https://www.gov.br/validar-digital> 

Marcio Luiz Modolo
Instituto Federal do Paraná - Cascavel (IFPR)

Cascavel, 18 de junho de 2025

“Dedico este trabalho àqueles que não medem esforços para fazer do tempo seu melhor amigo e da natureza a sua casa, preservando-a para as gerações futuras.”

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este momento para expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa. Esta jornada só foi possível graças ao apoio, orientação e estímulo de cada um de vocês.

Sou grato a Deus por me dar força, orientação e inspiração ao longo desta jornada, sendo meu pilar em todos momentos desafiadores e decisivos que enfrentei.

Agradeço ao meu orientador, Professor Samuel Nelson Melegari de Souza, por sua orientação precisa e de extrema importância. Sua paciência, sabedoria, dedicação e carinho foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Minha gratidão se estende à minha família, em especial à meus pais que sempre acreditaram em mim e ensinaram que nada é impossível.

Aos amigos, em especial à Gabriela Bandeira que compartilhou comigo essa trajetória que é fazer um doutorado, dividindo as angústias e as alegrias do processo da pesquisa.

Agradeço às instituições de ensino e pesquisa, UNIOESTE que forneceu ensino, recurso e acesso a dados, bem como ao Centro Universitário FAG, que apoiou financeiramente esta pesquisa.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos os participantes da pesquisa e a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para este projeto.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que buscam um mundo mais sustentável, humano e saudável. Obrigado por fazerem parte desta trajetória.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Oferta Interna de Energia	23
Figura 02: Produção de Energia Primária	24
Figura 03: Fases de uma ACV	30
Figura 04: Ciclo de Vida das Edificações	33
Figura 05: Ciclo de vida energético de uma edificação	35
Figura 06: Limite do sistema de avaliação de emissões de carbono	35
Figura 07: Fronteira do sistema	41
Figura 08: Planta de Implantação	43
Figura 09: Fachada Frontal	44
Figura 10: Planta Baixa – Pav.térreo	45
Figura 11: Planta Baixa – Pav.superior	46
Figura 12: Planta de Cobertura	47
Figura 13: Fluxos nas etapas do ciclo de vida	50
Figura 14: Modelagem do transporte e distribuição dos ciclos de vida dos materiais	53
Figura 15: Elementos da fase de avaliação dos impactos	59
Figura 16: Classificação dos fluxos do inventário nas categorias de impacto <i>mid-points</i> e <i>end-points</i>	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Especificações dos materiais adotados.....	42
Tabela 02: Equações específicas para emissão de carbono em diferentes fases	49
Tabela 03: Consumo de energia e emissão de carbono da edificação alvo na fase de construção	51
Tabela 04: Distância de transporte e volume de transporte de materiais	53
Tabela 05: Consumo de materiais da edificação alvo	54
Tabela 06: Horário de funcionamento de instrumentos.....	55
Tabela 07: Consumo de energia da edificação alvo na fase de operação	55
Tabela 08: Fonte de emissão de carbono na fase de descarte	56
Tabela 09: Materiais substituídos no cenário de contraste e sua correspondência	58
Tabela 10: Valores de mercado para os materiais do cenário atual	62
Tabela 11: Valores de mercado para os materiais do cenário de contraste	62
Tabela 12: Resultados finais sobre mudanças climáticas e recursos, totais e por metro quadrado	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>CML IA</i> , caracterização	64
Gráfico 02: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Eco-Indicator 99</i> , caracterização.....	65
Gráfico 03: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , caracterização	65
Gráfico 04: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos	66
Gráfico 05: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , normalização	67
Gráfico 06: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , ponderação	67
Gráfico 07: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , caracterização, cenário constraste	68
Gráfico 08: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos, cenário constraste	69
Gráfico 09: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário alvo nas mudanças climáticas, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos	72
Gráfico 10: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário de constraste nas mudanças climáticas, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos	72
Gráfico 11: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário alvo no consumo de recursos naturais, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos	74
Gráfico 12: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário de constraste no consumo de recursos naturais, Método <i>Impact 2002+</i> , avaliação de danos	74

SIGLAS

ACV - Análise do Ciclo de Vida

ACVE - Avaliação do Ciclo de Vida Energético

AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

AQUA – Alta Qualidade Ambiental

BREEAM – *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

CASBEE – *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*

CLT – Consolidação das Leis do Trabalho

CO₂ - Dióxido de Carbono

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

EUA - Estados Unidos da América

GBTool – *Green Building Challenge*

GEE - Gases do efeito estufa

HK-BEAM – *Hong Kong Building Environmental Assessment Method*

HQE – *NF Bâtiments Tertiaires: Démarche HQE Bureau et Enseignement*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICV – Impacto do Ciclo de Vida

IEC - *International Electrotechnical Commission*

ISO - *International Organization for Standardization*

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

LIDERA – *Sustainable Building Assessment System*

MARS – *Building Sustainability Assessment Tool*

NBR - Norma Brasileira

OIE - Oferta Interna de Energia

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB - Produto Interno Bruto

PGRCC - Plano de Gerenciamento da Construção Civil

PR - Paraná

PVC - Policloreto de Vinila

RDC - Resíduos de construção e demolição

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SAGE - *Strategic Advisory Group on the Environment*

SBAT – *Sustainable Building Assessment Tool*

TC – Comitê Técnico

TCPO - Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos

VUP – Vida Útil de Projeto

SOUZA, Cássia. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, junho 2024. **Estudo de Análise do ciclo de vida aplicado à residência unifamiliar com foco em eco-análises e diagnósticos de impactos ambientais.** Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

O setor da construção civil tem um impacto economicamente positivo e significativo no ambiente local e na região circundante, decorrente de suas atividades diretas e indiretas, e emerge como uma das atividades econômicas mais proeminentes e influentes globalmente. No Brasil, o setor da construção civil está experimentando um crescimento significativo e o aumento da demanda por materiais está diretamente ligado ao aumento do consumo de matérias-primas e energia, especialmente durante as etapas de extração, processamento e transporte e percebe-se cada vez mais a urgência de minimizar os impactos ambientais em prol da sustentabilidade na indústria da construção. Este estudo busca apresentar os principais resíduos gerados pelo setor da construção civil, enumerando os impactos que os mesmos geram, por meio de análise de Ciclo de Vida (ACV) aplicado em uma residência unifamiliar, analisando os efeitos ambientais dos materiais residuais no setor da construção: alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira, comparação custo x benefício, aplicando o conceito de sustentabilidade às cadeias de suprimento desses materiais e aos seus ciclos de vida, visando auxiliar na tomada de decisões ambientais e contribuir para a gestão do ciclo de vida de uma construção. "Um metro quadrado" foi adotado como unidade funcional para comparar o mesmo layout arquitetônico da residência utilizando materiais de construção diferentes para a mesma função. O limite do sistema neste estudo segue a classificação: "do berço ao túmulo", e os valores obtidos foram de $1,07E5$ KgCO₂eq, equivalente à 564,82 KgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado no cenário atual e de $6,32E4$ KgCO₂eq, equivalente à 333,61 KgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado no cenário de constraste. Nos usos de recursos obteve-se $1,21E6$ MJ totais para cenário atual, resultando em 6.387,24 MJ/m², e no cenário de constraste o equivalente à $9,35E5$ MJ total, chegando ao valor de 4.935,59 MJ/m². Na comparação custo x benefício, o cenário sustentável apresentou valores superiores em 80% com relação ao cenário atual.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Ciclo de Vida; ACV Residencial; Eco-análises.

SOUZA, Cássia. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, junho 2024. **Life cycle analysis study applied to single-family homes with a focus on eco-analysis and diagnosis of environmental impacts.** Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

The construction sector has a positive and significant impact on the local environment and the surrounding region, resulting from its direct and indirect activities, and emerges as one of the most prominent and influential economic activities globally. In Brazil, the civil construction sector is experiencing significant growth and the increase in demand for construction materials is directly linked to the increase in consumption of raw materials and energy, especially during the extraction, processing and transportation stages. There is an increasing urgency to minimize environmental impacts in favor of sustainability in the construction industry. This study seeks to present the main waste generated by the construction sector, enumerating the impacts they generate, through Life Cycle Analysis (LCA) applied in a single-family home, analyzing the environmental effects of waste materials in the sector of construction: aluminium, steel, cement, ceramics and wood, cost-benefit comparison, applying the concept of sustainability to the supply chains of these materials and their life cycles, aiming to assist in environmental decision-making and contribute to the management of the life cycle of a construction. "One square meter" was adopted as the functional unit to compare the same architectural layout of the residence using different construction materials for the same function. The system boundary in this study follows the classification: "from the cradle to the grave", the values obtained were $1,07E5 \text{ KgCO}_2\text{eq}$, equivalent to $564,82 \text{ KgCO}_2\text{eq/m}^2$ of emissions per square meter in the current scenario and $6,32E4 \text{ KgCO}_2\text{eq}$, equivalent to $333,61 \text{ KgCO}_2\text{eq/m}^2$ of emissions per square meter in the contrast scenario. In resource use, $1,21E6 \text{ MJ}$ total was obtained for the current scenario, resulting in $6.387,24 \text{ MJ/m}^2$ total, and in the equivalent to $9,35E5 \text{ MJ}$ total, reaching the value of $4.935,59 \text{ MJ/m}^2$. In the cost-benefit comparison, the sustainable scenario presented values 80% higher than the current scenario.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

KEYWORDS: Life Cycle Analysis; Residential ACV; Eco-analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa.....	17
1.2. Problema da pesquisa.....	17
1.4. Objetivo geral	18
1.5. Objetivos específicos	18
1.6. Estrutura do trabalho.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. O desenvolvimento sustentável.....	21
2.2. A sustentabilidade no setor da construção civil.....	22
2.3. Impactos ambientais associados às edificações	22
2.4. Consumo de energia no Brasil e na construção civil brasileira	23
2.5. Ferramentas de avaliação ambiental no setor da construção civil	25
2.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	27
2.6.1. Definição.....	27
2.6.2 Normalização	28
2.6.3 Metodologia de avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	29
2.6.4 Avaliação do Ciclo de Vida na construção Civil.....	32
2.6.5 Ferramentas utilizadas na ACV – softwares e bases de dados.....	33
2.6.6 Ciclo de vida energético das edificações	34
2.6.7 Energia Embutida em edificações.....	36
2.6.8 Resíduos sólidos da construção civil.....	36
2.6.9 Software SimaPro versão 9.5.0.2.....	37
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1. Definição dos objetivos e do escopo.....	39
3.1.1 Objetivo da análise	39

3.1.2 Domínio de aplicação	40
3.1.3 Fronteiras do ciclo de vida	40
3.1.4 Base de dados	41
3.2. Construção de alvo e construção de constraste	42
3.3 Avaliação das emissões de carbono do ciclo de vida	48
3.4 Inventário do ciclo de vida	49
3.4.1 Fatores de Emissão de Carbono e Consumo de Energia	50
3.4.2 Inventário para a fase de obtenção.....	52
3.4.3 Inventário para a fase de transporte	52
3.4.4 Inventário para a fase de produção	54
3.4.5 Inventário para fase de construção.....	54
3.4.6 Inventário para fase de operação	55
3.4.7 Inventário para a fase de descarte.....	56
3.4.8 Materiais no cenário alvo e de contraste	57
3.4.9 Avaliação dos Impactos	58
3.4.10 Categoria de impactos	60
3.4.11 Cálculo dos indicadores.....	61
3.5 Comparação custo x benefício entre os dois cenários.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 Interpretação dos resultados	69
4.2 Comparação custo x benefício	75
5 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

A construção civil e suas indústrias produzem impactos significativamente grandes no ambiente local e no seu entorno, o que decorre de atividades diretas e indiretas, sendo geradas desde a produção de cimento e o seu transporte, bem como de outros materiais, até a movimentação de terra para a obtenção de reservatório de água. E os efeitos de tais atividades geram efeitos no âmbito ambiental, social e econômico (BARBISAN *et al.*, 2012).

Em março de 2024, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelou os números referentes ao Produto Interno Bruto (PIB) do ano de 2023, e de acordo com os dados divulgados, houve um crescimento de 2,9% em relação ao ano anterior. Esse aumento foi impulsionado principalmente pelo desempenho positivo do setor da construção civil, que abriu 31.893 vagas CLT em Abril, 13% do saldo do país (ABRAINC, 2024).

Nesse cenário, emergindo como uma atividade econômica crescente e influente a indústria da construção civil é o setor responsável por uma parcela significativa das emissões globais de carbono (CO₂), correspondendo a cerca de 38% do total gerado, (ABECIP, 2021). De acordo com Brizolla *et al.* (2017), a construção civil é uma das atividades que mais consome matéria-prima, além de água e energia elétrica. E diante dessa contextualização, é indispensável revisar e analisar a forma como a concepção de projetos acontecem, onde desde a escolha de materiais até os seus processos devem ser levados em consideração.

Segundo a ONU – Organização das Nações Unidas, em seu Relatório sobre a Lacuna das Emissões 2023, alerta para as emissões de gases do Efeito Estufa previstas para 2030, as quais devem diminuir entre 28% e 42% para chegar a temperaturas de 2°C e 1,5°C. E para complementar a panorama, lançado na última rodada de negociações climáticas no Egito, durante a COP27, o Relatório de Status Global de Edificação e Construção de 2022 conclui que o setor foi responsável por mais de 34% da demanda de energia e cerca de 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia e processos em 2021 (ONU, 2022).

Atualmente, no Brasil, o setor da construção civil vem experimentando um significativo aumento, impulsionado pelos incentivos do governo, com suas políticas fiscais e programas de subsídios à população. E a demanda por materiais de construção está diretamente relacionado ao consumo de matéria-prima e energia,

desde sua extração, processamento ou beneficiamento e transporte até os canteiros de obra.

Além disso, é importante considerar o aumento resultante na geração de resíduos, tanto devido ao desperdício de materiais quanto às atividades de demolição. De acordo com Cunha *et al.* (2023), a quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) vem crescendo no Brasil desde a década de 1990, provenientes da construção de infraestrutura urbana, que é de responsabilidade pública, e de construção de novas edificações residenciais, comerciais e industriais, de responsabilidade da iniciativa particular.

Emerge assim, a necessidade de minimização dos impactos ambientais como a geração de CO₂ e a má destinação dos resíduos da construção civil, em prol da sustentabilidade, uma vez que, devem ser analisados e previstos ainda na fase projetual, passando pela escolha dos materiais, e o seu descarte final.

Segundo o último panorama da situação dos resíduos sólidos no Brasil, elaborado em 2022 pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, do ano de 2021, foram coletados pelos municípios mais de 48 milhões de toneladas de RCD (resíduos de construção e demolição), o que representa um crescimento de 2,9% em relação ao período anterior. A quantidade coletada por habitante foi de cerca de 227 kg por ano e, em boa parte, equivale a resíduos de construção e demolição abandonados em vias e logradouros públicos. Pouco mais da metade dos RCD coletados no Brasil vem da região Sudeste (52%), no entanto, a região que se destaca em termos de coleta per capita é a Centro-Oeste, com quase 323 kg por habitante/ano (ABRELPE, 2022).

É neste contexto que a Análise do Ciclo de Vida (ACV) ganha destaque como uma ferramenta essencial na construção civil contemporânea. Por meio dela, é possível avaliar o desempenho ambiental de materiais, sistemas produtivos e edificações ao longo de toda sua vida útil. A Análise do Ciclo de Vida proporciona *insights* valiosos sobre oportunidades de aprimoramento na indústria da construção, oferecendo informações detalhadas sobre os impactos ambientais gerados e subsidiando decisões mais sustentáveis.

Nesta perspectiva, o presente trabalho buscou elencar os principais efeitos ambientais quanto à emissão de CO₂ e consumo energético para a obtenção dos materiais construtivos de maior volume: aço, cimento, cerâmica e madeira, na construção civil, através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.1. Justificativa

A condução desta pesquisa é impulsionada por uma variedade de razões que ressaltam sua importância e urgência, baseando-se na melhoria simultânea da gestão da qualidade ambiental na indústria da construção civil, por meio de investimentos contínuos em processos, tecnologias e procedimentos que visam a sustentabilidade.

Além disso, é crucial considerar a interligação entre o contexto local e global, o qual o setor não pode mais ignorar o impacto ambiental das construções individuais sobre o meio ambiente em geral, cenário o qual, as residências unifamiliares se enquadram e tem demonstrado crescimento acentuado e ainda não possuem uma regulamentação como a NBR 15.575 para orientar a sua construção e desempenho.

Em pesquisa realizada na busca por estudos já realizados na área, pode-se destacar as Análises do Ciclo de Vida de materiais base para as construções como aço, concreto e cimento *Portland* (ALMEIDA & CARNEIRO, 2025; GEHRKE *et al.* 2024); os estudos de casos abordando as construções habitacionais brasileiras (WITICOVCKI *et al.* 2018; COSTA & KOS, 2021; FARIAS *et al.* 2022); e a avaliação do impactos ambientais de sistemas construtivos (MEDEIROS, *et al.* 2018; ATTIÉ & SALGADO, 2021; MENEGATTI, *et al.* 2023).

Assim, justifica-se em compreender o contexto relacionado à preservação ambiental, explorando a filosofia da sustentabilidade dentro do contexto da construção civil e a viabilidade econômica. E seu ineditismo está em apresentar características que não foram observadas nas referências bibliográficas analisadas, trazendo a comparação entre dois cenários construtivos para uma residência unifamiliar, avaliação econômica destes cenários, geração de CO₂ e consumo energético, tema central desta pesquisa.

1.2. Problema da pesquisa

O crescimento na demanda por materiais de construção está diretamente relacionado ao aumento no uso de matérias-primas e energia, especialmente nos processos de extração, transformação e transporte. Resultando na crescente geração de resíduos, resultado do desperdício de materiais e das atividades de demolição.

Portanto, tem-se como problema da pesquisa o seguinte questionamento: Qual a emissão de CO₂, consumo energético e viabilidade econômica para dois cenários (comum x sustentável) na construção de uma residência unifamiliar de médio padrão

dos materiais residuais de maior volume?

1.3. Hipótese

Na busca por aplicar o conceito de sustentabilidade às cadeias de suprimento dos materiais e aos seus ciclos de vida, e auxiliar na tomada de decisões ambientais, contribuindo para a gestão do ciclo de vida de uma construção, é que a análise da emissão de CO₂ e consumo energético para a obtenção dos materiais construtivos residuais de maior volume são importantes e imprescindíveis.

E ao propor um cenário ideal utilizando materiais mais sustentáveis, com menor produção de CO₂ e consumo energético, pode-se contrastar com o cenário atual com os métodos tradicionalmente utilizados hoje no Brasil, obtendo então informações que mostrará se os dois cenários são inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais sustentável forem os materiais e as técnicas construtivas, mais elevado é o valor final da obra e quanto menos sustentável, menor será o valor final da construção.

1.4. Objetivo geral

Analisar e quantificar os impactos da geração de CO₂ e o consumo energético do “berço ao túmulo” dos materiais de construção residuais de maior volume no setor da construção civil: alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira, por metro quadrado, utilizando o *software* SimaPro versão 9.5.0.2.

1.5. Objetivos específicos

Nesta pesquisa, se estabeleceu objetivos específicos que direcionam a investigação sobre os efeitos ambientais dos principais resíduos gerados na construção civil. São eles:

- quantificar os materiais denominados resíduos (alumínio, aço, cerâmica, cimento e madeira) de maior volume, a partir de um projeto modelo de uma unidade residencial, que servirá de base para a avaliação dos mesmos;
- analisar um cenário de contraste para o projeto modelo da unidade residencial, substituindo por materiais construtivos que agregam características sustentáveis;
- submeter os dados ao software SimaPro e analisar o ciclo de vida dos principais resíduos da construção civil: alumínio, aço, cerâmica, cimento e

madeira, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), identificando qual o impacto que os mesmos causam no âmbito ambiental, quanto as emissões de CO₂, recursos e indicadores ambientais, desde sua obtenção até o descarte dos materiais lançados no meio ambiente, por metro quadrado;

- realizar avaliação custo x benefício para os dois cenários apresentados.

1.6. Estrutura do trabalho

Este estudo é estruturado em capítulos que seguem uma sequência lógica para abordar de forma abrangente a relação entre poluição ambiental por resíduos da construção civil, sustentabilidade e avaliação do ciclo de vida e seus impactos a longo prazo no meio em que vivemos.

O primeiro capítulo, que consiste na introdução, oferece uma visão geral do estudo, apresenta a justificativa, o problema de pesquisa, hipótese, e os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo, desenvolve-se a revisão bibliográfica mais abrangente da literatura sobre o desenvolvimento sustentável e sua influência no setor da construção civil, o consumo de energia e seus impactos, conceitos de avaliação do ciclo de vida (ACV) discorrendo sobre suas definições, aplicações, conceitos, histórico, metodologia, ferramentas e sua aplicação no setor da construção civil e seus impactos. Além disso, são apresentados o panorama dos resíduos de construção e demolição no Brasil, incluindo potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE).

O capítulo três descreve a metodologia utilizada para conduzir a pesquisa. A qual abrange a coleta de dados, análises quantitativas, mapeamento dos materiais a serem analisados, o escopo de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o funcionamento do *software* SimaPro, e outras abordagens utilizadas para atingir os objetivos.

O capítulo quatro, apresentam-se os resultados e discussões que encontrou-se com esta pesquisa, confirmando as hipóteses ou refutando as mesmas.

E, finalizando o trabalho, as conclusões, com as principais descobertas de forma resumida, e as contribuições do estudo para a Avaliação do Ciclo de Vida com o *software* SimaPro. Limitações e proposições de trabalhos futuros também são apresentadas.

Ainda nesta finalização, estão listadas todas as fontes e referências citadas no trabalho, de forma a apresentar de forma lógica e organizada as bases de dados utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, foram abordados os princípios e algumas considerações que definem o conceito de sustentabilidade, juntamente com uma breve contextualização histórica do desenvolvimento sustentável. Além disso, foi explorada a relação entre sustentabilidade e a indústria da construção civil, destacando suas características específicas, aplicações e ferramentas relevantes. Por fim, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi apresentada como uma ferramenta de gestão da sustentabilidade, preparando o terreno para uma análise mais detalhada posteriormente.

2.1. O desenvolvimento sustentável

A sociedade atual, com suas demandas por soluções que preservem o meio ambiente, e diminuam a exploração dos recursos naturais, tornam cada vez mais importantes os estudos de processos e metodologias que tragam ações imediatas. Desta forma, a sustentabilidade, se torna uma solução para diversas questões, sejam políticas, sociais ou culturais, permeando e se fazendo presente nas tomadas de decisões contemporâneas, minimizando ao máximo o impacto ambiental em suas esferas (COSTA, 2012).

Ecodesenvolvimento foi o primeiro termo conhecido para a sustentabilidade, nos anos de 1970, que foi fruto de esforços para encontrar um terceiro caminho para os que se opunham aos desenvolvimentistas e aos defensores do crescimento zero, ou zeristas, que acreditavam que os limites ambientais os levariam à catástrofes se o crescimento econômico não parasse (ROMEIRO, 2012).

E o termo “desenvolvimento sustentável” surgiu oficialmente em 1987, no relatório *Our common future* – Nosso Futuro Comum, da primeira ministra e médica norueguesa Gro Harlem Brundtland, na Comissão das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento. O documento que versa sobre o tema que ganhou o mundo traz o conceito de desenvolvimento sustentável, o qual é definido como o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras (SOBRINHO, 2008).

De acordo com Aires (2019), uma comunidade é sustentável quando consegue satisfazer suas necessidades e ainda consegue preservar as condições para as futuras gerações, ao mesmo tempo que uma sociedade não pode ter atividade que

possam interferir prejudicialmente os ciclos de renovação da natureza, muito menos destruindo estes recursos. Essas estratégias e dimensões da sustentabilidade devem ser adotadas através de todos os setores da sociedade, com o esforço conjunto e interligado.

2.2. A sustentabilidade no setor da construção civil

Dentre as indústrias que mais geram resíduos, a da construção civil se destaca e ainda tem a sua maior parte descartada inapropriadamente. Neste cenário, a certificação através de selos verdes ganham a vez, por serem mais sustentáveis e se destacarem na responsabilidade ambiental, possibilitando as empresas construtoras, executarem suas atividades de forma mais consciente, produzindo um menor impacto ambiental e com sustentabilidade. Neste cenário, os impactos gerados pela construção civil se relacionam ao consumo excessivo de recursos naturais e de energia, e ainda à geração de resíduos líquidos, sólidos e gasosos. (NASCIMENTO *et al.*, 2022).

O projeto é o caminho mais direto para a análise, e especificação dos materiais que irão compor a edificação, podendo ser considerado o elemento indutor da racionalização da construção (CARVALHO & SPOSTO, 2012). O canteiro de obras é o grande palco da construção civil, onde acontecem diversos serviços simultâneos, responsável por gerar grandes impactos ambientais e sociais, o seu acompanhamento e avaliação dos itens consumidos pode possibilitar que a empresa construtora identifique falhas no sistema operacional e possíveis reaproveitamentos e aperçoamento com maior eficiência durante a obra toda (MARQUES, 2017).

2.3. Impactos ambientais associados às edificações

De acordo com Araújo (2009), a sustentabilidade de um empreendimento deve estar presente em todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a concepção, projeto, construção, manutenção e sua posterior demolição, tendo em vista sempre as três esferas que contemplam os princípios da sustentabilidade, a econômica, social e ambiental. Cita ainda que dentro das possíveis ações para se desenvolver construções mais sustentáveis, é possível termos o consumo racional de água e energia, o uso de energias renováveis, a especificação de materiais baseadas em seu ciclo de vida, racionalização do consumo de recursos durante a etapa de construção

e a redução dos impactos no canteiro de obras.

E quando analisamos nos impactos das edificações causados ao meio ambiente, a etapa da construção tem um impacto significativo, e esta relacionado principalmente às perdas de materiais e à geração de resíduos, bem como a sua interferência no entorno imediato, vizinhos à obra, e nos meios físico, biótico e antrópico do local (ARAÚJO, 2009).

Outro fator de impacto relacionado às edificações são os GEE – Gases do Efeito Estufa, o qual ocupa grande parte das discussões nas agendas internacionais, tendo alta prioridade. A produção de tais gases aumentam a temperatura na biosfera gerando mudanças climáticas e por consequência diversos outros efeitos, como o aumento do nível dos mares por expansão térmica dos oceanos e degelos das camadas polares, aumento de incidência de tornados, furacões e chuvas torrenciais onde antes não predominavam.

2.4. Consumo de energia no Brasil e na construção civil brasileira

A OIE – Oferta Interna de Energia representa a demanda total de energia no país, e a mesma é disponibilizada para ser transformada e utilizada por refinarias, carvoarias, entre outros, posteriormente é distribuída e consumida em diversos processos na cadeia produtiva por todo o país, chegando através de gasodutos, linhas de transmissão, rodovias e ferrovias. Processos os quais também demandam de energia para serem cumpridos. A figura a seguir (Figura01) mostra a evolução da demanda de energia no Brasil a partir de 1970 (EPE, 2024).

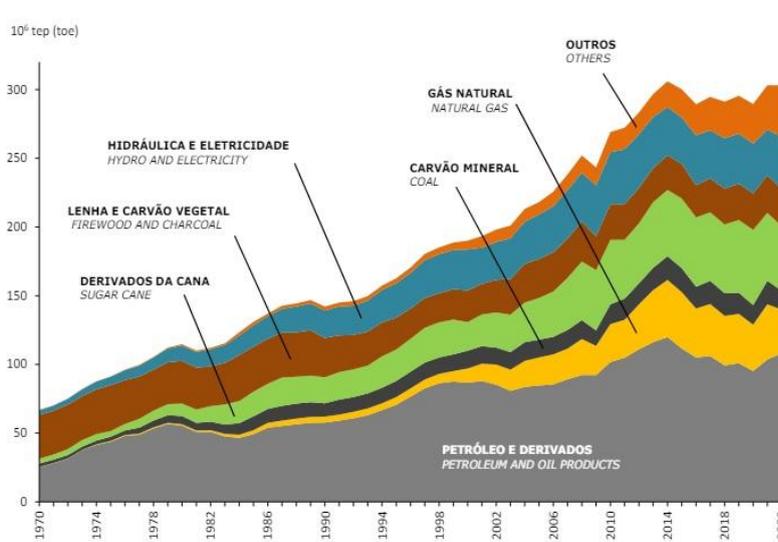


Figura 01: Oferta Interna de Energia.
Fonte: EPE, 2023.

Onde observa-se que a matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial, com mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar e outras renováveis, nossas fontes renováveis totalizam 47,4%, quase metade da matriz energética brasileira (MME, 2024).

A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas. A energia eólica também vem crescendo consideravelmente, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável (MME, 2024).

Considerando que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica participou com 64% da oferta interna de energia elétrica em 2023. As fontes renováveis representam 88% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. O consumo final foi de 586,1 TWh, representando uma expansão de 2,3% em comparação ao ano anterior, com destaque para os setores industrial e residencial, que participaram com 37% e 27% respectivamente (EPE, 2024).

A Figura 02 apresenta a produção de energia primária no Brasil para efetiva geração de energia no ano de 2023.

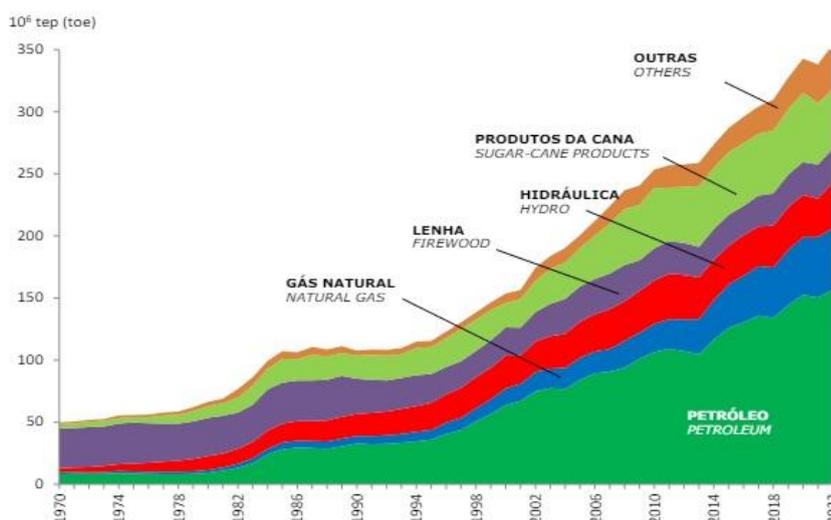


Figura 02: Produção de Energia Primária.
Fonte: EPE, 2023.

E produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação são considerados fontes de energia secundária, e tem como destinação abastecer os

setores de consumo e outros possíveis centros de transformação (TAVARES, 2006).

O gás natural vem se tornando uma fonte crescente e considerada mais limpa que o óleo e o carvão, contribuindo para a redução de GEEs. No Brasil, as reservas potenciais de gás natural associadas à produção de petróleo aumentaram significativamente após a descoberta de campos de petróleo do pré-sal e na costa Norte / Nordeste, abrindo possibilidades de se tornar um combustível importante na matriz energética brasileira, sendo uma fonte relativamente limpa, aumentando a segurança energética da matriz brasileira (GUTIERREZ, 2022).

Globalmente, as edificações consomem mais de um terço do consumo final de energia e respondem por aproximadamente um quinto das emissões totais de gases de efeito estufa (WBCSD, 2020 *apud* EPE, 2023). Na União Europeia, os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa (Comissão Europeia, 2019). Nos EUA, o consumo final de energia dos setores comercial e residencial representou 28% do consumo total de energia em 2019 (EPE, 2024).

Dados do Ministério de Minas e Energia (MME) apontam que o setor de edificações é responsável por quase 50% do consumo de energia elétrica no Brasil, sendo fundamental adotar medidas que promovam o uso racional de recursos energéticos (MME, 2024).

2.5. Ferramentas de avaliação ambiental no setor da construção civil

Diferentes métodos de avaliação ambiental têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Segundo o U.S. Green Building Council, o conceito de *green design* refere-se à práticas de projeto e construção que visam reduzir ou eliminar o impacto ambiental negativo das edificações e dos seus ocupantes no meio ambiente. E com o intuito de facilitar a integração entre sustentabilidade e tomadas de decisões para a viabilização de novos empreendimentos, a aplicação de metodologias e sistemas de avaliação de sustentabilidade vem de encontro com a Agenda 21, pois as avaliações permitem decisões mais conscientes dos impactos e das ações de mitigação, ou redução (CARVALHO, 2012).

Carvalho (2012), apresenta alguns dos principais sistemas de certificação ambiental de edifícios: BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) (BUILDING..., 2007), GBTool (Green Building Challenge)

(LARSSON, 2005), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (UNITED..., 2011), CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) (IWAMURA, 2005), HK-BEAM (Hong Kong Building Environmental Assessment Method) (LAM, 2008), HQE (NF Bâtiments Tertiaires: Démarche HQE® Bureau et Enseignement) (BUREAU/ENSEIGNEMENT, 2008), MARS (Building Sustainability Assessment Tool), Lidera (Sustainable Assessment System) (BRAGANÇA; MATHEUS, 2008) e SBAT (Sustainable Building Assessment Tool) (GIBBERD, 2008). No Brasil podem ser citados os trabalhos de Silva (2003) e Fossati (2008). No Brasil, tem sido utilizado também o AQUA (AQUA, 2007) (adaptado do HQE) e o LEED.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) teve suas origens na década de 1960 e, desde então, tem se disseminado por diversos países, sendo objeto de múltiplos estudos que contribuíram para o fortalecimento e consolidação da metodologia em escala global. As principais referências na área são provenientes dos Estados Unidos e da Europa, destacando-se pelo pioneirismo e pela qualidade das pesquisas desenvolvidas. No Brasil, a trajetória da ACV teve início na década de 1990, com a criação de um subcomitê da ABNT, o qual passou a integrar o Comitê Técnico TC 207 da ISO, responsável pela elaboração das normas da família ISO 14000 (CHEHEBE, 1997; SANTOS, 2006).

Neste cenário, a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que apresenta resultados satisfatórios, uma vez que os edifícios tem uma vida longa, podem sofrer alterações em sua vida útil, incorporam diversas funções, são produzidos localmente e integrados a infraestrutura, porém isso não a torna uma tarefa fácil, pelo contrário, se torna mais complexa do que fazê-la para outros produtos de consumo (EVANGELISTA, *et al.*, 2016).

Chehebe (1997), em seu livro *Análise do Ciclo de Vida de Produtos*, explica a importância do Ciclo de Vida dos produtos para as empresas, mostrando a visão que as pessoas que estão do lado de fora têm das organizações que investem em política ambiental, ampliando a visão de empresários de médio e grande porte sobre os benefícios de sua utilização como ferramenta estratégica de decisão gerencial e de seus pontos fracos, quando utilizada para declarações de superioridade ambiental.

Trabalhos realizados com estudos de ACV, demonstram como as análises podem trazer à luz colaborar na tomada de decisões, levando a uma redução do impacto ambiental de construções.

Attíe, D. & Salgado, F. A.(2021) utilizou a metodologia da Avaliação do Ciclo de

Vida para calcular os impactos de demanda de energia e a emissão de CO² da construção em uma escola. Onde, para calcular os resultados, adotou-se diversas premissas baseadas no cenário brasileiro, tornando possível verificar a existência de diversas maneiras de alcançar a redução em cerca de 20% nos impactos ambientais relacionados à demanda de energia quanto a emissão de CO₂, sendo possível ainda traçar a perspectiva de redução de impacto futuro de outras construções através da reciclagem de materiais.

2.6 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

O crescimento exponencial da preocupação com questões ambientais tem impulsionado as indústrias brasileiras e do mundo todo, a procurarem tecnologias mais limpas, e fatores como conscientização da sociedade, pressão do mercado por padrões mais adequados e legislações cada vez mais exigentes, tem tido grande importância neste contexto (BARBOSA JÚNIOR, *et al.*, 2008).

Seguindo os pilares da sustentabilidade, e a importância de proteger o meio ambiente e seus recursos naturais, bem como avaliar seus impactos ao meio e aos humanos, é que a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida se torna imprescindível, e traz à luz, dados e processos que podem ser revistos e melhorados a fim de reduzir impactos (LASSIO, 2013).

2.6.1. Definição

Segundo Menegatti *et al.* (2023), a Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta importante pois permite avaliar os potenciais impactos ambientais de um produto ao longo de seu ciclo de vida, com possibilidade de analisar desde a etapa de obtenção de matéria-prima, passando pelos processos de beneficiamento, até a sua destinação final após o final de sua vida útil. As normas internacionais ISO 14040:2006 (ISO, 2006), e a ISO 14044:2006 (ISO, 2006), apresentam os princípios e diretrizes de elaboração de estrutura e estudos de uma ACV.

Segundo a ABNT (2001), a Análise do Ciclo de Vida é conceituada como uma ferramenta de gerenciamento ambiental que visa avaliar aspectos ambientais e potenciais que estão associados ao ciclo de vida de um produto. E tem como objetivo principal avaliar seus impactos, o processo, serviço ou outra atividade econômica, podendo através desta verificação melhorar o desempenho ambiental, e a longo prazo, promover mudanças na tecnologia de produção de produtos, otimizando a

energia e os materiais utilizados no processo (CALDEIRA-PIRES, 2005).

2.6.2 Normalização

Organizações de todo o mundo passaram a ser cobradas, inclusive pelos seus clientes, por suas responsabilidades em impactos ambientais gerados por seus processos e produtos. Com esse impulso da BCSD, em agosto de 1991, a ISO e a IEC criaram o Grupo Estratégico Consultivo sobre o Ambiente (SAGE - *Strategic Advisory Group on the Environment*) para estudar a situação e fazer recomendações. SAGE foi convidado para auxiliar na padronização na área de gestão ambiental, a fim de assegurar uma uniformidade que contribuísse tanto para desempenho ambiental quanto para o comércio (SOUZA, 2010).

Em outubro de 1992, como consequência de todos esses acontecimentos, houve uma recomendação para que a ISO/IEC criasse o novo Comitê Técnico para desenvolver normas na área de gestão ambiental, o qual foi criado posteriormente em 1993, o chamado ISO/TC 207 – Gestão Ambiental (SOUZA, 2010).

De acordo com Valle (2010) o TC-207 foi estruturado em seis subcomitês técnicos, além de um comitê coordenador, para que fosse capaz de desenvolver este plano de normalização, ambicioso por sua abrangência e pelo curto prazo pelo que se pretendia implantá-lo. Estes eram: SC1 – Subcomitê de Gerenciamento Ambiental; • SC2 – Subcomitê de Auditoria Ambiental; • SC3 – Subcomitê de Rotulagem ambiental; • SC4 – Subcomitê de Avaliação de desempenho Ambiental; • SC5 – Subcomitê de Análise de Ciclo de Vida; • SC6 – Subcomitê de Termos e Definições.

Segundo Seiffert (2008) a primeira versão da ISO14001 foi publicada somente em 1996 e rapidamente se consolidou como uma norma de gestão ambiental com ampla aceitação mundial. Valle (2010) apresenta como uma das vantagens do conjunto de normas ISO 14000 a uniformização das rotinas e dos procedimentos necessários para uma organização certificar-se ambientalmente, cumprindo um mesmo roteiro-padrão de exigências válido internacionalmente.

O conjunto de normas desenvolvido pelo TC 207 vem se aprimorando cada vez mais, passando por constantes revisões. As normas da ISO têm tido importante papel para a divulgação da metodologia em pauta neste trabalho. As normas de gestão ambiental que estão em vigor atualmente, que dizem respeito à Análise de Ciclo de Vida, algumas delas produzidas inclusive por outros comitês técnicos que não o TC 207, são:

- ISO 14040 : 2006 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework* – TC 207/SC 5
- ISO 14044 : 2006 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines* - TC 207/SC 5 • ISO/IEC TR 15504-6 : 2008 *Information technology – Process assessment - Part 6: An exemplar system life cycle process assessment model* – JTC 1/SC 7
- ISO/TS 14048 : 2002 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Data documentation format* – TC 207/SC 5 • ISO/TR 14047 : 2003 *Environmental management -- Life cycle impact assessment -- Examples of application of ISO 14042* – TC 207/SC 5
- ISO/TR 14049 : 2000 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* - TC 207/SC 5 • ISO/IEC 90003 : 2004 *Software engineering -- Guidelines for the application of ISO 9001:2000 to computer software* – JTC 1/SC 7
- ISO 14121-1 : 2007 *Safety of machinery -- Risk assessment -- Part 1: Principles* – TC 199
- ISO/IEC TR 90005 : 2008 *Systems engineering -- Guidelines for the application of ISO 9001 to system life cycle processes* – JTC 1/SC 7
- ISO 15686 – 6 : 2004 *Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 6: Procedures for considering environmental impacts* – TC 59/SC14
- ISO 15392 : 2008 *Sustainability in building construction -- General principles* – TC 59/SC 17 14

Percebe-se assim a notoriedade que este assunto apresentou e o quanto pode contribuir para futuras pesquisas sobre Análise de Ciclo de Vida.

2.6.3 Metodologia de avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Para ser mais eficaz e dar maior credibilidade para a avaliação dos impactos ambientais de um produto, a metodologia de uma ACV deve ser rigorosamente descrita, e leva consigo todos os consumos e rejeitos do objeto de estudo. E tal estrutura segue a série de normas internacionais ISO 14040, como já mencionado anteriormente. Tal norma definiu quatro fases para o estudo de ACV, que se conectam conforme mostra a figura 03 (LASSIO, 2013).

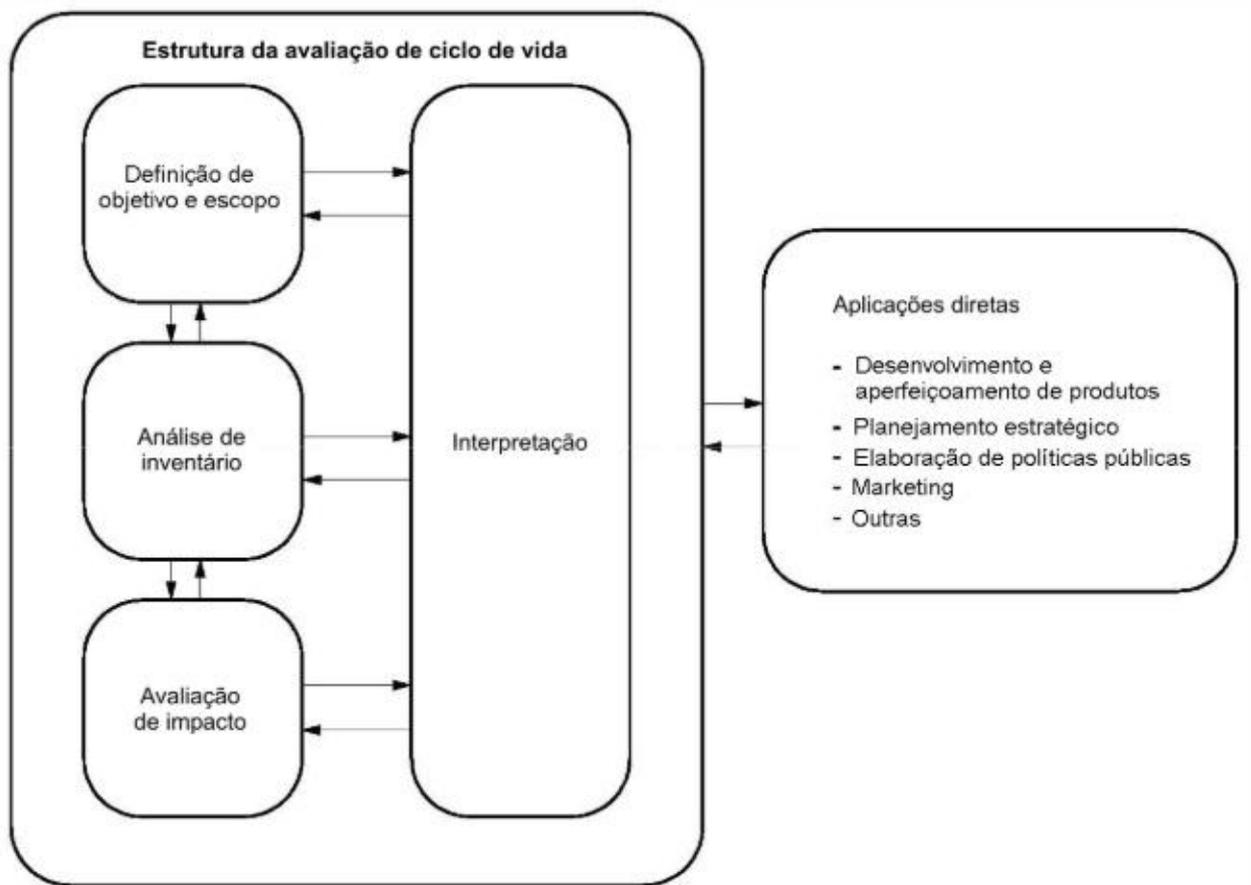


Figura 03: Fases de uma ACV.
Fonte: NBR ISO 14040, 2014.

Segundo Tavares (2006), os resultados da ACV podem servir de material para uma variedade de análises de processos decisórios. Já quanto a sua estrutura, a norma ISO 14040 estabelece que a estrutura básica de uma ACV compreende quatro fases como se segue:

- A. Objetivo e Escopo
- B. Análise do Inventário
- C. Avaliação de Impacto
- D. Interpretação

Estas etapas se relacionam de formas diferentes entre si e a fatores variados, que vão além das limitações naturais de tempo e dinheiro, como descritas a seguir:

A - Definição do Objetivo e Escopo

A definição do objetivo e escopo é uma fase crucial na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e, embora a ISO 14001 seja uma norma para Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) e não especificamente para ACV, ela fornece um quadro de referência para práticas ambientais sistemáticas. A ISO 14044, que é parte da "família" ISO 14040,

trata especificamente da ACV e detalha a definição do objetivo e escopo (TAVARES, 2006).

Objetivo pode ser dividido em duas etapas: Declaração da finalidade e Público alvo, listadas a seguir.

Declaração da Finalidade: O objetivo de uma ACV deve declarar claramente a finalidade do estudo, o uso pretendido dos resultados, e os limites dentro dos quais os resultados são válidos. Isso pode incluir a comparação de produtos, a melhoria de processos, ou a criação de inventários de emissões.

Público-Alvo: Identificar quem vai utilizar os resultados e de que maneira. Pode incluir formuladores de políticas, cientistas, e outros tomadores de decisão. E o escopo tem várias etapas, como apresentadas a seguir.

Produto ou Processo em Estudo: Descrição detalhada do produto, processo ou atividade a ser estudado.

Unidade Funcional: Definição da unidade funcional (por exemplo, um quilograma de produto, uma hora de serviço) que permitirá comparar diferentes sistemas de maneira consistente.

Fronteiras do Sistema: Delimitação dos processos a serem incluídos na ACV (da extração de matérias-primas ao descarte final).

Crítérios de Inclusão e Exclusão: Estabelecer quais processos ou fluxos de materiais e energia serão incluídos ou excluídos e justificar essas escolhas.

Métodos de Avaliação de Impacto: Identificar quais métodos e categorias de impacto serão utilizados (por exemplo, mudanças climáticas, acidificação).

Suposições e Limitações: Descrição de quaisquer suposições ou limitações que afetam a interpretação dos resultados.

Requisitos de Qualidade de Dados: Especificação das fontes de dados, métodos de coleta, e qualidade necessária dos dados.

Alocação de Cargas Ambientais: Critérios para alocar cargas ambientais em sistemas multifuncionais.

B - Análise do Inventário de Ciclo de Vida

Nesta etapa, tem-se a quantificação do uso de recursos primários e secundários e as respectivas emissões geradas ao longo de todo o ciclo de vida, definido na etapa anterior.

C - Avaliação de Impacto Ambiental

São desenvolvidos critérios de valoração para riscos e impactos ambientais associados aos fluxos detectados na análise de inventário. Busca-se traçar um perfil de atuação do processo estudado, segundo categorias quantitativas ou qualitativas que seriam normalmente difíceis de mensurar.

D - Interpretação de Resultados

A análise nesse nível busca responder às questões colocadas no escopo. A identificação dos pontos significativos do sistema estudado, aponta para as oportunidades de redução de emissões de resíduos e consumo de recursos naturais. Além das possibilidades de melhora do desempenho ambiental nos pontos mais fracos, ficam as sugestões para futuros estudos que possam ter esta proposta.

2.6.4 Avaliação do Ciclo de Vida na construção Civil

Segundo a *Energy Conservation in Buildings and Community Systems*, o método da ACV pode ser diretamente aplicado no setor de construção, porém as edificações são sistemas complexos e possuem muitas características que tornam a aplicação padrão da metodologia de ACV mais difícil. Os motivos pelos quais o setor se torna de difícil avaliação pode estar relacionado a expectativa de vida útil do edifício, impactos locais relacionados ao entorno da obra, materiais de construção heterogêneos, fases específicas para análise do ciclo de vida, edificações multifuncionais, e conforto da edificação e de quem a habita, são algumas das dificuldades (LASSIO, 2013).

Teodoro (2017), apresenta o ciclo de vida das edificações, e é geralmente dividido em três grandes fases, cada uma com suas próprias subdivisões, onde ocorrem diversos processos, conforme a figura a seguir (Figura 04).

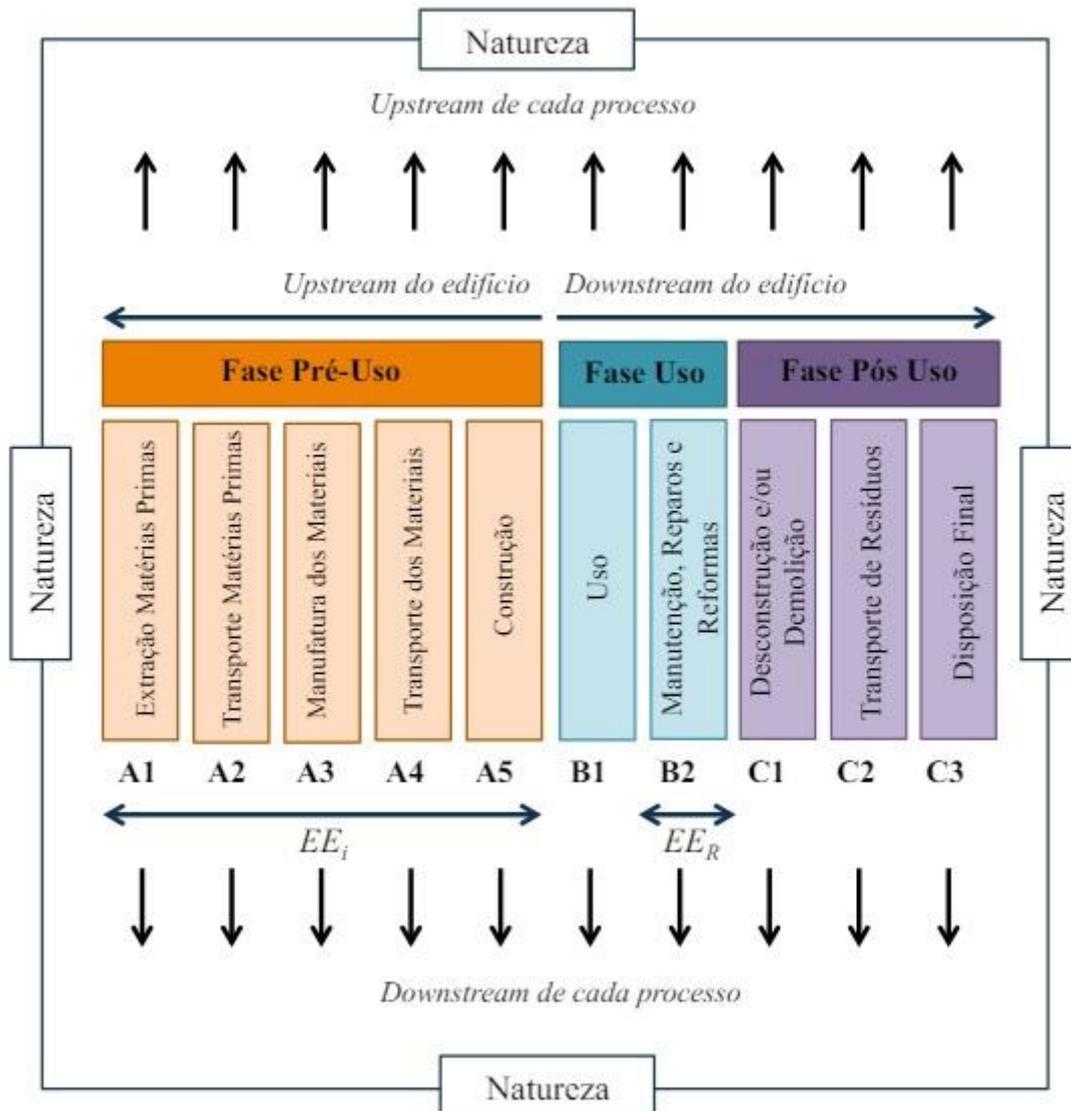


Figura 04: Ciclo de Vida das Edificações.
Fonte: Teodoro, 2017.

O ciclo de vida de uma edificação pode ser considerado um processo contínuo, com as fases interligadas e interdependentes, sua gestão é fundamental para garantir a qualidade, a eficiência e a sustentabilidade do processo (TEODORO, 2017).

2.6.5 Ferramentas utilizadas na ACV – softwares e bases de dados

Além da metodologia orientada pelas normas da série ISO 14000, a elaboração da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é apoiada por outros *softwares* e bases de dados, conforme demonstrado por Ingwersen *et al.* (2015), o GaBi, OpenLCA e SimaPro são alguns dos softwares atualmente utilizados.

O processo de realização de uma ACV pode ser afetado por um grande número de dados incertos e um extenso período de coleta desses dados, além de problemas

de incompatibilidade e variabilidade sensível, conferindo uma complexidade considerável ao processo (Keeler & Burke, 2010). Portanto, a utilização de *softwares* é justificada, pois orienta e padroniza a metodologia e as bases de dados. As principais conclusões desse tipo de estudo são comparativas e qualitativas, obtidas a partir de resultados quantitativos.

O *software* SimaPro, desenvolvido pela *Pré Sustainability*, permite a modelagem de produtos e sistemas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. Essas ferramentas são essenciais para calcular a pegada de carbono, realizar o design de produtos ecológicos, criar declarações ambientais de produtos, avaliar o impacto ambiental de produtos ou serviços, gerar relatórios ambientais e determinar indicadores de desempenho (ACV BRASIL, 2024).

É importante esclarecer que, devido às especificidades dos objetivos de cada ACV, seus resultados podem ser apresentados de diferentes maneiras. Os softwares utilizados permitem obter resultados por meio de gráficos, dados quantitativos e diversas categorias de impacto. Além disso, a ACV é uma análise altamente suscetível às interpretações do analista responsável. Dessa forma, a metodologia baseia-se em dados quantitativos para gerar uma análise crítica qualitativa. Ingwersen *et al.* (2015) discutem a ACV sob a perspectiva da tecnologia da informação, incluindo conceitos de ontologia e interoperabilidade de dados, onde a falta atual de interoperabilidade entre conjuntos e bases de dados é o principal fator que limita a ampliação do uso da metodologia.

2.6.6 Ciclo de vida energético das edificações

A Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE) na indústria da construção civil apresenta características específicas devido a sua grande complexidade de processos, materiais e matérias-primas. E para tanto, diversos estudos sobre o tema sugerem uma divisão básica, apresentadas na Figura 05, resumindo as etapas mais comuns à todas edificações, e suas terminologias relacionadas à consumos energéticos para suas etapas ao longo do seu ciclo de vida (TAVARES, 2006).

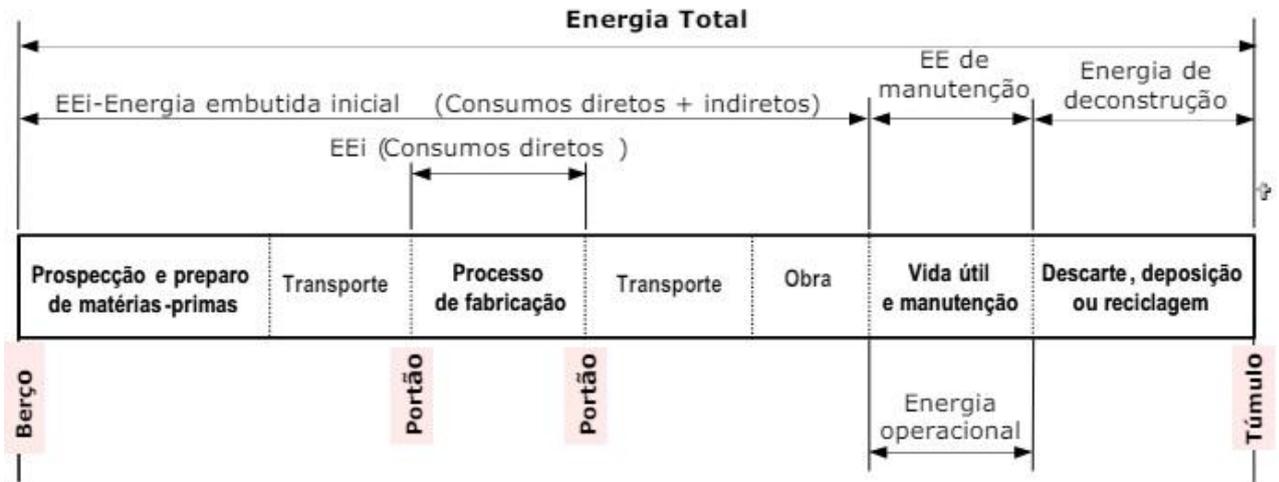


Figura 05: Ciclo de vida energético de uma edificação.
 Fonte: Tavares, 2006.

O termo "Energia Total no ciclo de vida energético", conforme definido na norma ISO 14040 (ISO, 2006), refere-se a todos os requisitos energéticos desde a fase de produção até o descarte final de um produto ou serviço, do “berço ao túmulo”. Já o termo "Energia Embutida Inicial" refere-se à energia total utilizada na fabricação de uma edificação, incluindo os insumos energéticos diretos e indiretos (ISO 14040, 2006).

Além disso, a ISO 14040:2006 foi adotada para estabelecer os princípios e a estrutura da avaliação do ciclo de vida. A Figura 06 mostra o limite do sistema para a avaliação das emissões de carbono.

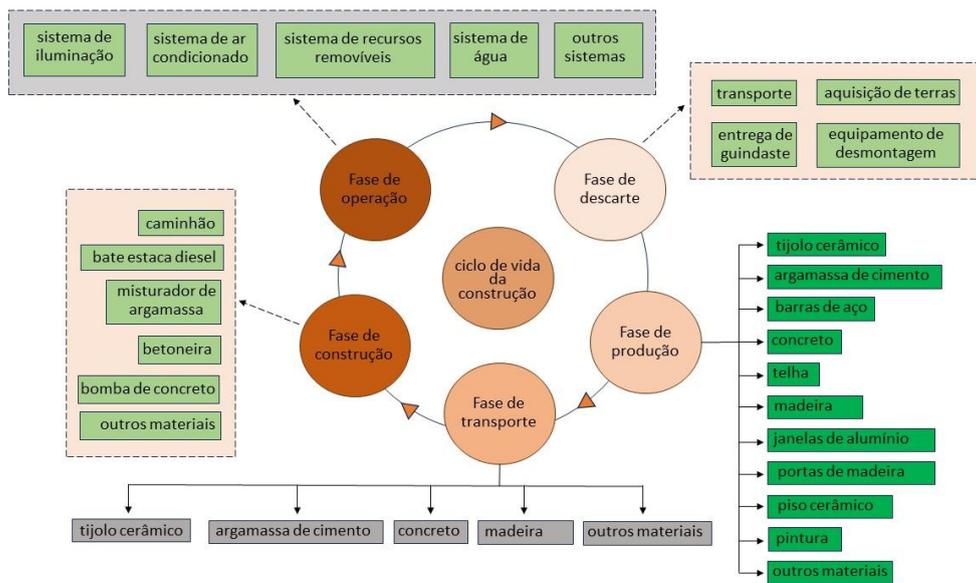


Figura 06: Limite do sistema de avaliação de emissões de carbono.
 Fonte: Liu *et al*, 2023, traduzido pela autora

Durante o processo de construção, a emissão de carbono nesta fase é gerada pelo consumo de energia dos equipamentos, e na fase de operação, a duração das demandas energéticas para aquecimento.

2.6.7 Energia Embutida em edificações

Especificar materiais de construção tem um papel importante no estudo de sustentabilidade, pois seus processos de fabricação podem apresentar uma contribuição significativa nas emissões de GEE. A Energia Embutida (EE) descreve a somatória dos processos energéticos de um produto/serviço, sendo definida como o total de insumos energéticos, diretos e indiretos, necessários para a obtenção e distribuição de um produtos em todas suas fases do ciclo de vida (TAVARES, 2006).

Segundo Tavares (2006), a primeira, análise de processo, baseia-se na análise detalhada de todas as etapas de um processo de fabricação, discriminando os eventos de consumos energéticos diretos e indiretos em cada etapa, sendo a abordagem estatística a forma mais rápida de prever o requisitos energéticos, utilizando dados de fábricas, indústria e órgãos do governo. A análise por matrizes insumo-produto é baseada em interações financeiras entre os setores da economia, o que é de grande importância pois permite visualizar fluxos de energia entre os setores produtores e consumidores. A análise híbrida combina vantagens dos métodos disponíveis com o objetivo de reduzir as incertezas associadas à análise de energia embutida, que quando aplicada a análise de Energia Embutida em materiais de construção é imprescindível para entender o impacto energético ao longo do seu ciclo de vida. E ao determinar os valores de Energia Embutida, utilizando as unidades MJ/kg, MJ/m³ ou MJ/m², permite avaliar e comparar diferentes materiais e componentes, o que auxilia na definição e escolha de projetos mais sustentáveis e eficientes energeticamente.

2.6.8 Resíduos sólidos da construção civil

Resíduos da construção civil, comumente chamados de entulhos, são definidos pela Resolução CONAMA 307/2002 como aqueles gerados em atividades de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resíduos provenientes da preparação e escavação de terrenos. Exemplos de resíduos que encontram-se nessa categorias são: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, azulejos, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação

elétrica etc.

Ainda segundo a Resolução CONAMA 307/2002, os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

E os mesmos não poderão ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei (CONAMA, 2002).

2.6.9 Software SimaPro versão 9.5.0.2

SimaPro é uma ferramenta auxiliar na aplicação do Ciclo de Vida, com aplicação efetiva em sustentabilidade, possibilitando tomadas de decisões mais assertivas, mudança de ciclos de vida de produtos e aumentando o impacto positivo no meio empresarial, e está entre os principais *softwares* de ACV – com a confiança de empresas, consultorias e universidades em mais de 80 países (ACV Brasil, 2024).

Trabalha com fatos para trazer *insights* de sustentabilidade por meio de avaliação do ciclo de vida (ACV), tornando mensurável os esforços de sustentabilidade, sendo fonte de informação baseada na ciência, servindo para medir, analisar e comparar o desempenho ambiental de produtos e serviços. Pode gerar relatórios de

sustentabilidade, pegadas de carbono, ambientais, sociais e hídricas, avaliações de biodiversidade, design de produtos sustentáveis entre outros. Com bancos de dados como o Agribalyse, WEEE, EXIOBASE, a versão 9.5.0.2 a ser utilizada neste estudo conta com mais de vinte métodos de 20 métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e mais de 9 bibliotecas de inventários, que trazem informações acerca de dezenas de milhares de processos e produtos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a apresentação de material e métodos foi estabelecida a relação entre a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e o setor da construção civil, abrangendo pesquisas qualitativas e quantitativas na avaliação dos impactos ambientais dos materiais de construção. E uma edificação real foi selecionada para a aplicação da metodologia.

O estudo foi dividido em duas partes, sendo a primeira uma revisão da literatura para fundamentar o referencial teórico sobre a ACV, utilizando artigos, teses, revistas, livros de estudos e debates recentes.

A segunda parte do estudo consistiu na prática da metodologia de ACV. Onde, foram levantadas as quantidades e características básicas dos principais insumos necessários à edificação residencial unifamiliar, objeto do estudo, como aço, cerâmica, cimento e madeira, com base no projeto da construção e recomendações técnicas seguindo as tabelas da TCPO – Tabela de Composição e Preços para Orçamentos (2012). Em seguida, a ACV foi modelada no *software SimaPro* versão 9.5.0.2, com licença adquirida pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, conforme as exigências normativas, e os resultados obtidos serviram para interpretação, análises e sugestões de futuros trabalhos.

3.1. Definição dos objetivos e do escopo

Na fase inicial de uma Avaliação do Ciclo de Vida, são definidos, principalmente, os objetivos do estudo, os limites do sistema analisado e a base de dados a ser utilizada, conforme estabelecido pela norma ISO 14040 (2006). Além disso, o objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente especificados e alinhados com a sua aplicação (ISO 14044, 2009).

Assim, dividiu-se nas seguintes fases: 1) objetivo da análise; 2) domínio da aplicação; 3) fronteiras do sistema; 4) base de dados.

3.1.1 Objetivo da análise

Tem como objetivo quantificar os fluxos de materiais e de energia para as fronteiras do sistema da edificação, e após mensurar os dados a fim de se obter os impactos sobre o meio ambiente.

Para a análise do ciclo de vida, é necessário definir a unidade funcional, a qual

descreve um produto ou um serviço a ser avaliado. E descrevê-lo com clareza é fundamental pois assegura uma comparação mais acertiva e significativa no desempenho de diferentes produtos durante sua avaliação. Neste estudo adotar-se-á “um metro quadrado” para a comparação do mesmo layout arquitetônico da residência utilizando materiais de construção diferentes para a mesma função.

3.1.2 Domínio de aplicação

Conforme a norma ISO 14040 (2006), a Avaliação do Ciclo de Vida representa o ciclo de vida de um produto como um sistema composto por produtos que desempenham uma ou mais funções específicas.

O estudo se concentrará nos materiais residuais da construção civil: alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira.

3.1.3 Fronteiras do ciclo de vida

A fronteira do sistema determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV, indo de encontro ao objetivo do estudo. Para a definição de limite do sistema, o qual abrange processos e atividades, direta ou indiretamente relacionados à edificação, o escopo inclui obtenção de matérias-primas, projeto e fabricação, operação, demolição e destinação de resíduos.

Segundo Liu *et al* (2023), todo o ciclo de vida de um edifício compreende cinco fases, conhecidas como "do berço ao túmulo": fase de produção, fase de transporte, fase de construção, fase de operação e fase de descarte, ou ainda, pode ser considerado "do berço ao portão" e "do portão ao túmulo". O limite do sistema neste estudo segue essa última classificação: "do berço ao túmulo", ou seja, da produção/transporte/construção/operação/descarte, passando pela sua vida útil e manutenção, até o seu descarte, deposição ou reciclagem. Além disso, a ISO 14040:2006 foi adotada para estabelecer os princípios e a estrutura da avaliação do ciclo de vida. A Figura 07 mostra a fronteira do sistema, a qual especifica quais etapas do ciclo de vida que será realizada a análise, desde a aquisição da matéria-prima até a sua eliminação/destinação final.

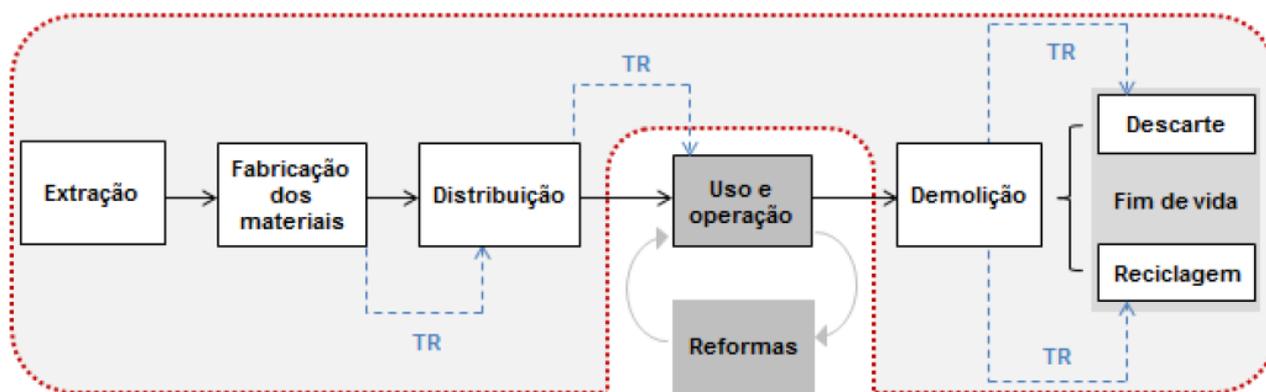


Figura 07: Fronteira do sistema.
Fonte: Lasso, 2013

Desta forma, a fronteira estabelecida para o sistema em estudo foi delimitada a partir da extração de matérias-primas, seguindo para a fabricação, distribuição e destinação/eliminação final.

Segundo NBR 15.575 (ABNT 2013), a Vida Útil de Projeto (VUP) é definida como um período estimado de tempo para o qual o sistema é projetado, a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidas na norma, cabendo ao proprietário e/ou incorporador a definição da VUP de cada elemento. Sendo assim, a refrigeração e iluminação foi estabelecida em 50 anos, não sendo incluídas as emissões de outros eletrodomésticos nesta avaliação.

A substituição de componentes estruturais pode ser ignorada na fase de operação. Na fase de descarte, a emissão de carbono provém principalmente do consumo de energia dos equipamentos. Os componentes estruturais após o desmantelamento devem ser transportados para um local a 50 km de distância de Cascavel, Paraná. O transporte rodoviário foi o considerado neste estudo.

3.1.4 Base de dados

Para a viabilização da avaliação do Ciclo de Vida foi utilizada a base de dados da *Ecoinvent*, disponível nas bases de dados disponíveis no *software* SimaPro, considerado líder mundial no fornecimento de inventário do ciclo de vida.

De acordo com a norma ISO 14040 (2006), os requisitos de qualidade dos dados estabelecem, de forma geral, as características necessárias para garantir a confiabilidade do estudo. As descrições da qualidade dos dados são fundamentais para avaliar a confiança nos resultados obtidos e interpretá-los adequadamente. A qualidade

dos dados é avaliada, essencialmente, com base em três critérios principais: aspectos temporais, geográficos (domínio espaço-temporal) e as tecnologias empregadas nos processos ao longo do ciclo de vida.

Nesse contexto, destaca-se que as bases de dados utilizadas são majoritariamente estrangeiras, refletindo a realidade europeia. Além disso, a construção civil no Brasil ainda é predominantemente artesanal, contrastando com os métodos mais industrializados adotados nos países de origem dessas bases. Por essa razão, buscou-se adaptar, sempre que possível, os processos dos inventários modelados — como os deslocamentos envolvidos e o tipo de energia utilizada, que em alguns casos é de origem nuclear. Tais adaptações, aliadas à confiabilidade das informações disponíveis, justificam o uso dessas bases de dados, mesmo que referenciadas em um contexto geográfico distinto.

Desta maneira, faz-se necessária a correspondência adequada entre os materiais selecionados para o estudo e aqueles disponíveis na base de dados, com o objetivo de preservar a integridade dos resultados quantitativos relativos aos impactos gerados. Assim, os materiais e seus respectivos processos foram adaptados aos cenários previamente definidos, conforme podem ser verificados na Tabela 01.

MATERIAL	CORRESPONDÊNCIA
Tijolo cerâmico	Clay brick
Alumínio	Aluminium alloy, ALi
Aço	Steel, low alloyed
Cimento	Cement, Portland
Telha cerâmica	Ceramic tile
Madeira	Sawnwood, lath, hardwood, dried (u=10%)

Tabela 01: Especificações dos materiais adotados.
Fonte: autora, 2025

3.2. Construção de alvo e construção de constraste

A residência recém projetada localiza-se em um condomínio na cidade de Cascavel/Paraná, Brasil, e a área total da residência de dois pavimentos é de 205,71m². É composta por um pavimento térreo e um pavimento superior, Para a sua concepção adotou-se o método tradicional de construção, com estrutura em concreto armado e vedação em tijolo cerâmico e cobertura de telha cerâmica. A Figura 08 mostra a representação arquitetônica da implantação da unidade residencial.

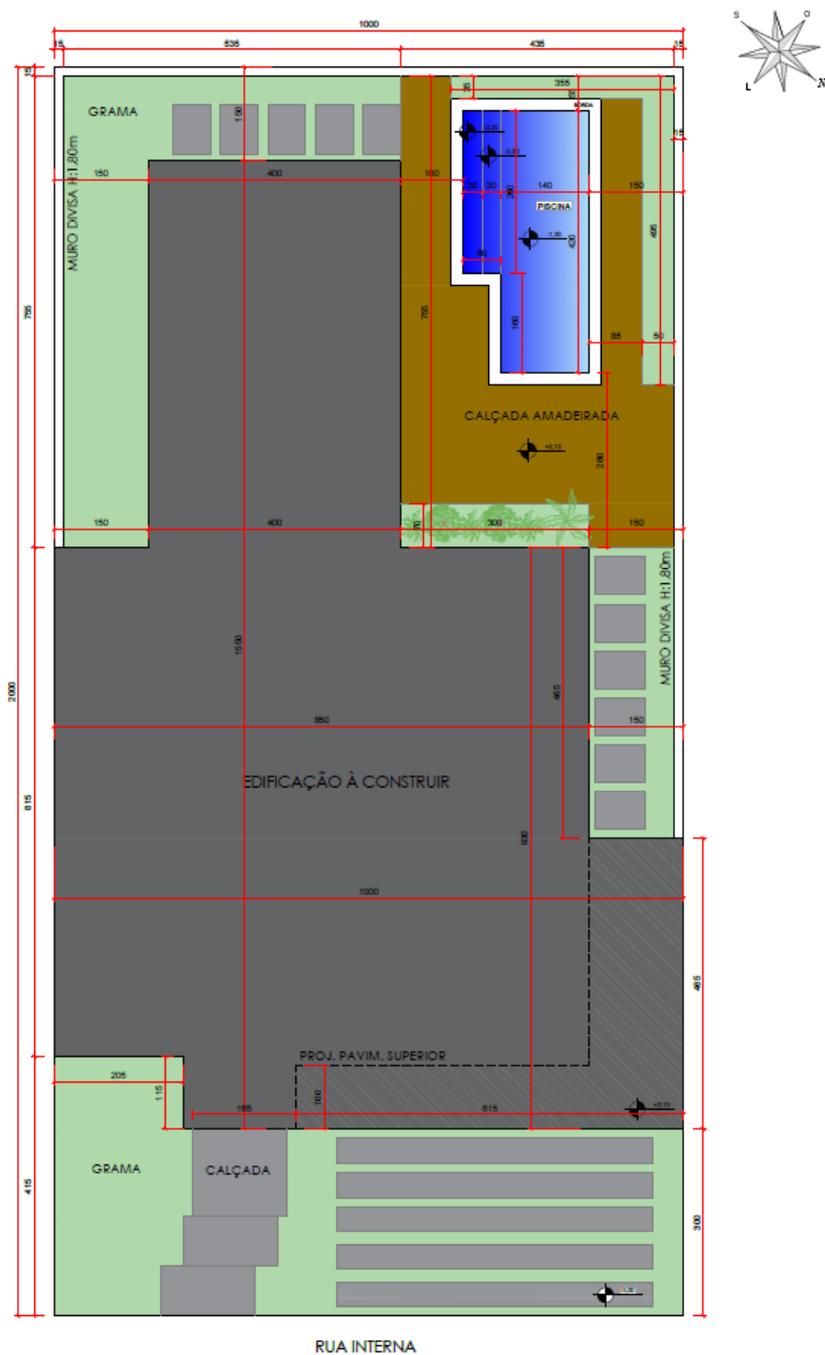


Figura 08: Planta de Implantação.
Fonte: autora, 2023.

O terreno situa-se dentro de um condomínio fechado com 200,00m² (10x20m), e a área de construção de 189,44m², gerando uma taxa de ocupação de 54,23%, coeficiente de aproveitamento de 0,94 e taxa de permeabilidade de 30,47%. Em sua fachada tem-se a aplicação de pintura (Figura 09).



Figura 09: Perspectiva da fachada frontal.
Fonte: autora, 2023.

A unidade residencial possui no pavimento térreo: garagem para 02 carros, sala de estar/tv, escada, quarto/escritório, bwc, cozinha gourmet, despensa, lavanderia, piscina (Figura 10).

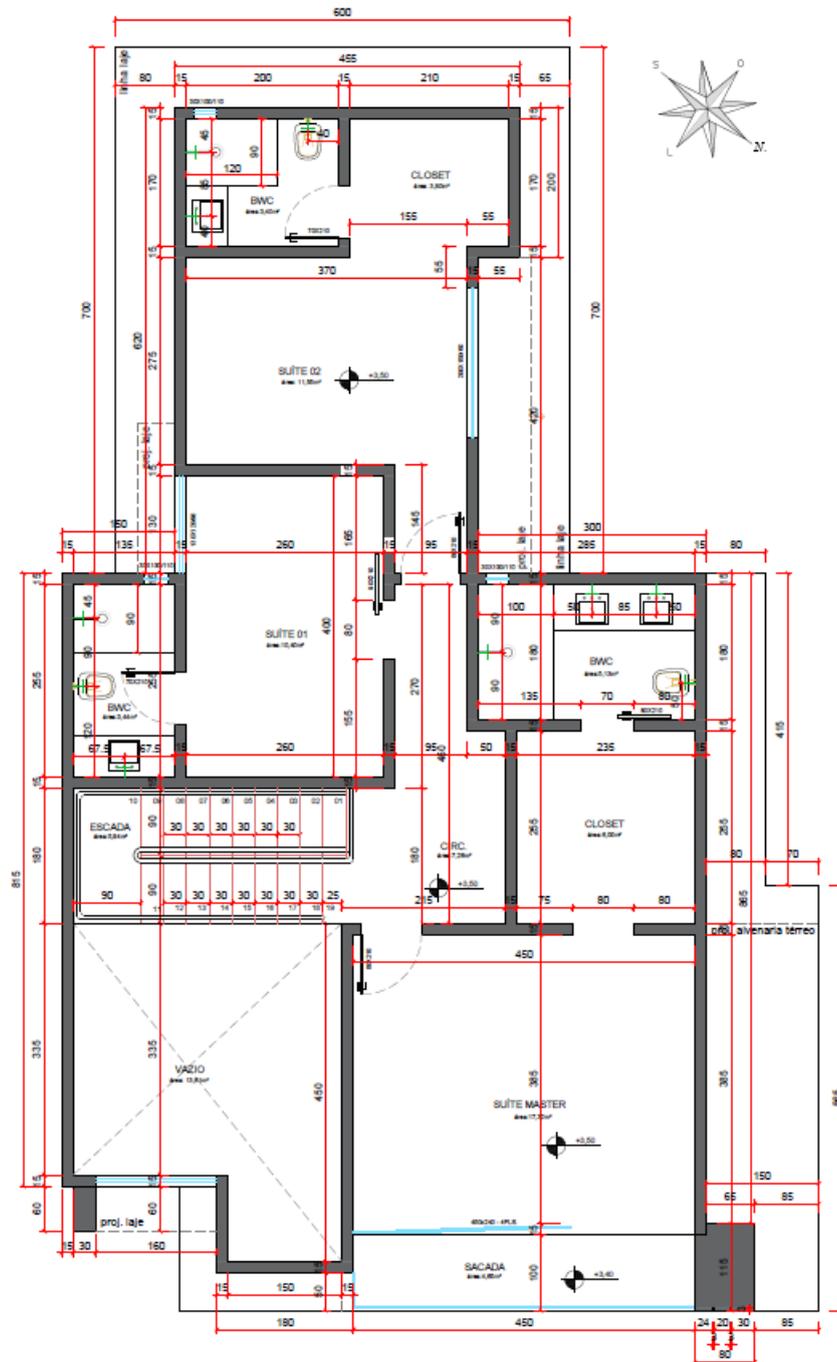


Figura 11: Planta Baixa – Pav.superior.
Fonte: autora, 2023.

Atendendo às características estéticas e funcionais do projeto, o telhado se apresenta envolto por platibanda, e é composto por telhas cerâmicas com inclinação de 30% (Figura 12).

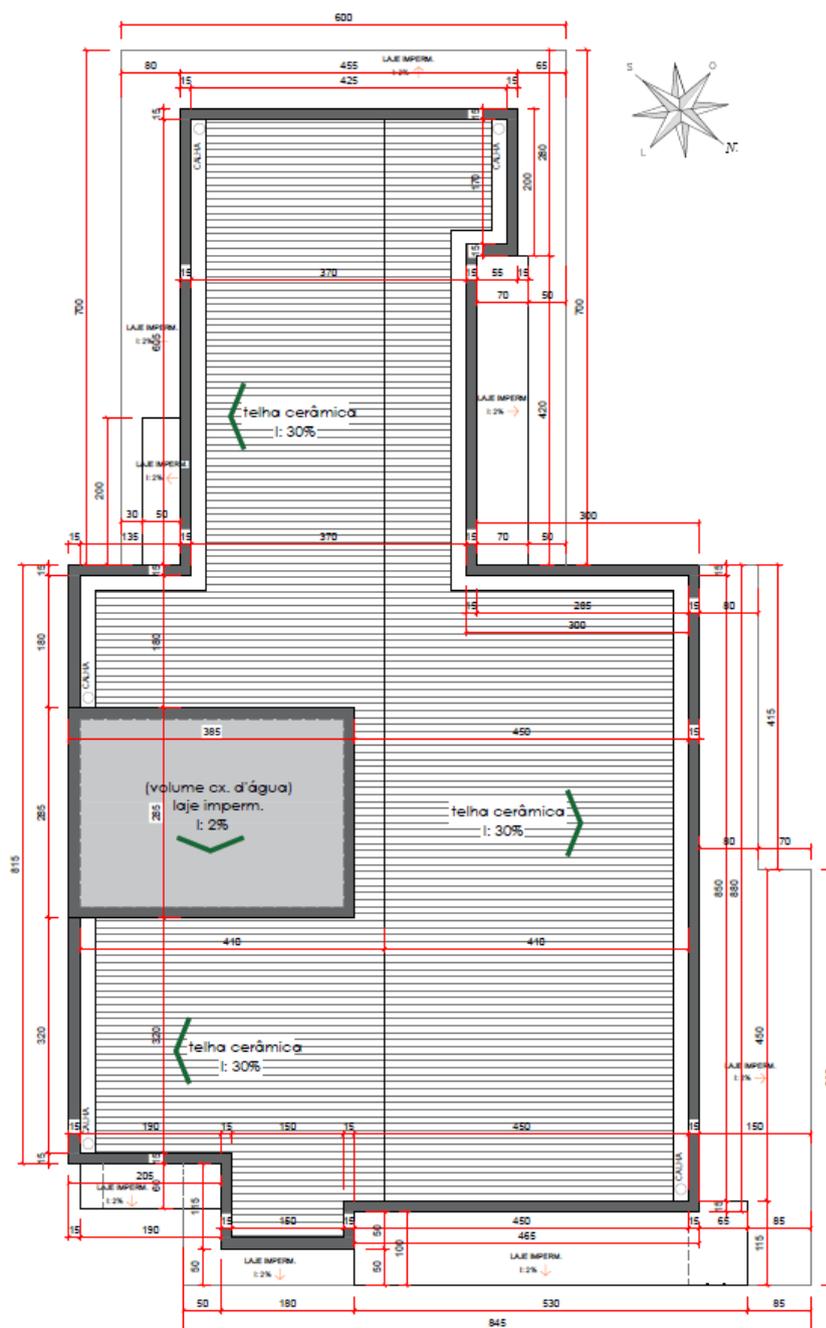


Figura 12: Planta de Cobertura.
Fonte: autora, 2023.

Buscando a sustentabilidade e visando a redução de resíduos gerados na obra, os materiais a serem utilizados foram selecionados a partir de parâmetros sustentáveis, à exemplo: escoras de madeira com reaproveitamento em outras obras, tintas e desmoldantes com embalagem plásticas e não metálica, portas de madeira com laminação de PVC que já vem com pintura de fábrica evitando assim a pintura das mesmas em obra e aumento da produção de resíduos das tintas. Janelas e portas externas em alumínio, as quais também já vem na medida desejada e com a pintura de

fábrica.

Tais itens diminuem consideravelmente os resíduos gerados na obra, e uma vez que a cidade de Cascavel/Pr tem como premissa para a aprovação dos projetos junto à Prefeitura Municipal da cidade, o Plano de Gerenciamento da Construção Civil - PGRCC, onde todo profissional deve buscar a diminuição ou não produção de resíduos, e quando gerados, deve identificar a destinação correta por meio de notas e manifestos junto à Secretaria de Meio Ambiente da cidade de Cascavel/Pr.

Utilizando este projeto como construção alvo, foram calculados todos os quantitativos de materiais a serem utilizados na construção civil. Para tal etapa foram consideradas as tabelas apresentadas no livro da TCPO (2012), o qual apresenta a base de dados PINI para orçamentos e com informações e critérios de maior credibilidade na indústria da construção civil nacional, com tabelas de composições de preços para orçamentos.

Após esta etapa, se desenvolverá o mapeamento dos materiais envolvidos que mais representam os resíduos gerados em obras civis: alumínio, aço, cerâmica, cimento e madeira, com posterior inserção e análise no *software* SimaPro.

A construção de contraste, ou situação de contraste empregada neste estudo, será um cenário mais sustentável para a mesma residência, com a substituição de materiais construtivos que agregam características do conforto térmico e acústico na edificação.

3.3 Avaliação das emissões de carbono do ciclo de vida

No método de avaliação de pegada de carbono, utiliza-se a avaliação do ciclo de vida e o coeficiente de emissão de carbono de um produto ou serviço é mensurado para determinar a emissão durante toda sua vida útil. Esta avaliação é realizada em cada fase do produto, incluindo aquisição, produção, transporte, operação e descarte de matéria-prima, ou pode-se ainda obter a emissão total de carbono (LIU, *et al*, 2023).

Nesta pesquisa, a avaliação do ciclo de vida da edificação alvo foi realizada principalmente com base nas emissões de carbono. A Tabela 02 (LIU, *et al*, 2023), lista as equações específicas de emissão de carbono em diferentes fases.

FASE	EQUAÇÃO	ANOTAÇÃO
produção	$E1 = E_{kc} + E_{sc} + E_{ys}$	E_{kc} é a emissão de carbono da matéria-prima na mineração. E_{sc} é a emissão de carbono da produção de materiais de construção. E_{ys} é a emissão de carbono do transporte de matérias-primas.
transporte	$E2 = \sum m_i \cdot d_i \cdot Q_i$	m_i é a massa do i-ésimo material, d_i é a distância de transporte do i-ésimo materiais, Q_i é o fator de emissão de carbono de transporte do i-ésimo material.
construção	$E3 = E_{rt} + \sum q_i \cdot Q_{ij}$	E_r é a emissão de carbono dos trabalhadores em um dia, t é o tempo de construção, q_i é o consumo de energia da i-ésima máquina, Q_{ij} é o fator de emissão de carbono do i-ésimo consumo de energia.
operação	$E4 = E_n + E_w$	E_n é o consumo de energia na fase de operação, E_w é a emissão de carbono da manutenção durante a fase de operação.
disposição final	$E5 = E_t + E_r + E_q$	E_t é a emissão de carbono do transporte de resíduos, E_r é a emissão de carbono dos trabalhadores, E_q é a emissão de carbono de máquinas.

Tabela 02: Equações específicas para emissão de carbono em diferentes fases.
 Fonte: Liu *et al*, 2023, traduzido pela autora.

3.4 Inventário do ciclo de vida

O inventário é a base da ACV. Nesta etapa são identificadas e quantificadas todas as entradas e saídas do sistema relacionadas às categorias de impactos referentes ao estudo. São quantificados os materiais utilizados nos processos, a energia e as emissões geradas para o meio ambiente. Os balanços de massas e de energia são realizados para toda a cadeia produtiva que engloba: extração, processamento de matéria-prima, manufatura, transporte e distribuição, uso/reuso/manutenção, reciclagem e descarte final. Conforme Choi (1994), o ICV é o total cumulativo das entradas e saídas de um sistema para cada fase de um produto. O consumo de recurso tem sido escolhido para investigação por duas razões principais: auxiliar no alcance do objetivo global de redução de aquisição de material, considerar os inter-relacionamentos entre o consumo de material e energia, bem como emissão de resíduos gerados para a produção dos produtos.

Na Figura 13 observa-se o fluxograma do Ciclo de Vida, o qual apresenta os fluxos nas etapas do ciclo de vida, referindo-se às entradas e saídas de materiais, energia e

emissões em cada fase.

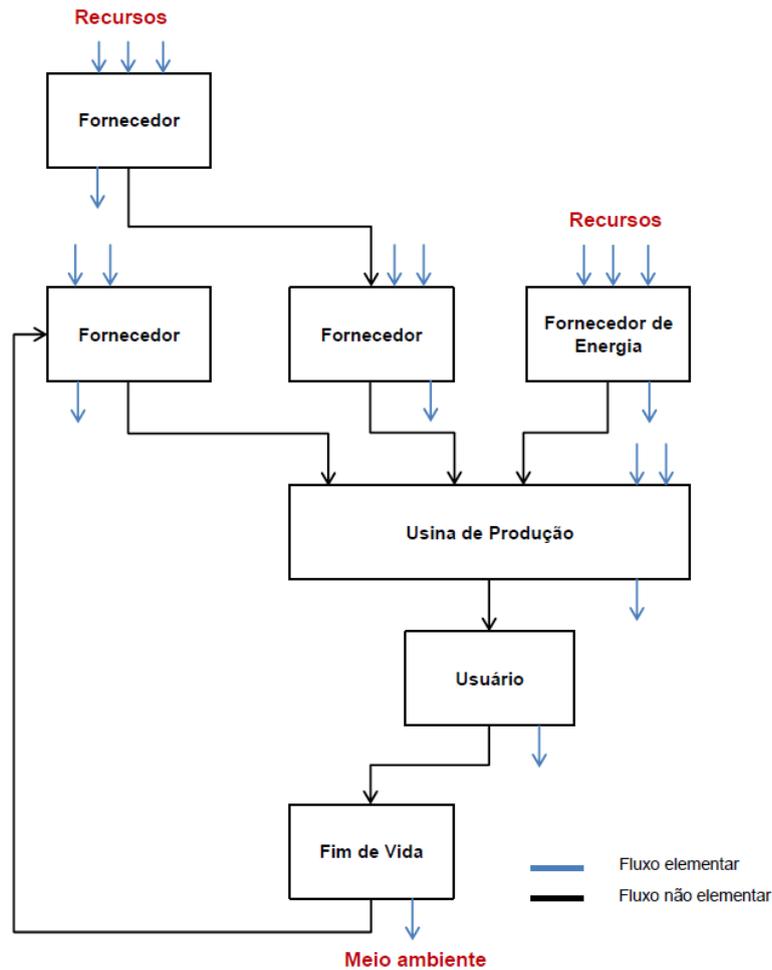


Figura 13: Fluxos nas etapas do ciclo de vida.

Fonte: *Module de sensibilisation à l'éco-conception*, Ademe/Mate, 2001.

Os resultados do inventário do ciclo de vida são apresentados como emissões, que são associadas a categorias de impacto ambiental. Esta etapa, conhecida como Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), atribui impactos às emissões catalogadas, e cada emissão é vinculada a um impacto ambiental específico.

3.4.1 Fatores de Emissão de Carbono e Consumo de Energia

A Tabela 03 apresenta o inventário de todos os materiais utilizados na construção alvo, e a fonte de dados de emissão de carbono e consumo de energia são do *Ecoinvent*, também disponibilizados na base de dados e utilizados pelo software SimaPro.

FONTE	UNIDADE	EMISSÃO (kgCO ₂ eq/ unit)
tijolo cerâmico	Kg	1,3
argamassa de cimento	Kg	0,248
barras de aço	Kg	2,14
concreto	m ³	338
telha	Kg	0,268
madeira	Kg	25
janelas de alumínio	m ²	194
portas de madeira	m ²	60
piso cerâmico	Kg	1,07
pintura	Kg	3,5
parafusos de alta resistência	set (500 unid.)	0,33
caminhão	tkm	0,131
bate estaca diesel	dia (8hrs trabalho)	25.6479
misturador de argamassa	dia (8hrs trabalho)	2.54856
betoneira	dia (8hrs trabalho)	10.0936
bomba de distribuição de argamassa	dia (8hrs trabalho)	7.0152
bomba de concreto	dia (8hrs trabalho)	72.0642
dobrador de barra de aço	dia (8hrs trabalho)	3.7888
máquina de serrar madeira	dia (8hrs trabalho)	7.104
vibrador de concreto	dia (8hrs trabalho)	0.9146
eletricidade	Kw/h	1,07
água	m ³	0,21
óleo Diesel	Kg	0,535

Tabela 03: Consumo de energia e emissão de carbono da edificação alvo na fase de construção.
Fonte: Autora.

No que diz respeito a algumas fontes não diretas de emissão de carbono (por exemplo os instrumentos de construção), seu consumo diário de energia é determinado principalmente por GB/T51366 (2019), e seu carbono diário a emissão pode ser calculada com base no seu consumo de energia. Como a vida útil dos instrumentos de construção é longa e eles processam muitos produtos durante a sua utilização, as suas emissões de carbono têm pouco impacto nos edifícios, potante a emissão de carbono de instrumentos de construção não serão considerados (LIU, *et al*, 2023).

Para toda a edificação presume-se que os materiais foram transportados no modo rodoviário e o fator de emissão de carbono dos caminhões é avaliado em 0,131 kgCO₂eq/tkm. A emissão de carbono dos instrumentos durante a fase de construção deve-se principalmente ao consumo de energia. Água (0,21 kgCO₂eq/m³) e a eletricidade (1,07 kgCO₂eq/kWh) são os principais contribuintes para o consumo de energia na fase de operação (LIU, *et al*, 2023).

A energia utilizada para a desmontagem da edificação e transporte da demolição até o aterro é contabilizada na fase de descarte. Os instrumentos utilizados para a demolição incluem principalmente máquinas compactadoras dinâmicas e escavadeiras. O transporte rodoviário foi utilizado para transportar os materiais de construção e demolição da residência alvo e a distância é de 50 km.

3.4.2 Inventário para a fase de obtenção

A principal questão deste estudo é como aplicar a ACV em sistemas construtivos no Brasil, um país onde não há inventários de materiais de construção. E devido a ACV se originar na indústria de produtos de consumo imediato, é uma ferramenta particularmente adequada a esses produtos.

Desta forma, como já mencionado acima, nesta fase foram utilizados os dados da base do *software SimaPro* versão 9.5.0.2, e a base de dados da *Ecoinvent*.

3.4.3 Inventário para a fase de transporte

Na fase de transporte, os materiais foram adquiridos nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio de Janeiro e Minas Gerais, e transportados até a cidade de Cascavel/Pr, no Brasil, utilizando caminhões abastecidos com diesel.

Ainda neste contexto, para o transporte dos insumos na estrada foi considerado o caminhão Transport, lorry> 28, fleetaverage/RER U, e dentro da cidade, o caminhão Transport, lorry> 16, fleetaverage/RER U. No que diz respeito à fonte de energia empregada nos processos de produção e transformação dos materiais, o perfil energético europeu foi substituído pela Electricity, médium voltage, production BR, at grid/BR U, a qual leva em conta a produção de energia no Brasil.

A Figura 14 demonstra a modelagem do transporte e a distribuição dos materiais em seu ciclo de vida.

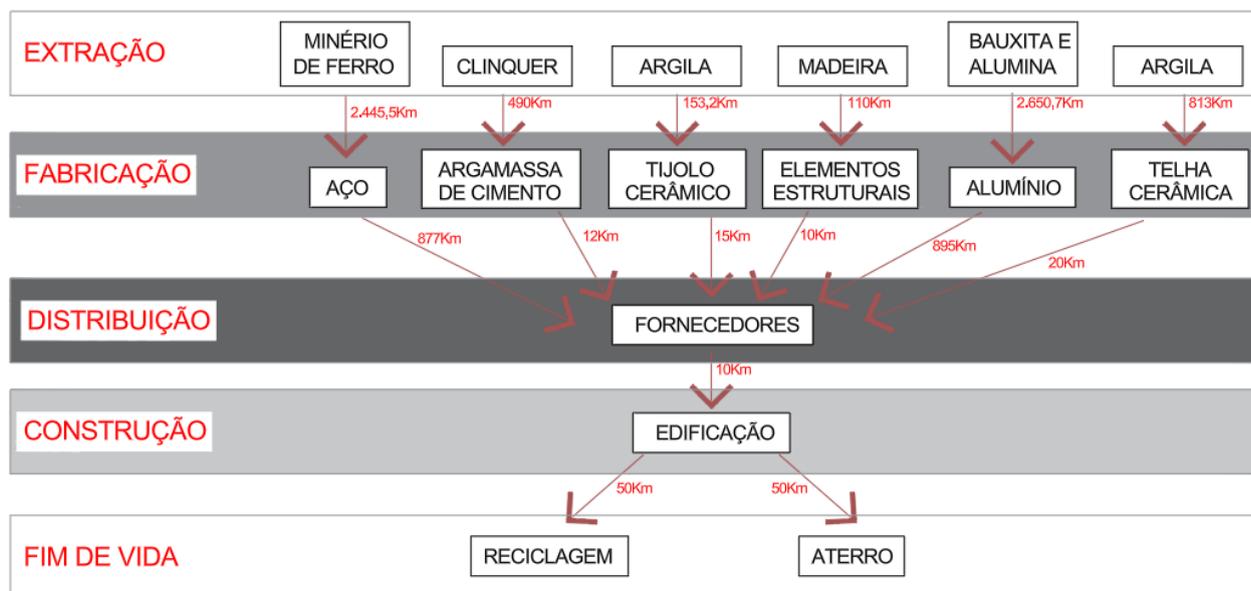


Figura 14: Modelagem do transporte e distribuição dos ciclos de vida dos materiais.
Fonte: autora, 2025.

A distância de transporte foi determinada usando o Google Maps entre o local de produção e o local de construção. A Tabela 04 apresenta as quantidades exatas de todos os materiais na fase de transporte.

Tipo de material	Distância de transporte (Km)	Volume de transporte (tKm)
tijolo cerâmico	168,2	4.091.199,24
argamassa de cimento	506,2	14.767.585,20
barras de aço	3.322,5	12.536.589,90
concreto	512,0	319.488,00
telha	833,0	2.653.105,00
madeira	120,0	470.229,60
janelas de alumínio	3.545,7	13.894.109,10
portas de madeira	420,3	620.249,31
piso cerâmico	754,6	3.630.712,62
parafusos de alta resistência	833,0	12.495,00

Tabela 04: Distância de transporte e volume de transporte de materiais.
Fonte: Autora.

Pode-se verificar na tabela que o material argamassa de cimento, barras de aço e janelas de alumínio tem o maior volume de transporte nesta fase, e os restante são relativamente pequenos.

3.4.4 Inventário para a fase de produção

Na fase de produção, os materiais utilizados foram calculados com base nos desenhos de projeto. Os principais materiais de construção incluídos foram o concreto, aço, madeira e cerâmica. A Tabela 05 apresenta as quantidades específicas de todos os materiais de construção utilizado para o estudo.

Tipo de material	Unidade	Consumo de material
tijolo cerâmico	kg	24.323,42
argamassa de cimento	kg	29.173,73
barras de aço	kg	3.773,24
concreto	kg	624,00
telha	kg	3.185,00
madeira	kg	3.918,58
janelas de alumínio	kg	2.601,35
portas de madeira	kg	1.475,73
piso cerâmico	kg	4.811,44
parafusos de alta resistência	set (500 unid.)	15,00

Tabela 05: Consumo de materiais da edificação alvo.
Fonte: Autora.

Um total de 29.173,73kg de argamassa de cimento foram utilizados na edificação alvo durante a fase de construção, sendo este o material que teve o maior consumo.

3.4.5 Inventário para fase de construção

Na fase de construção, devido ao tempo de utilização flexível e variável dos diferentes instrumentos, o tempo de trabalho de cada instrumento foi determinado principalmente com base na quantidade de materiais e na experiência operacional. A Tabela 06 apresenta o horário de funcionamento dos instrumentos diferentes.

Tipo de instrumento	unidade	Horário de funcionamento
caminhão	dia	4,32
bate estaca diesel	dia	1,0
misturador de argamassa	dia	1,21
betoneira	dia	1,5
bomba de distribuição de argamassa	dia	0,48
bomba de concreto	dia	0,098
dobrador de barra de aço	dia	1,2
máquina de serrar madeira	dia	8,0
vibrador de concreto	dia	0,256

Tabela 06: Horário de funcionamento de instrumentos.
Fonte: Autora.

Os instrumentos mais utilizados são os caminhões e a máquina de serrar madeira. Neste estudo, os instrumentos mais utilizados estão relacionados às ferramentas de processamento específico de cada material.

3.4.6 Inventário para fase de operação

A Tabela 07 mostra o consumo de energia do edifício alvo na fase de operação. A densidade de potência do equipamento inclui sistema de condicionamento de ar e sistema de água.

Ambiente	Área (m ²)	Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	Densidade de potência do equipamento (W/m ²)	Duração da iluminação (h/d)	Hora de operação (h/d)	Consumo de energia (kWh)
garagem	26,10	6	8,0	0,5	0,8	245,34
depósito	2,32	6	3,6	0,2	0,5	6,96
lavabo	1,95	6	3,6	1	0,5	15,21
sala estar/Tv	15,57	6	4	3	4,1	535,60
jantar	9,36	6	10,0	2	2	299,52
gourmet	14,08	6	25,0	4	4	1.745,92
lavanderia	5,19	6	12,6	1	6	423,50
suíte 01	10,95	6	12,6	1	0,5	68,98
bwc 01	4,50	6	3,6	0,5	0,25	17,55
suíte 02	13,56	6	12,6	1	0,5	166,78
bwc 02	5,19	6	3,6	0,25	0,25	12,45
suíte 03	12,36	6	12,6	1	0,5	152,02
bwc 03	3,61	6	3,6	0,5	0,25	14,07
suíte master	18,21	6	12,6	1	0,5	223,98
bwc master	5,40	6	3,6	0,5	0,25	21,06

Tabela 07: Consumo de energia da edificação alvo na fase de operação.
Fonte: Autora.

Neste estudo, a densidade de potência de iluminação e a densidade de potência do equipamento são determinadas de acordo com a RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (Inmetro, 2012). Vale ressaltar que a duração da luz e o horário de funcionamento do quarto na tabela representam ao som de quatro quartos, e o mesmo vale para corredores e banheiros. O consumo de energia em ordem decrescente é o quarto, sala, corredor, cozinha e banheiro.

Além disso, o consumo de água (6.570m³) durante um período de 50 anos, com base nos hábitos de vida da população local. Ressalta-se que a substituição de material não é considerada nesta fase. A razão para isto é que no consumo global de energia, a frequência e a quantidade de substituição de consumíveis são relativamente estáveis e o custo de reposição de consumíveis é geralmente baixo, o que tem um pequeno impacto no consumo geral de energia. A substituição de consumíveis está no âmbito da gestão da operação e deverá ser de responsabilidade da empresa de administração de imóveis ou o proprietário. Portanto, na avaliação da fase operacional, geralmente não se considera a substituição de consumíveis para a edificação.

3.4.7 Inventário para a fase de descarte

A fase de descarte tem menos fontes de emissão de carbono, incluindo apenas caminhões, guindastes sobre esteiras, escavadeiras sobre esteiras e máquinas de compactação. A Tabela 08 resume as quantidades de fontes emissoras na fase de descarte. Nesta fase, a distância de transporte entre a estação de eliminação de resíduos e a edificação alvo é assumido como 50Km, e o peso do transporte é o peso total do edifício, ou seja 328 t.

Fonte de emissão	Unidade	Consumo
caminhão	tKm	8401,97
guindaste sobre esteiras	dia	2,0
escavadeira de esteira	dia	2,0
máquina de compactação dinâmica	dia	0,4

Tabela 08: Fonte de emissão de carbono na fase de descarte.
Fonte: Autora.

Os edifícios, produtos da construção civil e da arquitetura, possuem etapas de ciclo de vida e características específicas. Essas características incluem a longevidade

do edifício e a etapa de construção. Eles podem durar séculos, o que torna difícil prever os impactos ambientais ao longo desse período, além da dificuldade em estimar a vida útil. A construção é um processo de produção distinto, diferente dos produtos manufaturados de uso imediato, e envolve a integração de múltiplos sistemas em um único produto, o que complica as análises em ACV. Cada componente do edifício possui suas próprias cargas ambientais provenientes do seu processo de fabricação e passa por uma nova transformação ao ser incorporado ao sistema construtivo.

3.4.8 Materiais no cenário alvo e de contraste

Para a análise e substituição dos materiais conforme os cenários propostos, primeiramente foram identificados os materiais residuais que são gerados em maior quantidade nas obras civis: alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira. E posteriormente foram quantificado seus montantes para a residência de estudo (cenário alvo), para podermos submeter ao *software*, utilizando os inventários existentes no mesmo. A base de dados utilizadas foi a *Ecoinvent*.

Os materiais foram avaliados sobre o contexto da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), e desta maneira definiram-se os objetivos e o escopo da análise, delimitaram-se as fronteiras do estudo, identificaram-se os impactos e, por meio do inventário do Ciclo de Vida, os impactos finais foram avaliados.

Com a submissão dos dados no *software* SimaPro, foi possível obtermos dados referentes a impactos ambientais, como o aquecimento global, a degradação da camada de ozônio, poluição, toxicidade, entre outros, foco deste trabalho. Os resultados das análises foram apresentados por meio de gráficos gerados pelo *software* SimaPro, com base nos inventários de cada material caracterizado na construção, e posteriormente complementados com tabelas, esquemas e fluxogramas dos processos individuais.

Posteriormente, alguns materiais foram substituídos por outros similares porém mais sustentáveis, com a finalidade de realizar testes referentes à melhorias em questões térmicas e acústicas, que em residências são características importantes, como versa a NBR 15.575.

Os materiais substituídos, apresentam características sustentáveis, como apresentados posteriormente, e foram definidos a partir da identificação do mercado de materiais que tivessem a mesma finalidade que os atuais, porém com redução de

impactos negativos ao meio ambiente.

Conforme a Tabela 09, foram substituídos materiais em três etapas distintas da obra, sendo elas: esquadrias de alumínio por esquadrias de PVC, paredes de tijolos cerâmicos com as dimensões de 15x19x24 (centímetros) por tijolos leves 21,5x25x6,25 (centímetros) e cobertura cerâmica de telha romana por telha mineral. A nomenclatura utilizada é a mesma que o *software* apresenta.

MATERIAL	CORRESPONDÊNCIA (cenário alvo)	CORRESPONDÊNCIA (cenário constraste)
Tijolo cerâmico	Clay brick	Light clay brick
Alumínio	Aluminium alloy, ALi	Window frame, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m ²
Telha cerâmica	Ceramic tile	Natural stone plate

Tabela 09: Materiais substituídos no cenário de contraste e sua correspondência.
Fonte: Autora.

É importante destacar que o uso de materiais ecológicos na cobertura contribui para a redução do consumo de energia. Conforme observado no estudo de Barcelos *et al.* (2015), a instalação de telhados verdes promove economia tanto no consumo anual quanto nos picos de energia. Esses telhados podem reduzir significativamente a necessidade de uso de sistemas de ar-condicionado e aquecimento em edifícios, gerando economia energética.

3.4.9 Avaliação dos Impactos

A terceira etapa de uma Avaliação do Ciclo de Vida é a avaliação de impactos, em que os consumos de recursos e os rejeitos identificados na fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) são convertidos em potenciais impactos ambientais, como o aquecimento global, a degradação da camada de ozônio, poluição, toxicidade, entre outros.

Segundo a norma ISO 14040 (2006), essa fase envolve a associação dos dados do inventário com categorias específicas de impacto ambiental e seus respectivos indicadores, além de buscar a compreensão dos efeitos gerados por esses impactos. A avaliação de impactos também fornece subsídios importantes para a fase seguinte do estudo: a interpretação do ciclo de vida. Os elementos que compõem essa fase podem ser observados na Figura 15.

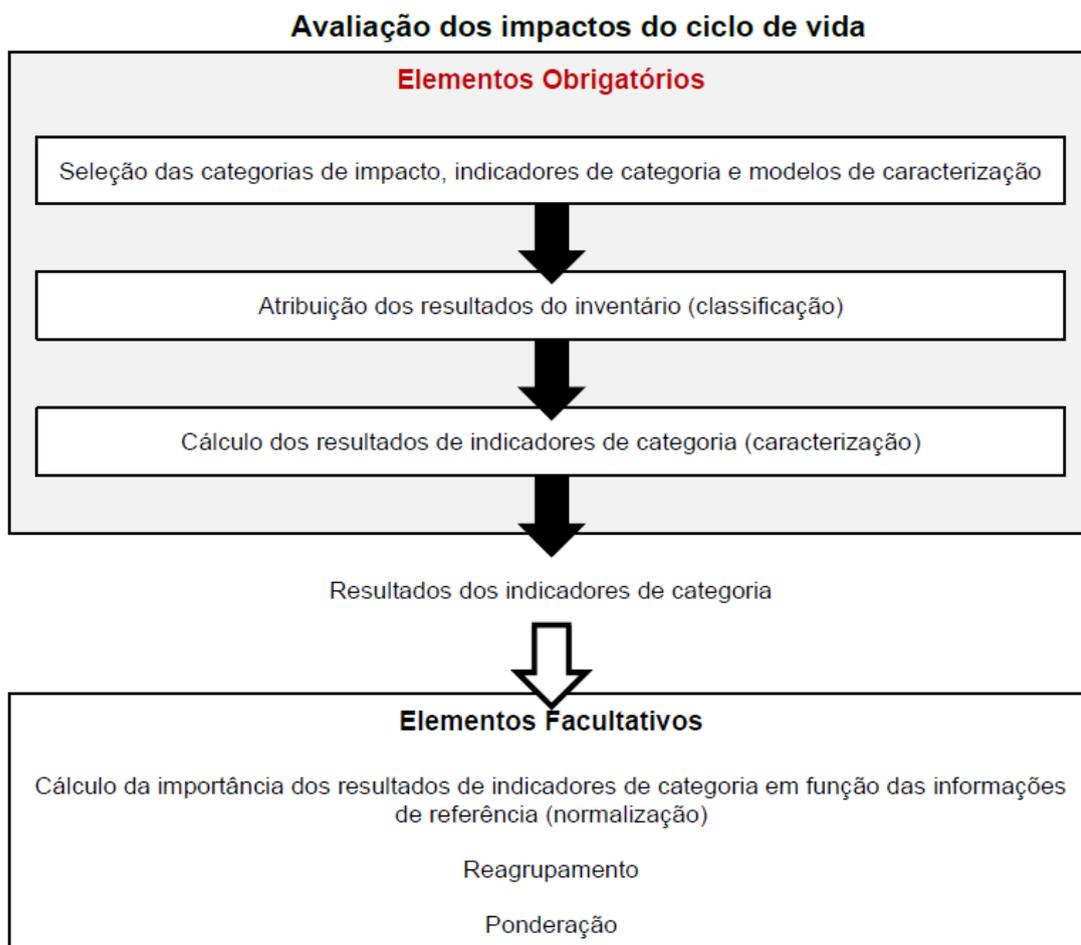


Figura 15: Elementos da fase de avaliação dos impactos.
Fonte: ISO 14040,2006.

Para a compreensão das modalidades de avaliação de impactos apresentadas na Figura 15 e, conseqüentemente, para a correta interpretação dos resultados obtidos, cada uma delas é brevemente definida a seguir:

- a) **Caracterização:** Consiste na conversão dos fluxos de entrada e saída identificados no inventário em categorias específicas de impacto ambiental.
- b) **Avaliação de danos:** etapa que determina o impacto ambiental na saúde humana de um processo ou um produto, ao longo de todo o seu ciclo de vida.
- c) **Normalização:** Etapa em que os valores dos impactos ou fluxos são comparados com uma referência territorial, como os totais médios de um país, continente ou do mundo, permitindo contextualizar a magnitude dos resultados.
- d) **Ponderação:** Atribuição de pesos relativos às diferentes categorias de impacto, possibilitando, em alguns casos, a obtenção de um indicador agregado ou de uma nota única representativa.

3.4.10 Categoria de impactos

A norma ISO 14040 (2006) define as categorias de impacto como classes que representam questões ambientais associadas aos resultados do Inventário do Ciclo de Vida. Entre as categorias mais frequentemente utilizadas estão: aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade, consumo de recursos naturais, redução da camada de ozônio e formação fotoquímica de ozônio (SILVA *et al.*, 2006).

Com base nessas informações, e considerando que a escolha das categorias de impacto e seus indicadores devem estar alinhadas aos objetivos e ao sistema analisado, foram selecionadas, para uma análise mais aprofundada, as categorias relacionadas ao aquecimento global, consumo de recursos naturais, uso de energias não renováveis e toxicidade à saúde humana.

Os indicadores de impacto são representações quantificáveis das categorias de impacto ambiental. Eles podem ser utilizados para descrever diretamente um problema ambiental específico (*midpoint*) ou para avaliar os danos resultantes em áreas de proteção mais amplas, como a saúde humana, o meio ambiente e os recursos naturais (*endpoint*), conforme ilustrado na Figura 16.

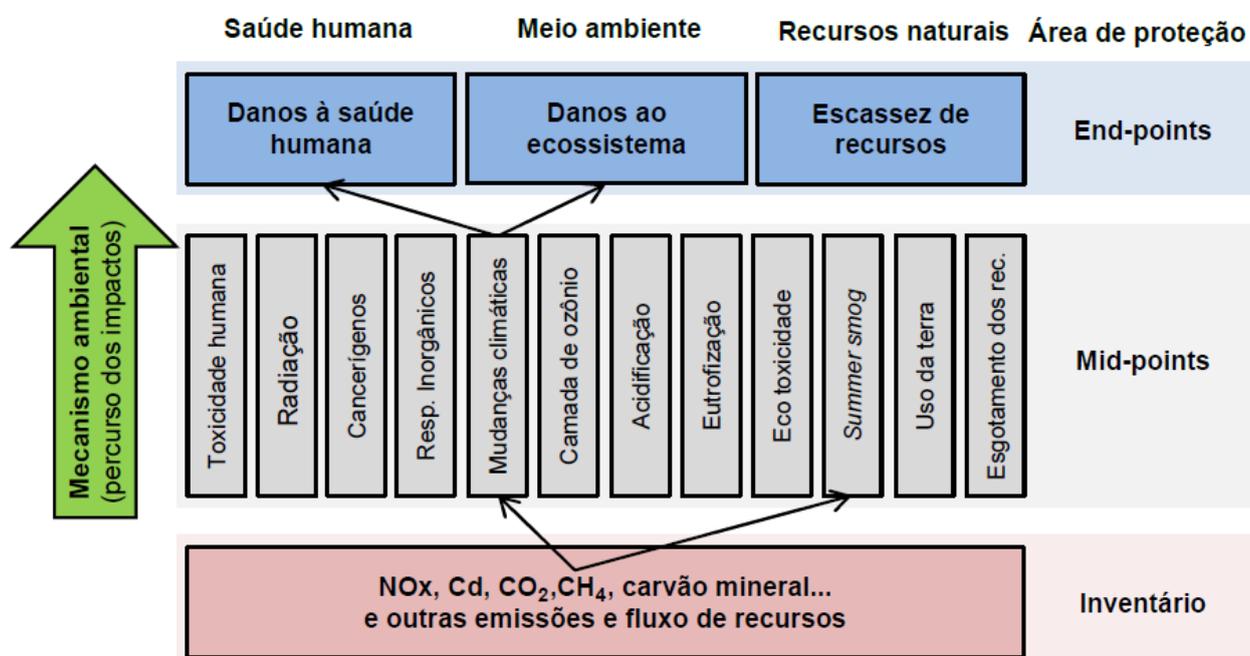


Figura 16: Classificação dos fluxos do inventário nas categorias de impactos *mid-points* e *end-points*.
Fonte: Lassio, 2013.

Neste estudo, foram utilizados os métodos de cálculos que contemplam ambas as abordagens, a clássica (*midpoint*) e a orientada (*endpoint*), por avaliar os danos resultantes em áreas de proteção mais amplas.

3.4.11 Cálculo dos indicadores

Com o objetivo de avaliar a abordagem clássica (*midpoint*) quanto à orientada ao dano (*endpoint*), foram selecionados três métodos para os cálculos: *CML – IA*, *Eco Indicator 99 (H)* e *Impact2002+*.

O método *CML – IA* que é a mais utilizada em abordagens clássicas, as quais compilam os resultados em categorias de pontos médios (*midpoints*).

- Eco-indicator 99 (H): metodologia mais utilizada nas abordagens orientadas ao dano (*endpoint*).
- Impact 2002+: metodologia que propõe uma combinação das abordagens clássicas (*midpoint*) e de orientadas ao dano (*endpoint*), agrupando, assim, os pontos positivos dos métodos não utilizados em estudos de ACV, tais como *Impact2002*, *Eco-Indicator99*, *CML 2000* e *IPCC* (GOEDKOOOP *et al*, 2001).

3.5 Comparação custo x benefício entre os dois cenários

Silva (2018), afirma que empresas do setor da construção civil passaram a se preocupar com os custos, e começaram a controlar gastos, tomando algumas decisões que impactam economicamente e uma obra precisa reunir economia, praticidade, segurança e durabilidade, e de encontro a esses objetivos estão disponíveis no mercado diversos tipos de sistemas construtivos, tais como: steel frame, wood frame, metálicos, demonstrando que o setor se desenvolveu, permitindo aos profissionais a comparação entre sistemas para escolher aquele que melhor se enquadre no tipo de construção, objetivos e benefícios desejáveis.

No cenário atual de estudo tem-se os seguintes materiais: alumínio, aço, cerâmica, cimento e madeira e no cenário de contraste, com a substituição por outros com características mais sustentáveis, como já citados nos tópicos anteriores, tem-se: tijolo cerâmico leve, telha mineral, esquadrias em PVC.

A tabela a seguir mostra os valores comercializados por lojas do setor da construção civil na cidade de Cascavel/Pr para o cenário atual, utilizando materiais construtivos sem características sustentáveis (tabela 10). Valores da tabela SINAPI -

Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (2019) também foram consultados.

Tipo de material	Unidade	Consumo de material	Valor (R\$) reais
tijolo cerâmico	kg	24.323,42	4.800,00
argamassa de cimento	kg	29.173,73	5.400,00
barras de aço	kg	3.773,24	20.000,00
concreto	kg	624,00	40.000,00
Telha cerâmica	kg	3.185,00	2.220,00
madeira	kg	3.918,58	7.550,00
janelas de alumínio	kg	2.601,35	68.078,00
portas de madeira	kg	1.475,73	11.250,00
piso cerâmico	kg	4.811,44	16.250,00
parafusos de alta resistência	set (500 unid.)	15,00	1.200,00
TOTAL			160.498,00

Tabela 10: Valores de mercado para os materiais do cenário atual.
Fonte: Autora.

É possível observar que os maiores valores de comércio foram das esquadrias em alumínio e o concreto, e quando comparado o montante utilizado para a construção da unidade unifamiliar obteve-se o alumínio com maior representatividade.

Na tabela abaixo tem-se os materiais substituídos por outros mais sustentáveis, conforme apresentados anteriormente, e seus valores de comércio (tabela 11).

Tipo de material	Unidade	Consumo de material	Valor (R\$) reais
tijolo cerâmico LEVE	kg	70.000,00	17.000,00
argamassa de cimento	kg	29.173,73	5.400,00
barras de aço	kg	3.773,24	20.000,00
concreto	kg	624,00	40.000,00
Telha mineral	kg	970,00	38.828,00
madeira	kg	3.918,58	7.550,00
janelas de PVC	kg	2.601,35	148.000,00
portas de madeira	kg	1.475,73	11.250,00
piso cerâmico	kg	4.811,44	16.250,00
parafusos de alta resistência	set (500 unid.)	15,00	1.200,00
TOTAL			289.228,00

Tabela 11: Valores de mercado para os materiais do cenário de constraste.
Fonte: Autora.

E observa-se que o maior valor de comércio ficou com as esquadrias em PVC e a cobertura mineral ganhou visibilidade, e quando comparado o montante utilizado obteve-se as esquadrias com maior valor quando comparado aos valores iniciais no cenário atual.

Os valores maiores para materiais construtivos com características sustentáveis apresentam-se devido à toda a cadeia produtiva dos mesmos, ou mesmo pela indisponibilidade do material próximo das obras, ou seja, sua produção ainda pouco difundida e utilizada, gera a concentração das indústrias em poucas regiões, distante da maioria das construções brasileiras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos basearam-se no estudo para a residência (cenário alvo) em comparação à residência com materiais mais sustentáveis (cenário de contraste), utilizando os métodos acima já citados, *CML – IA*, *Eco Indicator 99 (H)* e *Impact2002+*.

Vale ressaltar que a comparação dos impactos dos materiais busca o conhecimento da contribuição de cada um deles dentro do sistema de uma edificação.

No gráfico 01 observa-se o primeiro resultado comparativo entre os materiais analisados pelo método *CML-IA*, o qual compila os resultados apenas em categorias de pontos médios, descrevendo um problema ambiental. Como resultados, obteve-se como principais agentes dos impactos o ciclo de vida do alumínio, do aço e do cimento. Sendo o alumínio o maior responsável pelos altos índices de *abiotic depletion* (depleção abiótica), *human toxicity* (toxicidade humana), e grande participação em todos os demais índices. O aço também se destaca no *ozone layer depletion* (destruição da camada de ozônio).

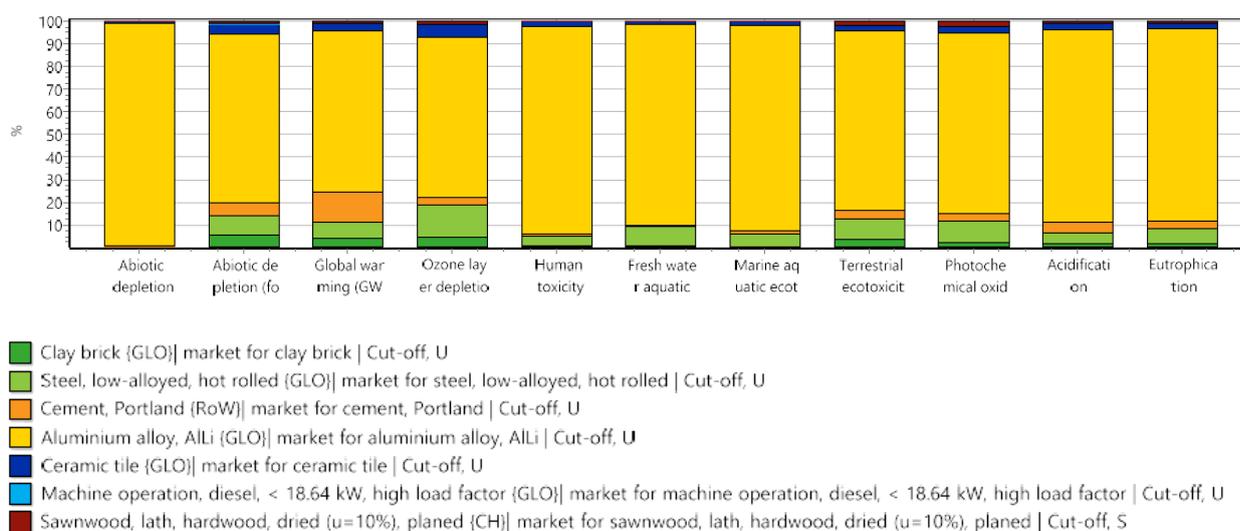


Gráfico 01: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *CML IA*, caracterização. Fonte: SimaPro, 2025.

No gráfico 02, observa-se a comparação realizada através do método *Eco - Indicator 99*, classificado como um método direcionado aos danos. Novamente temos o alumínio como protagonista em diversos índices, e a madeira se destaca no *land use* (uso da terra) e a cerâmica aparece com resultados negativos no mesmo índice.

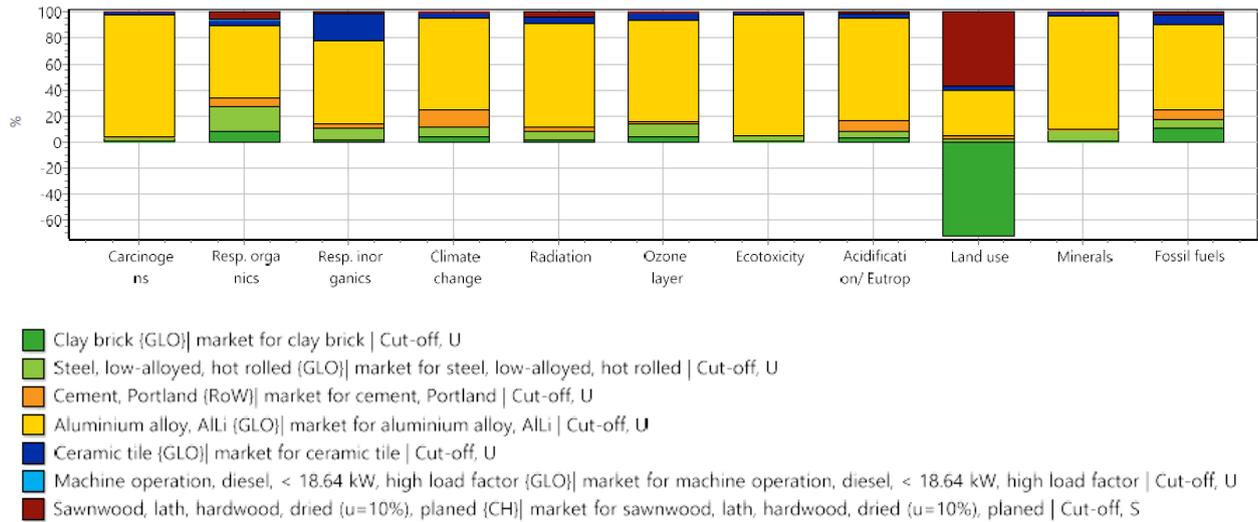


Gráfico 02: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *Eco-indicator 99*, caracterização.
 Fonte: SimaPro, 2025.

No gráfico 03, na modalidade de caracterização, verifica-se a tradução dos fluxos de entrada e saída em impactos pelo método *Impact2002+*, o qual apresenta impactos significativos do alumínio na maioria dos índices, com destaque para o índice *non-carcinogens* (não-cancerígenos), a madeira com destaque no *land occupation* (ocupação de terras), e a cerâmica no índice *respiratory inorganics* (inorgânicos respiratórios).

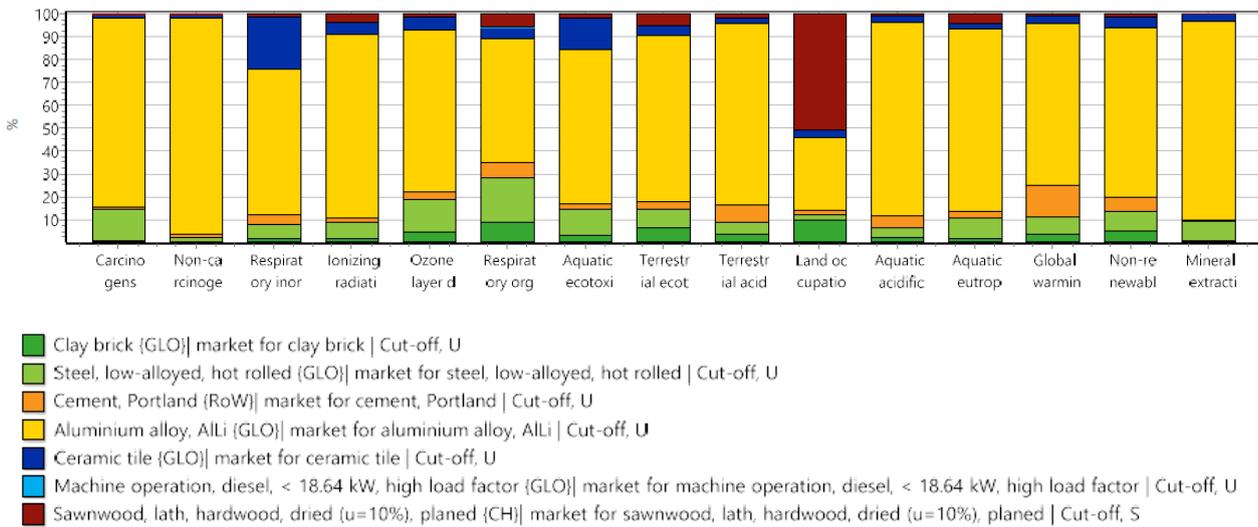


Gráfico 03: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *Impact 2002+*, caracterização.
 Fonte: SimaPro, 2025.

Comparando os três métodos utilizados, os dados apresentados nos revelam que em termos de responsabilidade não houve muita disparidade, já que o alumínio

dominou a maioria dos índices apresentados, sendo o maior causador dos impactos, trazendo para si a responsabilidade das interferências tóxicas dos índices em geral.

O gráfico 04, apresenta a modalidade avaliação de danos pelo método *Impact2002+*, permitindo identificar quais substâncias e processos contribuem mais para esses impactos, auxiliando na tomada de decisões para reduzir o impacto ambiental.

O alumínio dispara nas quatro categorias apresentadas: *human health* (saúde humana), *ecosystem quality* (qualidade do ecossistema), *climate change* (mudanças climáticas) e *resources* (recursos), demonstrando o quão a sua utilização no passado e no presente tem grande impacto na Avaliação do Ciclo de Vida.

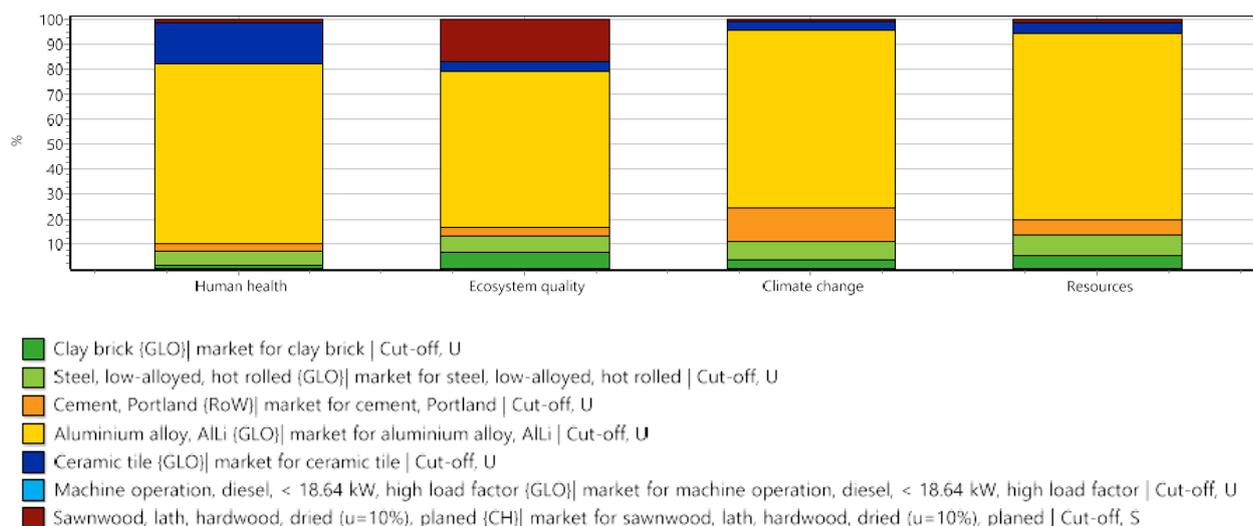


Gráfico 04: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.

Fonte: SimaPro, 2025.

E ao analisar a modalidade normalização, onde o foco é o futuro, estabelecendo novos padrões, regras ou mesmo normas técnicas, o alumínio se apresenta com mais disparidade no índice relacionado à *human health* (saúde humana), e no *climate change* (mudanças climáticas) e *resources* (recursos) com valores parecidos, com grande diminuição no índice *ecosystem quality* (qualidade do ecossistema), assim como os outros materiais analisados (gráfico 05).

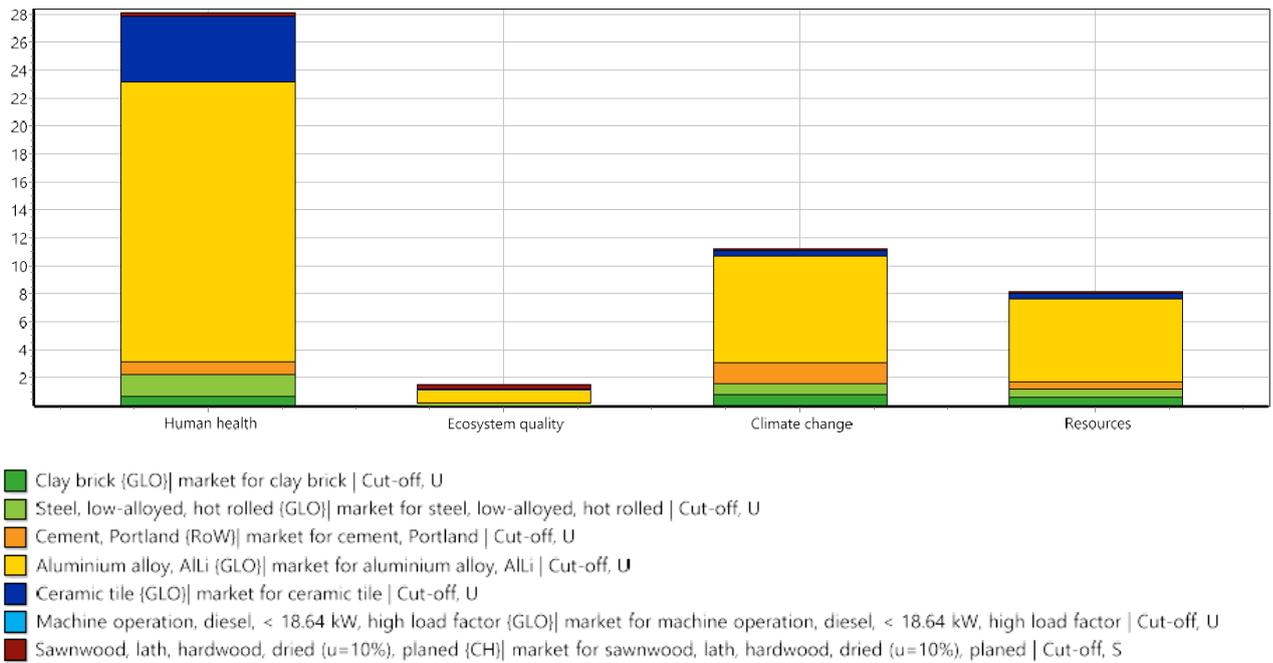


Gráfico 05: Comparação dos ciclos de vida dos materiais seleccionados, Método *Impact 2002+*, normalização.
 Fonte: SimaPro, 2025

Resultados que se assemelham quando analisada a etapa de ponderação, a qual permite atribuir diferentes pesos de importância a cada categoria de impacto ambiental, conforme o gráfico 06.

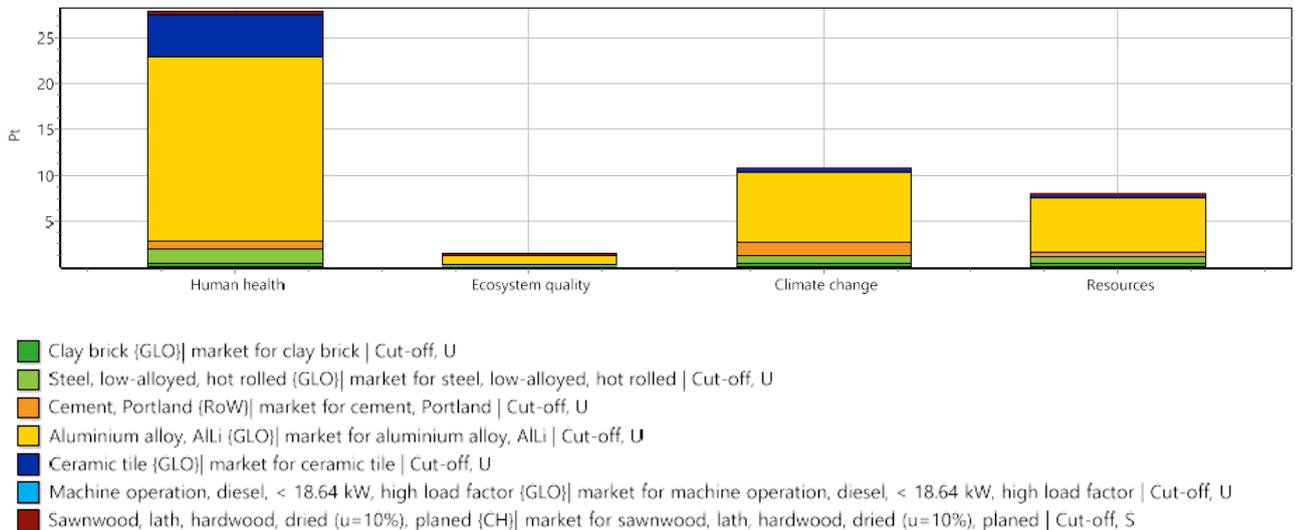


Gráfico 06: Comparação dos ciclos de vida dos materiais seleccionados, Método *Impact 2002+*, ponderação.
 Fonte: SimaPro, 2025.

Com o objetivo de encontrar materiais substitutos aos residuais da construção civil apresentados na pesquisa, buscou-se a substituição dos materiais que

apresentaram a maior contribuição negativa nos impactos analisados na ACV, e verificou-se que o item mais representativo nos índices e categorias analisadas é o alumínio e o aço.

O alumínio foi substituído pelo polyvinyl chloride (PVC) devido à uma característica que envolve seu processo de fabricação que difere do alumínio: o alumínio envolve mais água e materiais pesados na fabricação, além disso o PVC apresenta características acústicas, item importante em construções residenciais.

Para o emprego do aço no cenário de contraste, encontrou-se o vergalhão de fibra de vidro, ou GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) como substituto, e estudos recentes estão sendo desenvolvidos. Silva (2024), em seu artigo publicado na revista Foco, apresenta como a utilização do aço traz algumas desvantagens como danos ambientais, e como o GFRP apresenta vantagens para sua substituição. Porém para o presente estudo, este material ainda não consta nos inventários utilizados e disponibilizados pelo *software* SimaPro. Em substituição ao tijolos, foram empregados tijolos leves, os quais não precisam passar pela queima, sendo mais sustentáveis. E para a telha cerâmica foi utilizada uma cobertura térmica combinada de asfalto, fibra de vidro e grânulos minerais ou sintéticos.

O gráfico a seguir apresenta a caracterização dos impactos com os materiais mais sustentáveis, utilizando o método *Impact2002+*, configurando assim o cenário de contraste para análise.

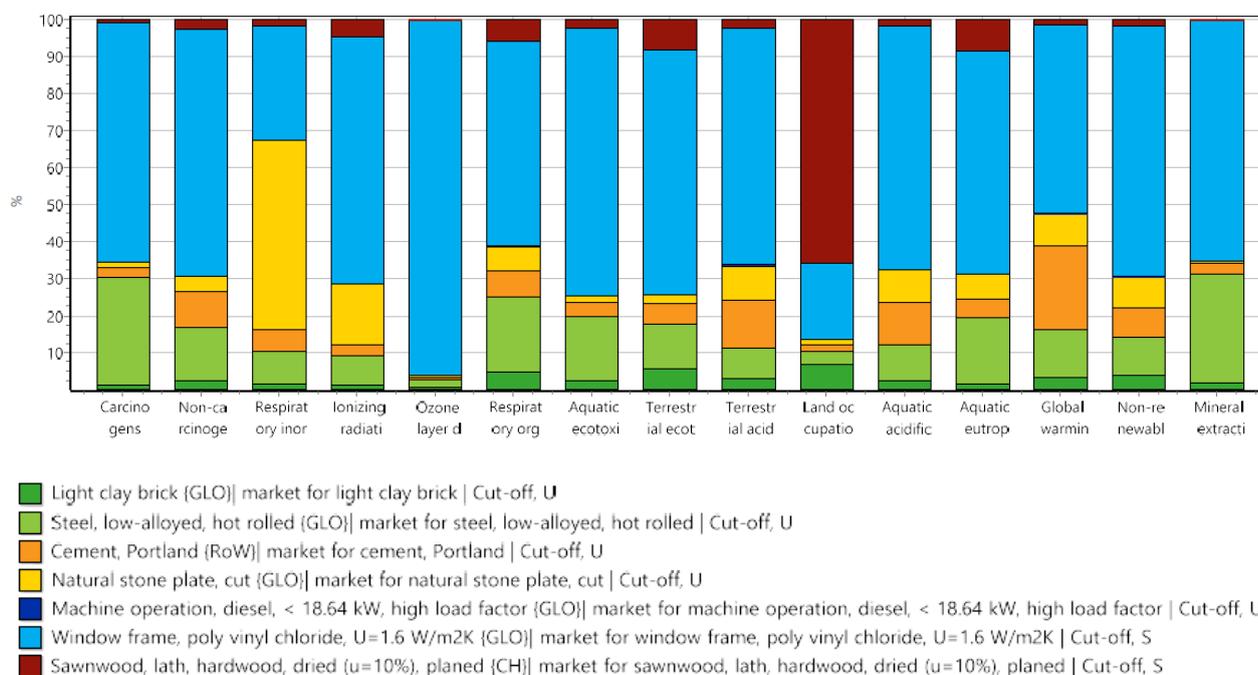


Gráfico 07: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *Impact 2002+*, caracterização.

Fonte: SimaPro, 2025.

No gráfico 07, o material PVC, representado no gráfico pela azul claro, apresenta a tradução dos fluxos de entrada e saída em impactos pelo método *Impact2002+*, ainda tem grande representatividade nos índices, porém consome menos recursos naturais e se apresenta como uma opção de menor impacto em todos os outros índices analisados, comparados ao gráfico 03.

Na modalidade avaliação de danos pelo método *Impact2002+*, o PVC apresenta índices menores que o alumínio nas quatro categorias apresentadas, demonstrando o quão a sua utilização apresenta benefícios comparado ao alumínio, no impacto na Avaliação do Ciclo de Vida (gráfico 08).

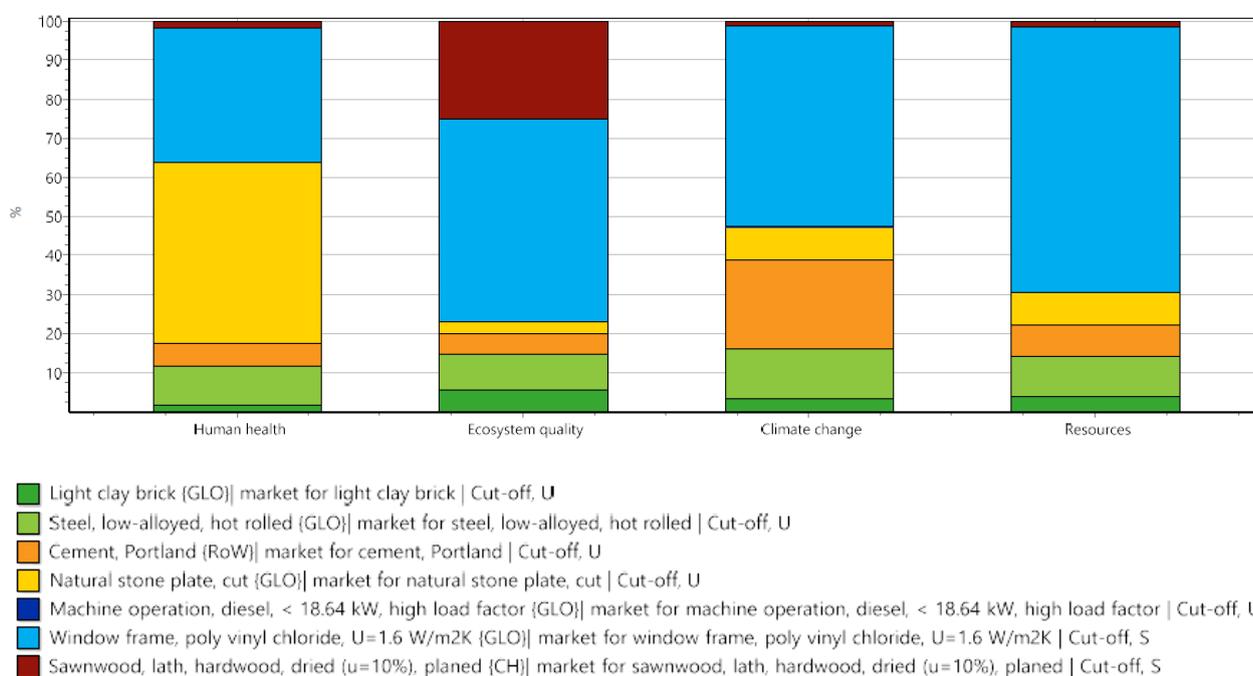


Gráfico 08: Comparação dos ciclos de vida dos materiais selecionados, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.

Fonte: SimaPro, 2025

Observa-se também que a substituição da cobertura tem grande participação nos danos à saúde humana, porém pouca participação dos demais danos avaliados: qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos.

4.1 Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados é a última fase da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e nesta fase, segundo a norma ISO 14040, os resultados do inventário ou a

avaliação dos impactos são resumidos e discutidos para esclarecimentos das conclusões e remendações, com a finalidade de se alcançar uma tomada de decisões seguindo o objetivo e o escopo do projeto.

Constatou-se ao analisar os métodos de cálculos nas categorias de impactos selecionados previamente, que todas que apresentam grande significância para a ACV, estão relacionadas ao aquecimento global, consumo de energias não renováveis e a toxicidade à saúde humana.

No cenário alvo ou atual, o alumínio se destacou em todas as categorias analisadas, sendo o maior responsável pela destruição da camada de ozônio com 71% em relação aos demais materiais analisados. Na categoria toxicidade humana apresentou 91,7% de contribuição, e 98,4% na categoria depleção abiótica, ou seja, na escassez ou mesmo exaustão de recursos naturais não vivos ou não renováveis. Nos impactos na saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos, disparou à frente dos demais materiais analisados, com índices próximos à 70% de contribuição.

Em contrapartida, no cenário de contraste, a escolha pelo material polyvinyl chloride (PVC) para substituí-lo, reforça a necessidade de buscar-se outros materiais que tenham menos impactos ambientais. O PVC apresentou 95,3% de participação na destruição da camada de ozônio, índice nada interessante para as análises, porém na toxicidade humana teve participação de 61,6% e 71,8% na depleção abiótica, justificando a sua escolha.

Outro material que aparece como segundo grande responsável pelos impactos ambientais é o aço, o qual participa com 14,2% para a destruição da camada de ozônio, 9,13% na ecotoxicidade terrestre, 9,58% na oxidação fotoquímica e 8,29% na depleção abiótica. Porém na toxicidade humana apresentou 4,35%, o que justifica-se por ser um material que não se dissolve facilmente em fluidos corporais, e mesmo quando dissolvidos, suas quantidades são relativamente pequenas, não suficientes para causar efeitos tóxicos. Nos impactos referente à saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos, manteve-se com valores entre 6% e 8% de contribuição.

O material cerâmica, compreendido pela telha cerâmica e os tijolos, apresentou valores consideráveis quando analisado sob o aspecto de saúde humana com 16,7% de contribuição, 5,66% na destruição da camada de ozônio e 23% de inorgânicos respiratórios, ou seja, quanto aos efeitos sobre a saúde humana causados pela inalação de substâncias inorgânicas presentes no ar, como poeira, enxofre e óxidos de nitrogênio. Nos impactos referente à saúde humana, qualidade do ecossistema manteve-se muito próximo à valores de 6% de contribuição, e em mudanças climáticas 13,6% e 6,04%

nos recursos.

Segundo Gama (2010), o forno utilizado na queima da cerâmica tem impactos importantes, sendo responsável diretamente por cerca 30,4% dos impactos totais de todo o ciclo de vida do tijolo, justificando também o alto consumo de combustíveis fósseis e outras formas de energia não renováveis pelo ciclo de vida da cerâmica.

O cimento contribuiu com 13,6% para o aquecimento global, 14,2% com a destruição da camada de ozônio, devido à queima de minerais a altas temperaturas, o que produz uma quantidade de gases de efeito estufa que, somada à produção mundial de cimento, corresponde a, aproximadamente, 5% de todas as emissões globais. Outros valores significativos são à respeito do índice de nutrição ácida terrestre com 8,06, em energias não renováveis 6,13%, e nos impactos referente à saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos, apresentou maior representação nas mudanças climáticas, com 13,6% de contribuição.

A madeira aparece com percentual significativo quando analisada no índice *land occupation* (ocupação do solo), tendo pouco representatividade em outros índices, porém aparecendo em toxicidade do solo com 5,39%, e 5,76% em inorgânicos respiratórios. Na modalidade avaliação de danos apresentou 17% de contribuição na qualidade do ecossistema, ao lado do alumínio com 62,4%, referindo-se a sua contribuição na degradação do meio ambiente, valor considerável na participação.

E com os menores índices, obtivemos o material tijolo, com 8,52% no índice inorgânicos respiratórios, e variando entre 1% a 6% nas demais análises de caracterização do ciclo de vida. Seus impactos na avaliação de danos foram maiores no quesito qualidade do ecossistema com 6,92%, e menores em mudanças climáticas e recursos com 3,36% e 5,22% respectivamente, e pouca contribuição para danos à saúde humana com 1,43%.

No contexto das mudanças climáticas ou *Climate Change*, que refere-se a um indicador que mede o impacto de um produto ou serviço no aquecimento global, através da análise do seu ciclo de vida, e o valor é obtido através da avaliação do potencial de aquecimento global (Global Warming Potential, ou GWP) das emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes do produto ou serviço, ao longo de todo o seu ciclo de vida, a emissão de CO₂, ao utilizar-se o método *Impact2002+*, na categoria de avaliação de danos – mudanças climáticas, com resultados em kgCo₂eq, mostraram que o alumínio tem a maior participação com 71%, seguida pelo material cimento com 14%, e depois o aço com 7%, para a residência alvo (gráfico 09).

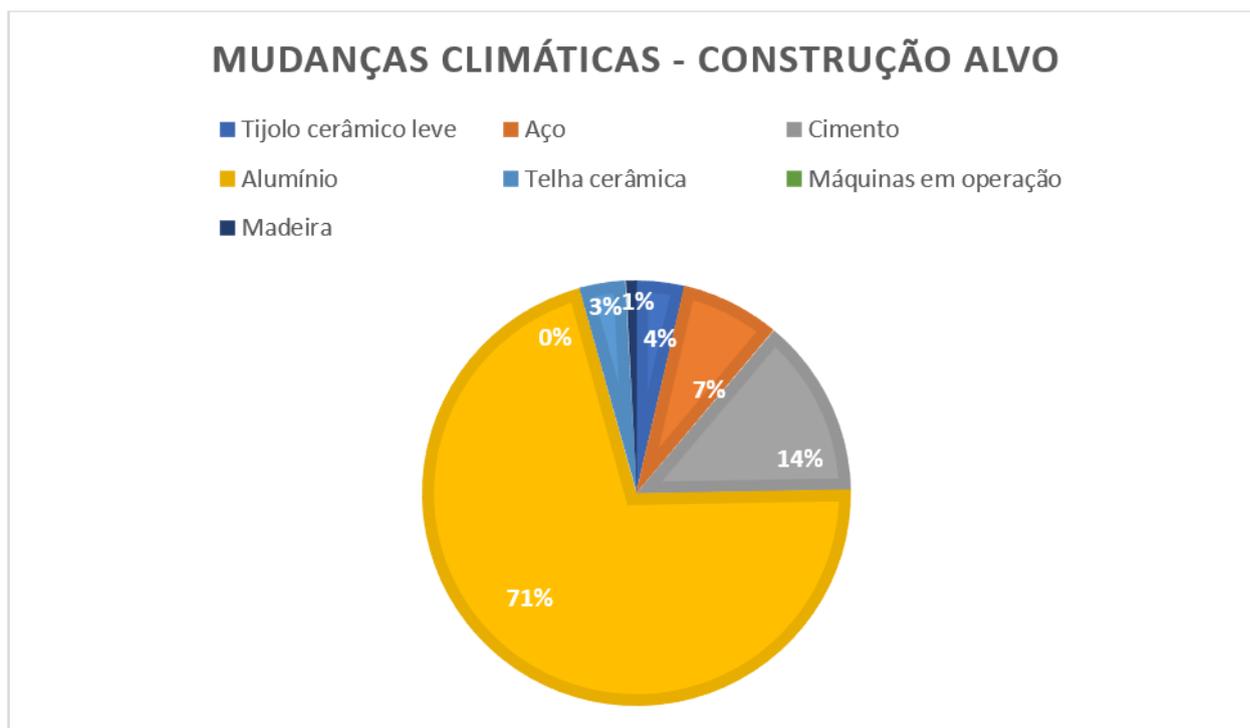


Gráfico 09: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário alvo nas mudanças climáticas, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.
Fonte: autora, 2025

Ao substituir-se os materiais, as esquadrias de PVC apresentaram maior contribuição na produção de CO₂, seguido do cimento com 23%, e o aço com 13% e a telha mineral com 8% (gráfico 10).

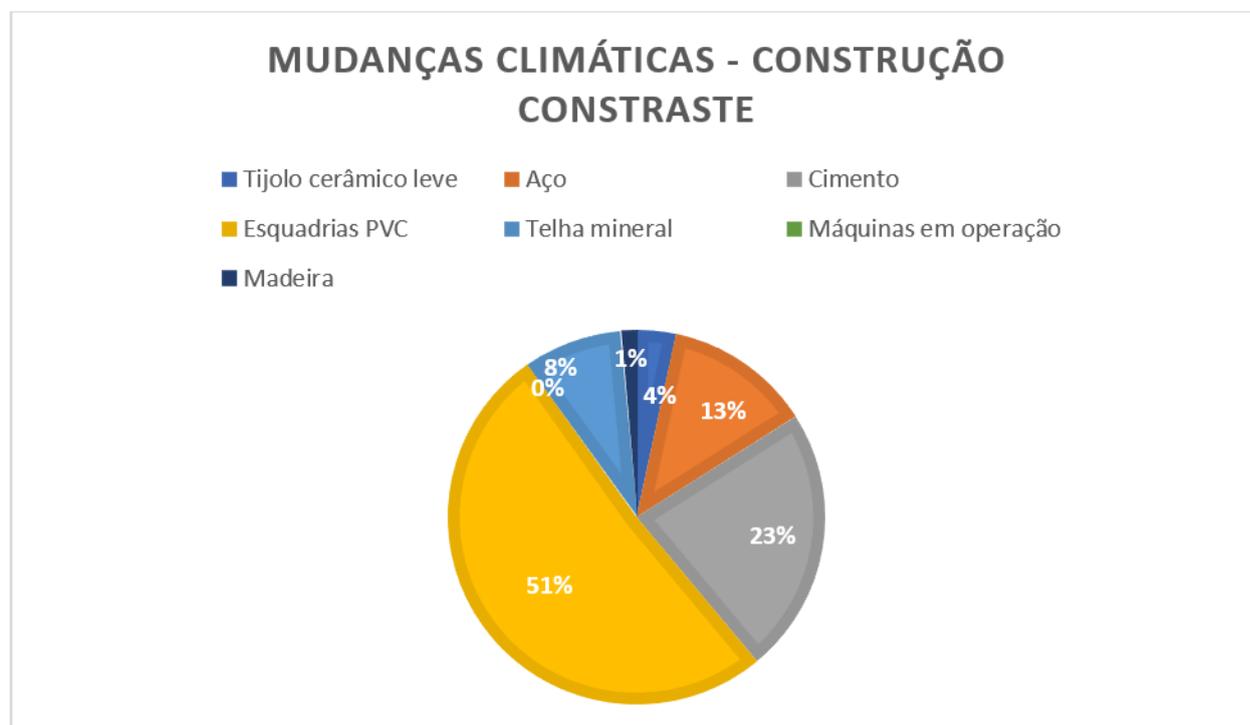


Gráfico 10: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário de contraste nas mudanças climáticas, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.
Fonte: autora, 2025

Porém quando analisam-se os valores obtidos nas avaliações do *software* SimaPro, temos o alumínio com 7,58E4 kgCO₂eq (75.800 kgCO₂eq), e as esquadrias de PVC com 3,24E4 kgCO₂eq (32.400 kgCO₂eq) , confirmando as pesquisas realizadas, as quais afirmam que o PVC é um material mais sustentável que o alumínio em utilizações na construção civil.

Ao adotar-se a unidade m² (metro quadrado) para as análises, e avaliando os valores obtidos no *software*, podemos concluir que a residência, que possui 189,44m², produz um total de 1,07E5 kgCO₂eq (107.000 kgCO₂eq), equivalente à 564,82 kgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado. E no cenário de constraste, com a substituição dos materiais, temos um total de 6,32E4 kgCO₂eq (63.200 kgCO₂eq), equivalente à 333,61 kgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado.

Valores os quais pode-se comparar no trabalho de Lima *et al* (2018), que em sua análise de ACV para uma residência de 80m² considerando apenas os materiais básicos: areia, cal, cimento, ferro/aço, madeira, brita, tijolo e telha, comumente produzidos muito perto da obra de destino, seguindo o método de Junior (2008), encontrou valores de 18.788,23kg de emissão de CO₂ na atmosfera.

Nas avaliações de danos referentes aos recursos naturais que são consumidos ou afetados durante o ciclo de vida de um produto ou processo, incluindo recursos renováveis (como água e madeira) e não renováveis (como minerais e combustíveis fósseis), bem como energia, chegou-se a conclusão de que no cenário alvo o alumínio teve a maior representatividade, com 75%, comparado aos outros materiais e processos, seguido do aço com 8% e o cimento com 6% (gráfico 11).

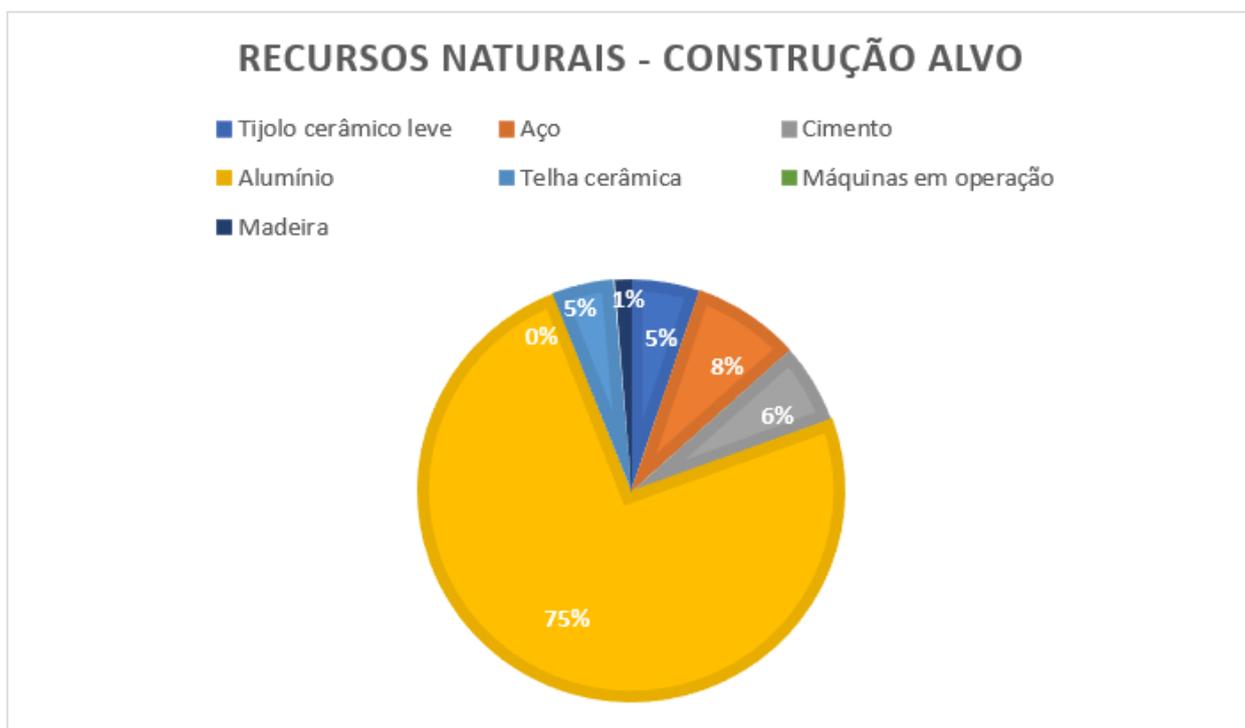


Gráfico 11: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário alvo no consumo de recursos naturais, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.
Fonte: autora, 2025

No cenário de constraste (gráfico 12), o PVC, substituto do alumínio neste cenário, apresentou o maior consumo com 68%, seguido pelo aço com 11%.

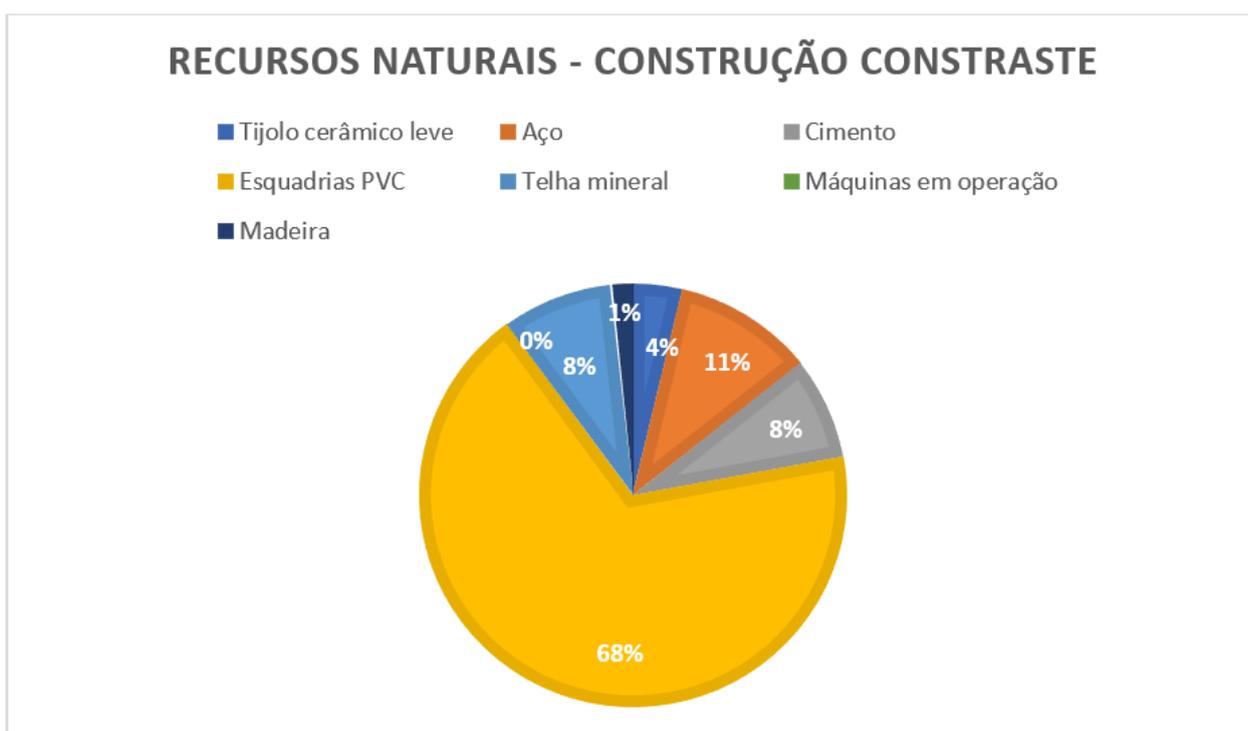


Gráfico 12: Porcentagem da contribuição dos materiais do cenário de constraste no consumo de recursos naturais, Método *Impact 2002+*, avaliação de danos.
Fonte: autora, 2025

E consumo de recursos equivalente no cenário atual foi de 1,21E6 MJ (1.210.000 MJ) totais, obtendo por metro quadrado um valor de 6.387,24 MJ/m², e ao substituir os materiais no cenário de constraste, os recursos totalizaram o equivalente à 9,35E5 MJ (935.000 MJ) total, chegando ao valor de 4.935,59 MJ/m².

A tabela a seguir apresenta os resultados referentes aos impactos de mudanças climáticas e de recursos naturais, compilados e organizados (tabela 10).

	MUDANÇAS CLIMÁTICAS		RECURSOS	
	Total (kgCO ² eq)	Por m ² (kgCO ² eq/m ²)	Total (kgCO ² eq)	Por m ² (MJ/m ²)
Cenário atual	1,07E5	564,82	1,21E6	6.387,24
Cenário de constraste	6,32E4	333,61	9,35E5	4.935,59

Tabela 12: Resultados finais sobre mudanças climáticas e recursos, totais e por metro quadrado.
Fonte: Autora.

Costa (2012), afirma que para setor da construção civil alinhar seu sucesso de crescimento às responsabilidades junto à sociedade, faz-se necessário adequar o contexto de desenvolvimento sustentável às práticas do ramo. Reafirmando o que os gráficos mostram, onde a substituição dos materiais por outros mais sustentáveis comprova que boas escolhas nas fases projetuais diminui os impactos ambientais, tornado-se uma obra que contribui com o futuro do planeta.

4.2 Comparação custo x benefício

Para os dois cenários de estudo, a comparação custo x benefício vem de encontro à Thompson (2015), que afirma que o *design* para a sustentabilidade trata da consideração do impacto de um produto ou serviço sobre as pessoas e o ambiente durante sua produção, uso e descarte.

Ferrolli *et al.*(2013) ainda afirma que a concepção de novos produtos exige a união de fatores técnicos, estéticos, ambientais e econômicos. Neste contexto, a escolha por materiais construtivos mais sustentáveis no cenário de constraste apresentou um total de R\$289.228,00 e no cenário atual R\$160.498,00, ou seja, representou 80% a mais nos valores para a construção da residência nos itens avaliados e substituídos.

O material que mais teve variação foi a telha cerâmica com valor de R\$ 2.220,00 para a telha mineral R\$38.828,00, aumento devido à combinação de manta asfáltica, fibra de vidro e grânulos minerais, o que resulta em um material mais complexo

e resistente, processo de fabricação, e benefícios oferecidos.

5 CONCLUSÕES

Na presente pesquisa, dados e informações pertinentes à sustentabilidade, energia empregada em processos e resíduos gerados pelo setor da construção civil, e como estes podem influenciar na cadeia da construção civil ficam mais evidentes. O presente trabalho teve como fio condutor a sustentabilidade e a sua permeabilidade por diversas esferas, sua interligação e seus efeitos, que por meio de estudos, pesquisas e *softwares* torna possível a aplicabilidade de conceitos e normativas que buscam preservar os recursos naturais existentes no planeta.

Os objetivos estabelecidos para esta pesquisa forneceram uma estrutura clara para a exploração dessas relações complexas. Analisar os efeitos ambientais dos materiais de construção mais cruciais na construção de residências: alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira, são os passos iniciais na busca por compreender e promover a sustentabilidade reduzindo os impactos gerados por tais processos.

No desenvolvimento da pesquisa, conceitos foram sendo trazidos à luz, processos sendo melhor compreendidos, materiais e programas sendo apresentados, com a finalidade de desenvolver um estudo de caso mais amplo, completo, e embasado em teorias e aplicável às construções brasileiras atuais.

Desejou-se que, ao longo do desenvolvimento da tese, que os dados coletados, quantitativos levantados, e análises feitas com o *software* SimaPro completassem as lacunas que existiam no estágio inicial da pesquisa, mostrando um caminho de melhoramento do Ciclo de Vida dos principais materiais que são resíduos da construção civil atualmente no Brasil.

Os dados revelaram que a substituição de materiais construtivos comumente utilizados como o alumínio, aço, cimento, cerâmica e madeira, trazem benefícios a médio e longo prazo em categorias relacionadas ao aquecimento global, mudanças climáticas, saúde humana, uso dos recursos renováveis e não renováveis e toxicidade a saúde humana. A exemplo, apresentou-se o PVC, tijolos cerâmicos leves e telhas minerais, contribuindo com a NBR 15.575.

Esta pesquisa inova ao trazer dados referentes aos materiais e seus substitutos, analisados não apenas nas questões de emissões de CO² e consumo de recursos, mas também sob a ótica da toxicidade, entre outras categorias aplicadas as construções residenciais, utilizando a unidade metro quadrado para a apresentação dos dados.

No cenário atual, chegou-se a valores totais 1,07E5 kgCO₂eq, equivalente à

564,82 kgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado. E no cenário de constraste, com um total de 6,32E4 kgCO₂eq, equivalente à 333,61 kgCO₂eq/m² de emissões por metro quadrado.

Quanto ao consumo de recursos no cenário atual foi de 1,21E6 MJ totais, resultando em 6.387,24 MJ/m², e ao substituir os materiais no cenário de constraste, os recursos totalizaram o equivalente à 9,35E5 MJ total, chegando ao valor de 4.935,59 MJ/m².

Na análise custo x benefício dos materiais utilizados no cenário atual e cenário de constraste, obteve-se valores bem superiores para o cenário de constraste, reforçando as constatações de que os materiais sustentáveis ainda precisam ganhar mais visibilidade, serem mais difundidos para o uso em obra, e conseqüentemente estarem mais próximos do consumidor final, para assim conseguirem valores atrativos e conseqüentemente terem maior utilização. Sua utilização e seus valores demonstraram serem inversamente proporcionais, onde a mais sustentável apresentou um valor 80% maior que uma sem o emprego de materiais com características sustentáveis.

Algumas limitações foram recorrentes, sejam referente aos dados utilizados referente à origem da matéria prima dos materiais da construção civil, falta de uma metodologia de construção no canteiro de obras seguida por pedreiros e mestres de obras de edificações de padrão mais simples, ou mesmo de mão de obra sem qualquer tipo de instrução ou que saiba meramente ler um projeto arquitetônico ou de estruturas.

As barreiras são diversas, sejam no campo da ciência, da tecnologia, das pesquisas, ou do canteiro de obras.

Futuras pesquisas devem se concentrar em acrescentar dados paupáveis à inventários, estender o estudo para outras regiões do Brasil ou outros estados para comparar os resultados e verificar a generalização das conclusões, e até mesmo o uso de georeferenciamento para captação de dados em obras já concluídas. É possível que se concentrem na avaliação dos impactos dos resíduos da construção civil quando depositados na natureza, na mitigação da poluição industrial ao longo do tempo através dos processos de obtenção de materiais, o que pode ajudar a avaliar a sustentabilidade a longo prazo, auxiliando as indústrias e organizações governamentais e não governamentais a tomar decisões relacionadas ao seu planejamento estratégico e a definir prioridades de produtos e processos.

Ainda, pesquisas futuras podem analisar políticas específicas e incentivos para promover a melhoria do ciclo de vida dos materiais da construção civil e avaliar sua eficácia, e também, explorar os impactos econômicos destas melhorias, considerando

custos e benefícios financeiros para as empresas construtoras e a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.

ABECIP. Construção civil visa ganho de eficiência. 2021. Disponível em <<https://www.abecip.org.br/imprensa/noticias/construcao-civil-visa-ganho-de-eficiencia>> Acesso em: 23 de julho 2024.

ABRAINCO – Associação Brasileira de Incorporadoras e Imobiliárias. **PIB da construção civil tem alta de 6,9% em 2022 e puxa crescimento da economia**. 2024. Disponível em: <<https://www.abrainco.org.br/construcao-civil/2023/03/02/pib-da-construcao-tem-alta-de-69-em-2022-e-puxa-crescimento-da-economia>>. Acesso em 25 de maio 2024.

ABRELPE. **Panorama 2022**. Disponível em <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>> Acesso em: 28 de maio 2024.

ACV Brasil, Avaliação do Ciclo de Vida e Indicadores de Sustentabilidade. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/>> Acesso em: 28 de maio 2024.

AIRES, E. K. S. **Sustentabilidade na construção civil: o caso de uma residência padrão popular**. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Civil da Uninovapapi. Piauí, 2019.

ALMEIDA, D. C. B.; CARNEIRO, A. M. P.; **Environmental impact of steel/concrete composite bridges and reinforced concrete bridges: a comparative analysis through life cycle assessment**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.25, 2025.

ARAÚJO, V.M. **Práticas recomendadas para a gestão mais sustentável de canteiros de obra**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

ATTIÈ, D.; SALGADO, F. de A.; **Avaliação do ciclo de vida na construção civil brasileira: análise de impactos ambientais**. Engineering Sciences. Dez. 2020 / março 2021. v. 9 n.1.

BARBISAN, A. O., SPADOTTO, A., DALLA NORA, D., LOPES TURELLA, E. C., & de WERGENES, T. N. **Impactos ambientais causados pela construção civil**. Unoesc & Ciência - ACSA, 2(2), 173–180, 2012.

BARBOSA JÚNIOR, A. F., MORAIS, M.R., EMERENCIANO, S.V., PIMENTA, D., HANDSON, C., GOUVINHAS, R.P. **Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil**. Revista Íbero-Americana de Estratégia. São Paulo, 2008.

BARCELOS, D. A. M., JONOV, C. M. P., SILVA, A. P., ROMEIRO FILHO, E., BARCELOS, H. J. **Principais barreiras à adoção de telhados verdes: uma revisão de literatura para evitá-las no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e136793, jan./dez. 2025.

BRIZOLLA, M.M.B., FILIPIN, R., WINDMOLLER, C. M., DA ROSA, F.S., A

sustentabilidade na construção civil. XIX Engema, 2017.

CALDEIRA-PIRES, A. **A avaliação do ciclo de vida: a ISO 14040 na América Latina.** Abipti, 2005.

CARVALHO, M.T.M., SPOSTO, R.M. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 207-225, jan./mar. 2012.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: Ferramenta gerencial da ISO 14000.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CHOI, Ahelstan K. Y., **A Screening Method for Life-Cycle Inventory Analysis for Industrial Material.** Dissertação de Mestrado. University of Windsor, 1994.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Diário Oficial da União no 136 de 17/07/2002.

COSTA, B. L. C., **Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil.** Dissertação de M. Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

COSTA, S. de F. C.; KOS, D.; **Aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida energético a uma residência em Belém-PA.** Cadernos de Arquitetura e Urbanismo. Paranoá 30. jan/jun. 2021.

CUNHA, K. S., ROBERTO, J.C.A., SOUTO, S.P., LIMA, S.C. **Resíduos sólidos na construção civil no Brasil.** Revista de Gestão e Secretariado - GeSec. São Paulo, 2023.

CURRAN, M. A. **The status of LCA in the USA.** Int. J. Life Cycle Assess., v. 4, p. 123-124, 1999.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional.** 2024. Recuperado de <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional>> Acesso em: 25 de maio 2024.

EVANGELISTA, P., TORRES, E., GONÇALVES, J. **A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de análise do desempenho ambiental de edificações.** XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2016.

FARIAS, E. E. V. de.; OLIVEIRA, R. de; SILVA, M. M. P. da; MELO, T. A. de; **Avaliação do ciclo de vida da construção civil habitacional brasileira.** Research, Society and Development, v.11, n.1, 2022.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues Ferreira. **Análise de ciclo de vida dos produtos.** Apostila do Instituto Politécnico de Viseu. 2004.

FERROLI, P.C. Machado; LIBREROTTO, Lisiane Ilha . **Materioteca com enfoque sustentabilidade no design de produtos.** Arcos Design. Rio de Janeiro, V. 7N. 1, Julho

2013.

GAMA, A. G. de O., **Análise ambiental e económica da produção de tijolos**. Dissertação de M. Sc., Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

GB/T51366, **Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China**. Carbon Emission Calculation Standards for Buildings, China Architecture & Building Press, Beijing, 2019.

GEHRKE, D. B. B.; QUEIROZ, M.; ALVES, G. T. L. M.; ROHDEN, A. B.; **Life Cycle Assessment: analysis of the contribution of Partial Portland Cement Replacement with RCCCV in reducing GHG Emissions**. Eng Sanit Ambient. v.30. 2025.

GOEDKOOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment – Methodology Report**. Netherlands: Pré Consultants, 2001. 132p. Disponível em: <http://www.pre.n1>. Acesso em: 05 Fev. 2025.

GUTIERREZ, M.B.G.P.S. **O setor de gás natural no Brasil: uma comparação com os países da OCDE**. Ipea, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Texto para discussão. Brasília, 2022.

INGWERSEN, Wesley M. et al. **A new data architecture for advancing in life cycle assessment**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 20, p. 520-526, 2015.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. 2006. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5509291/mod_resource/content/1/NBR%20ISO%2014040%20%202001%20%20Gest%C3%A3o%20Ambiental%20Ciclo%20de%20Vida.pdf Acesso em: 25 de maio 2024.

JUNIOR, T. S. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: Um estudo de caso de habitação de interesse social no Paraná**. Artigo apresentado no XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro – RJ, out. de 2008.

KEELER, Marian. BURKE, Bill. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

LASSIO, João Gabriel Gonçalves de. **Aplicação do Programa SimaPro na Avaliação dos Ciclos de Vida dos Materiais da Construção Civil: Estudo de Caso para um Conjunto Habitacional**. João Gabriel Gonçalves de Lássio – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

LIMA, Emerson Medeiros de. FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos. DANTAS, Simplicia Luana. **Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC' 2018. Maceió, ago. de 2018.

LIU, Y., ZHANG, J., XU, J., WANG, Y. LI, B., ZHANG, S. **Carbon emission-based life cycle assessment of rural residential buildings constructed with engineering bamboo: A case study in China**. Journal of Building Engineering, 76, 2023.

MARQUES, C. T.; GOMES, B. M. F.; BRANDLI, L. L. **Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 79-90, out./dez. 2017.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A.; **Contribuição para a avaliação do ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, abr/jun. 2018.

MENEGATTI, L.C., CALDAS, L.R., TOLEDO FILHO, R.D. **Projetar para desmontar: revisão sobre a avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de estruturas de concreto.** Mix Sustentável, v.9, n.2, p.157-170. Florianópolis, 2023.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Eficiência energética em edifícios: um importante vetor de desenvolvimento.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/eficiencia-energetica-em-edificios-um-importante-vetor-de-desenvolvimento>> Acesso em: 25 de maio 2024.

NASCIMENTO, E. R., MORAES, D. P. F., LOPES, S. C. **Sustentabilidade na construção civil: uma revisão da literatura.** Research, Society and Development, v. 11, n. 14, 2022.

ONU – Organização das Nações Unidas. **News.** 2022. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805122>> Acesso em: 25 de maio 2024.

ROMEIRO, A.R. **Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica.** Dossiê Sustentabilidade, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ea/a/F9XDcdCSWRS9Xr7SpknNJPv/#>> Acesso em: 23 de julho 2024.

SANTOS, L. M. M. **Avaliação ambiental de processos industriais** 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2006.

SEIFFERT, M. E. B. ISO 14001. **Sistemas de Gestão Ambiental. Implantação Objetiva e Econômica.** Atlas, 4 edição. 2008.

SILVA, Dhanilo Bacellar Mascarenhas *et al.* **Análise comparativa entre alvenaria estrutural e concreto armado.** REMAS-Revista Educação, Meio Ambiente e Saúde, v. 7, n. 4, p. 103-118, 2018.

SILVA, José Igor Gonçalves da. **Vergalhões de GFRP em substituição aos de aço na armadura de concreto armado.** Revista Foco, v.17, n.3. Curitiba, 2024.

SILVA, G.A.; RIBEIRO, P.H.; KULAY, L.A. **Avaliação do Desempenho Ambiental dos Fertilizantes Químicos no Brasil.** In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2006, Santos. Anais. São Paulo, 2006. 12 p.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil.

Cadernos técnicos do grupo. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2024.

SOBRINHO, C. A. **Desenvolvimento sustentável: uma análise a partir do Relatório Brundtland. Dissertação** Faculdade de Filosofia e Ciências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Marília, São Paulo, 2008.

SOUZA, Anna Freitas Portela de. **A sustentabilidade no uso da madeira de floresta plantada na construção civil.** Universidade Estadual de Santa Catarina. 2010.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TCPO, **Tabelas de Composições de Preços Para Orçamentos.** Pini, 14 edição. 2012.

TEODORO, M. I. T. De M. **Energia embutida na construção de edificações no Brasil: contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul.** Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

THOMPSON, Rob. **Materiais Sustentáveis, Processos e Produção.** São Paulo: Editora Senac, 2015.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C.A. da. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** Produção, v.23, n.2. Abr./jun. 2023.

WITICOVSKI, L. C.; WOSCH, L. V. J.; AZEVEDO, N. C.; FREITAS, M. C. TAVARES, S.; **Avaliação do ciclo de vida de habitação residencial brasileira utilizando o software *athena impact estimator for buildings*.** 3º Congresso Luso-Brasileiro – materiais de construção sustentáveis . Coimbra. 2018.

Y. Liu. *et al.* **Carbon emission-based life cycle assessment of rural residential buildings constructed with engineering bamboo: A case study in China.** Journal of Building Engineering. V. 76, 2023.