

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIANA BORGES OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA DEMOLIÇÃO SELETIVA NA
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS SOB A ÓPTICA
DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

SÃO CARLOS

2024

MARIANA BORGES OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA DEMOLIÇÃO SELETIVA NA REDUÇÃO DE IMPACTOS
AMBIENTAIS SOB A ÓPTICA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia

SÃO CARLOS

2024

Borges Oliveira, Mariana

Influência da demolição seletiva na redução de impactos ambientais sob a óptica da Avaliação do Ciclo de Vida / Mariana Borges Oliveira -- 2024.
101f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Fernando Menezes de Almeida Filho

Banca Examinadora: Cristiane Bueno, Antonio de Paulo Peruzzi

Bibliografia

1. Demolição seletiva. 2. Resíduos de Construção e Demolição. 3. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Borges Oliveira, Mariana. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Mariana Borges Oliveira, realizada em 29/02/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho (UFSCar)

Profa. Dra. Cristiane Bueno (UFSCar)

Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi (UFU)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

*À minha avó,
Juvercina Maria de Jesus
(in memoriam)*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por ser minha fortaleza e meu guia nas estradas da vida.

Aos meus pais, Ana Clúdia e Reiner, pelo incondicional apoio, por acreditarem no meu potencial e por nunca medirem esforços pela minha educação.

Às minhas avós, Hélia e Juercina, que ao longo de suas vidas trabalharam incansavelmente para proporcionar um futuro melhor à nossa família. Chego aqui graças à força e determinação delas.

Ao meu companheiro, Luiz Eduardo, por trazer alegria aos meus dias e por seu constante incentivo e apoio ao longo desta jornada.

À Universidade Federal de São Carlos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), expresso minha gratidão pela oportunidade de realizar meu mestrado, e por toda a infraestrutura disponível.

Ao meu orientador, prof. Dr. Fernando Menezes, pela compreensão, paciência e pela disposição em oferecer orientação da melhor maneira possível.

Aos meus amigos, pelo carinho e pela presença ao longo destes dois anos.

À CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

"Até aqui nos ajudou o Senhor"

1 Samuel 7:12

Resumo

OLIVEIRA, M. B. **Influência da Demolição Seletiva na Redução de Impactos Ambientais sob a Óptica da Avaliação do Ciclo de Vida.** 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas e Construção Civil)) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

A preocupação com os resíduos gerados por processos de demolição tem impulsionado a busca por métodos mais sustentáveis para essa prática. No Brasil, desde o cancelamento da ABNT NBR 5682:1977, em 2008, há uma carência de diretrizes normativas de âmbito nacional que discorram sobre os cuidados relativos aos processos de demolição e à destinação dos resíduos gerados. O descarte inadequado dos materiais de construção propicia riscos à saúde humana e ao meio ambiente devido a presença de substâncias tóxicas. Utilizando o conceito da economia circular, a demolição seletiva permite o desmonte cuidadoso de materiais e elementos construtivos, maximizando seu reaproveitamento. Essa técnica que visa a recuperação desses produtos por meio de processos de restauração ou reciclagem, reduzindo assim os impactos ambientais associados a essa prática. O presente trabalho apresenta uma análise comparativa entre uma edificação construída com materiais novos e outra construída com insumos resultantes da demolição seletiva, por meio da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite avaliar os impactos ambientais potenciais de um produto durante o seu ciclo de vida. Os resultados deste estudo indicam que a utilização de resíduos provenientes da demolição seletiva pode resultar em uma significativa redução de impactos ambientais. No entanto, é necessário realizar uma análise específica para cada escopo, considerando diversos fatores, desde os processos utilizados na recuperação até a quantidade permitida e viável de ser empregada em novos produtos.

Palavras-chaves: Demolição; Demolição Seletiva; Resíduos de Construção e Demolição; Avaliação do Ciclo de Vida; Habitação de Interesse Social.

Abstract

OLIVEIRA, M. B. **Influence of Selective Demolition on the Reduction of Environmental Impacts from the Perspective of Life Cycle Assessment.** 100 p. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering (Structures and Construction)) – Department of Civil Engineering, Federal University of São Carlos, São Carlos, 2024.

The concern about waste generated by demolition processes has driven the search for more sustainable methods for this practice. In Brazil, since the cancellation of ABNT NBR 5682:1977 in 2008, there has been a lack of national normative guidelines addressing the care related to demolition processes and the disposal of generated waste. Improper disposal of construction materials poses risks to human health and the environment due to the presence of toxic substances. Using the concept of circular economy, selective demolition allows for the careful dismantling of materials and construction elements, maximizing their reuse. This technique, aimed at recovering these products through restoration or recycling processes, thereby reduces the environmental impacts associated with this practice. This study presents a comparative analysis between a building constructed with new materials and another constructed with inputs resulting from selective demolition, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which evaluates the potential environmental impacts of a product throughout its life cycle. The results of this study indicate that the use of waste from selective demolition can result in a significant reduction in environmental impacts. However, a specific analysis is necessary for each scope, considering various factors, from the processes used in recovery to the quantity allowed and feasible to be used in new products.

Keywords: Demolition; Selective Demolition; Construction and Demolition Waste; Life Cycle Assessment; Housing of Social Interest.

Lista de Figuras

Figura 2.1	– Etapas do modelo da economia linear	25
Figura 2.2	– Etapas do modelo da economia circular	26
Figura 2.3	– Coleta de RCD nos estados brasileiros em 2022 (em toneladas)	29
Figura 2.4	– Massa de RCC gerada por classe no ano de 2019 (em toneladas)	31
Figura 2.5	– Tipo de destinação adotada para os RCC no ano de 2019 (em toneladas)	31
Figura 2.6	– Fluxograma da gestão de resíduos de acordo com a Resolução CONAMA N° 307/2002	32
Figura 3.1	– Fases de uma ACV	35
Figura 4.1	– Condomínio de casas da CDHU	42
Figura 4.2	– Vista frontal da residência R1-B	42
Figura 4.3	– Planta baixa da residência R1-B	43
Figura 4.4	– Vista lateral da residência R1-B	44
Figura 4.5	– Planta de cobertura da residência R1-B	44
Figura 4.6	– Balanço de massa do processo de produção do alumínio primário	48
Figura 4.7	– Composição do vidro	50
Figura 4.8	– Fronteira do sistema do bloco de concreto	55
Figura 4.9	– Fronteira do sistema do bloco de concreto com ACR	56
Figura 4.10	– Fronteira do sistema da esquadria de alumínio	57
Figura 4.11	– Fronteira do sistema da esquadria de alumínio reciclada	59
Figura 4.12	– Fronteira do sistema da telha cerâmica	60
Figura 4.13	– Fronteira do sistema da telha cerâmica restaurada	61
Figura 4.14	– Visão geral da estrutura ReCiPe 2016	62
Figura 4.15	– Matriz energética do Brasil	63
Figura 4.16	– Matriz energética da Áustria	63
Figura 5.1	– Contribuição dos materiais do bloco de concreto nas categorias de impacto	70
Figura 5.2	– Contribuição dos materiais da esquadria metálica nas categorias de impacto	72
Figura 5.3	– Contribuição dos materiais da telha cerâmica nas categorias de impacto	74
Figura A.1	– Demolição manual com marreta	87

Figura A.2 – Demolição mecânica utilizando escavadeira com rompedor	87
Figura A.3 – Demolição mecânica utilizando bola de demolição	89
Figura A.4 – Demolição de arquibancada de estádio esportivo por tração de cabos puxadores .	90
Figura A.5 – Demolição química por argamassa expansiva	91
Figura A.6 – Demolição de chaminés da Central Elétrica de Cockenzie por meio de explosivos	92
Figura A.7 – Demolição em elemento de concreto por corte com lança térmica	93
Figura A.8 – Hidro-demolição com jato d’água	94
Figura A.9 – Demolição de superfície de concreto com fio diamantado	95

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Comparativo entre normas, cartilhas e manuais de boas práticas de demolição . . .	24
Quadro 3.1 – Estágios da ACV de uma edificação	38
Quadro 4.1 – Componentes construtivos da Residência 2	40

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Materiais utilizados para a fabricação de blocos de concreto	45
Tabela 4.2 – Consumo de energia dos equipamentos	45
Tabela 4.3 – Materiais utilizados para a fabricação dos blocos de concreto	46
Tabela 4.4 – Gastos energéticos das etapas de produção do alumínio	49
Tabela 4.5 – Quantitativo de esquadrias	49
Tabela 4.6 – Consumo energético para a produção de alumínio	50
Tabela 4.7 – Materiais utilizados para a fabricação do vidro	51
Tabela 4.8 – Distância de transporte dos materiais	53
Tabela 4.9 – Distância de transporte dos materiais da esquadria metálica	53
Tabela 4.10 – Vida Útil de Projeto (VUP)*	54
Tabela 4.11 – Materiais para a construção da Residência 1	64
Tabela 4.12 – Materiais para a construção da Residência 2	64
Tabela 4.13 – Consumo energético para a fabricação dos produtos	65
Tabela 4.14 – Peso × Distância de transporte dos materiais para a Residência 1	65
Tabela 4.15 – Peso × Distância de transporte dos materiais para a Residência 2	66
Tabela 5.1 – Redução dos impactos ambientais devido à utilização de ACR	69
Tabela 5.2 – Redução dos impactos ambientais devido à reciclagem das esquadrias	71
Tabela 5.3 – Redução dos impactos ambientais devido à reutilização das telhas cerâmicas	73

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACR	Agregado de Concreto Reciclado
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AS 2601	<i>AS 2601:2001 - The Demolition of Structures</i> (Austrália)
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BS 6187	<i>BS 6187:2011 - Code of Practices for Demolition</i> (Inglaterra)
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CDHU	Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CFR 1926	<i>29 CFR 1926 Subpart T: 2016</i> (Estados Unidos)
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSA:1980	<i>CSA:1980 (R2003) - Code of Practice for Safety in Demolition of Structures</i> (Canadá)
Deciv	Departamento de Engenharia Civil
ESAF	Escola de Administração Fazendária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Life Cycle Data System</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Técnica Brasileira
Nm ³	Metro Cúbico Normal
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NR	Norma Regulamentadora
PMGRCC	Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGECiv	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PRé	<i>Pre Consultants</i>
R1-B	Residência Unifamiliar Padrão Baixo
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RIVM	Instituto Nacional Holandês de Saúde Pública e Meio Ambiente
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
t	Tonelada
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
VUP	Vida Útil de Projeto

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de Pesquisa	17
1.2	Objetivo	17
1.3	Estrutura da Dissertação	17
2	DEMOLIÇÃO	19
2.1	Demolição no Brasil	21
2.2	Códigos Normativos Internacionais	22
2.3	Demolição Seletiva e Economia Circular	25
2.4	Gestão de RCD no Brasil	28
3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	34
4	METODOLOGIA	39
4.1	Estratégia de Pesquisa	39
4.2	Aplicação Prevista	40
4.3	Público-alvo	41
4.4	Escopo	41
4.4.1	Função	41
4.4.2	Unidade Funcional	41
4.4.3	Detalhamento do Projeto de Estudo	41
4.4.4	Fluxo de Referência	45
4.4.5	Escopo Geográfico	52
4.4.6	Escopo Tecnológico	53
4.4.7	Escopo Temporal	53
4.4.8	Estrutura de Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)	54
4.4.9	Fronteiras dos Sistemas	54
4.4.10	Categorias de Impacto	61
4.4.11	Mix Energético	62
4.5	Inventário de Ciclo de Vida (ICV)	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1	Blocos de Concreto	69
5.2	Esquadrias Metálicas	71
5.3	Telhas Cerâmicas	73
5.4	Discussão dos Resultados	75
6	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	85
	APÊNDICE A – TÉCNICAS DE DEMOLIÇÃO	86
A.1	Demolição Manual	86
A.2	Demolição Mecânica	87
A.3	Demolição por Métodos Químicos	90
A.4	Demolição por Métodos Térmicos	92
A.5	Demolição por Métodos Abrasivos	93
	APÊNDICE B – CATEGORIAS DE IMPACTO <i>RECIPE 2016 MID-POINT (H)</i>	97

1 Introdução

Os resíduos de construção e demolição (RCD) constituem uma grande parcela dos resíduos sólidos produzidos pelo ser humano (Yazdanbakhsh, 2018). Estima-se que aproximadamente 40% de todas as matérias-primas obtidas da litosfera sejam consumidas pelo setor de construção, representando quase 50% das emissões globais de gases de efeito estufa (Ruuska; Häkkinen, 2014; Bribián; Capilla; Usón, 2011).

Os materiais que compõem o sistema construtivo de uma edificação exercem uma influência direta nos impactos ambientais causados pela mesma. Isso se deve, inicialmente, aos seus processos de extração da natureza e fabricação, em seguida pelo seu desempenho térmico, acústico, lumínico e operacional durante a fase de uso do edifício e, por fim, devido a sua destinação após o fim do ciclo de vida da construção. Por isso, ao associar a seleção de materiais de baixo impacto ambiental com o uso de tecnologia aplicada à construção civil, é possível atender à crescente demanda desse mercado por alternativas mais sustentáveis (Maidel, 2020).

O âmbito do desenvolvimento sustentável é tradicionalmente segmentado em quatro elementos fundamentais: sustentabilidade ambiental, sustentabilidade econômica, sustentabilidade sociopolítica e sustentabilidade cultural. Todavia, conforme argumentado por Rupprecht *et al.* (2020), quando a abordagem se limita a considerar a natureza meramente como um recurso, o conceito de sustentabilidade falha em reconhecer a interdependência vital entre seres humanos e outras formas de vida, essenciais para o bem-estar mútuo. Tendo isso em vista, os autores propõem a introdução do conceito de "sustentabilidade multiespécies". Esse termo foi proposto como uma abordagem inovadora que visa atender às diversas e mutáveis necessidades de todas as espécies no presente, com uma perspectiva reconhece a interdependência e inseparabilidade entre diferentes formas de vida, destacando a importância de promover práticas sustentáveis que não apenas beneficiem o bem-estar atual, mas também aprimorem a capacidade das gerações futuras, de todas as espécies, para satisfazerem suas próprias necessidades de maneira equitativa e duradoura.

Nesse contexto, a demolição seletiva, ou desconstrução, surge como uma alternativa sustentável a ser implementada no fim de vida de edificações. Paiva (2019) define a demolição seletiva como o desmantelamento sistêmico de uma edificação, que implica a sequenciação das atividades de demolição para maximizar a recuperação de matérias e componentes para reutilização ou reciclagem.

A demolição seletiva maximiza a eficiência na gestão de resíduos ao reutilizar materiais aproveitáveis e, por consequência, diminuir significativamente seu impacto ambiental (Zanni *et al.*, 2018). Ao adotar essa abordagem, é possível potencializar o reaproveitamento de produtos de uma edificação quando essa chega ao seu fim de vida, evitando assim o descarte desses materiais em aterros de inertes e os consequentes impactos ambientais dessa prática, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos. Além disso, ao reutilizar esses produtos na construção de novos empreendimentos, há uma redução dos impactos ambientais da extração e fabricação de novas matérias-primas.

Para estudar os impactos ambientais do fim de vida de um edifício e identificar os melhores cenários para desconstrução e gestão de resíduos, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se destaca como uma metodologia útil e eficiente (Butera; Christensen; Astrup, 2015; Quéheille *et al.*, 2022). Um estudo de ACV tem por objetivo avaliar os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um produto, desde a extração dos recursos naturais até o uso e sua disposição final (ABNT NBR ISO 14040:2014).

O enfoque no ciclo de vida desempenha um papel crucial na tomada de decisão em relação à melhor tecnologia disponível, contribuindo para a redução do impacto ambiental das edificações. Seja durante a fase de concepção ou reabilitação, ao considerar todo o ciclo de vida do empreendimento, é possível adotar medidas mais eficientes e sustentáveis (Bribián; Usón; Scarpellini, 2009; Malmqvist *et al.*, 2011). Por esse motivo, nas últimas duas décadas, houve um crescente interesse na aplicação da ACV na área da construção, refletido pelo aumento exponencial no número de artigos e estudos realizados.

Durante toda a vida útil de uma edificação, a maior parte dos resíduos é produzida justamente no seu fim de vida (Quéheille *et al.*, 2022). Por essa razão, é fundamental desenvolver práticas de desconstrução sustentáveis, que permitam uma melhor gestão dos resíduos gerados, buscando minimizar o impacto ambiental e promovendo a economia circular.

Com base na revisão bibliográfica sistemática sobre ACV de RCD realizada por Mesa, Fúquene-Retamoso e Maury-Ramírez em 2021, a maioria das pesquisas se dedica à reciclagem de concreto ou agregados de diversas fontes. Nesse contexto, os autores ressaltam a importância de serem apresentadas novas abordagens que ofereçam estratégias alternativas de economia circular, como reparação ou reutilização, visando evitar o reprocessamento de RCD, que pode ser mais dispendioso em termos de custos e impactos ambientais.

O conceito de demolição seletiva ainda é pouco explorado no Brasil, juntamente com suas técnicas e os benefícios ambientais que essa prática pode proporcionar. Portanto, é necessário

que esse método seja explorado do ponto de vista de seu impacto ambiental, a fim de justificar e promover sua aplicação com base nos princípios da sustentabilidade na construção civil.

1.1 Problema de Pesquisa

Esta pesquisa visa responder ao seguinte questionamento: Qual é a magnitude da redução do impacto ambiental proporcionada pela reutilização e reciclagem de resíduos provenientes da demolição seletiva?

1.2 Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a redução dos impactos ambientais por meio da demolição seletiva, contribuindo para que essa prática se consolide como uma proposta sustentável e eficiente a ser implementada ao fim de vida de edificações.

Objetivos específicos

- Realizar uma análise comparativa entre duas habitações de interesse social, uma construída com materiais novos e outra construída com insumos provenientes da demolição seletiva;
- Avaliar três cenários distintos para a reintrodução de RCD no ciclo econômico: reciclagem parcial, reciclagem total e reutilização.
- Avaliar o ciclo de vida de seis produtos de construção civil, a saber: bloco de concreto, bloco de concreto com agregado de concreto reciclado (ACR), esquadrias metálicas, esquadrias metálicas recicladas, telhas cerâmicas e telhas cerâmicas restauradas. Essa análise incluirá a quantificação dos impactos ambientais associados a cada fase do ciclo de vida desses produtos, utilizando a metodologia da ACV.

1.3 Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação é apresentada de maneira a acompanhar as etapas desenvolvidas durante o trabalho. Dessa maneira, a composição deste estudo é dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução: é realizada a apresentação do tema e da problemática a ser abordada, assim como são delineados a justificativa e os objetivos desta pesquisa;

- Capítulo 2 - Demolição: este capítulo aborda os métodos de demolição, explora os conceitos de demolição seletiva e economia circular, e analisa a demolição e a gestão de resíduos no contexto brasileiro;
- Capítulo 3 - Avaliação do Ciclo de Vida: são discutidos os conceitos fundamentais e a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV);
- Capítulo 4 - Metodologia: este capítulo detalha a metodologia aplicada para responder à problemática de pesquisa e alcançar os objetivos do estudo;
- Capítulo 5 - Resultados e Discussões: apresenta os resultados obtidos, seguidos de interpretações e análises, incluindo uma exploração das limitações do estudo;
- Capítulo 6 - Conclusões: são apresentadas as considerações finais em relação à pesquisa desenvolvida, destacando os resultados obtidos, seguido de sugestões para futuras pesquisas.

Ao final, são listadas as referências bibliográficas utilizadas na realização da pesquisa, e o Apêndice A contém as descrições detalhadas das categorias de impacto ambiental avaliadas no estudo.

2 Demolição

Entende-se por demolição o processo de fragmentação planejada de elementos de construção. A Engenharia de Demolições é um ramo da Engenharia Civil que envolve o planejamento, a supervisão e a execução de projetos de demolição de estruturas. É a área que se ocupa com a remoção segura e eficiente de demolições, levando em consideração aspectos técnicos, ambientais, econômicos e de segurança. Para isso, ela requer conhecimentos especializados, certificando que o método de demolição seja executado de forma controlada e com o supervisionamento correto, minimizando riscos e impactos negativos ao meio ambiente e a todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente nesse processo. Alguns dos aspectos envolvidos no contexto da demolição de edificações incluem:

- **Avaliação estrutural:** Antes da demolição, é importante que seja realizada uma avaliação detalhada da estrutura para entender sua estabilidade, materiais utilizados, presença de substâncias perigosas, entre outros fatores. Essa avaliação auxilia na escolha e no planejamento do método de demolição mais adequado;
- **Planejamento e projeto:** A engenharia de demolições requer um planejamento cuidadoso e detalhado. Isso envolve a definição dos métodos e equipamentos a serem utilizados, cronograma, gerenciamento de resíduos, avaliação dos riscos envolvidos e adoção de medidas de segurança adequadas;
- **Seleção de técnicas de demolição:** Existem diferentes técnicas de demolição disponíveis, como demolição manual, mecânica, por implosão, entre outras. A escolha da técnica dependerá do tipo de estrutura, acesso ao local, restrições ambientais, segurança e custos envolvidos;
- **Gestão de resíduos:** Durante a demolição, é gerada uma quantidade significativa de resíduos. A engenharia de demolições envolve a implementação de práticas adequadas de gestão de resíduos, visando a reciclagem, reutilização ou descarte adequado dos materiais, seguindo as regulamentações ambientais vigentes;
- **Segurança e controle de riscos:** A segurança é uma consideração essencial na engenharia de demolições. É necessário identificar e controlar os riscos associados ao processo, incluindo

a segurança dos trabalhadores, a segurança pública e a prevenção de danos a estruturas vizinhas;

- Monitoramento e supervisão: Durante a demolição, é importante realizar monitoramento e supervisão contínuos para garantir que o processo ocorra conforme o planejado, identificar eventuais problemas e ajustar as estratégias, se necessário.

De acordo com Brito *et al.* (1999), a demolição se faz necessária nos seguintes casos:

- Fim da vida útil;
- Adaptação a novos usos;
- Reforço estrutural;
- Alterações de projeto;
- Incompatibilidade entre projetos;
- Regularização de construções;
- Anomalias de durabilidade;
- Risco de colapso;
- Deterioração da edificação;
- Catástrofes naturais e acidentes.

Segundo Gomes (2010), diante das limitações do espaço de trabalho, das regulamentações vigentes e dos requisitos específicos das atividades, torna-se necessário desenvolver e implementar planos de segurança e saúde para a execução de demolições. Isso inclui a elaboração de um plano de demolição que contenha uma descrição detalhada e sequencial das atividades a serem executadas, juntamente com as medidas preventivas de segurança.

Sá (2013) ressalta que a demolição é uma atividade de grande risco, complexa e única, no qual é necessário o conhecimento técnico, tomada de precauções, respeito a regulamentação e definição das medidas de segurança adequadas, a fim de evitar riscos às vidas humanas e danos ao meio ambiente, considerando que existem componentes perigosos, como amianto e materiais particulados que, quando descartados inadequadamente, provocam impactos negativos no meio ambiente.

2.1 Demolição no Brasil

No Brasil, a execução dos serviços de demolição ocorre por meio de métodos sem critérios científicos e, muitas vezes, sem o devido resguardo técnico (Martins, 2019). Isso acarreta uma série de falhas nos processos de demolição, além de riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Em 2008, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) cancelou a NBR 5682, de 1977, norma que regulamentava o contrato e oferecia diretrizes para licenciamento e execução de demolições, com a justificativa que essa não era mais utilizada pelo setor. No entanto, Martins (2017), em sua pesquisa "Diretrizes para o Planejamento de uma Demolição Sustentável", de 2017, entrou em contato com o engenheiro e professor Paulo Grandiski, membro de comissões de estudo das Normas Técnicas da ABNT, para entender o motivo do cancelamento da referida norma. De acordo com o diálogo, a razão para sua anulação parece ser inconclusiva, pois segundo o professor, a norma foi cancelada sem o seu consentimento. Ademais, houve a promessa de que a mesma seria substituída pela tradução da norma americana. Entretanto, até os dias atuais, o Brasil segue sem uma diretriz normativa de demolição de âmbito nacional.

Atualmente, a Norma Regulamentadora NR 18, intitulada "Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção", oferece algumas diretrizes e instruções sobre as práticas que devem ser empregadas antes, durante e após as atividades de demolição. As NR's têm por objetivo promover uma maior segurança ao ambiente de trabalho. Embora não possuam força de lei, foram criadas para dar suporte à Lei nº 6.541, de 22 de dezembro de 1977, a qual trata sobre a Consolidação das Leis do Trabalho, Relativo a Segurança e Medicina do Trabalho. Ainda assim, a NR 18-5, diferentemente da ABNT NBR 5682:1977, não discorre sobre as condições exigíveis para contratação e licenciamento de trabalhos de demolição, nem sobre seus métodos de execução.

A falta de regulamentação das práticas de demolição na construção civil pode acarretar diversos problemas, entre eles:

- Riscos de segurança: a falta de medidas de segurança pode levar a acidentes e lesões no local de trabalho, desabamentos de estruturas, perigo para a população devido à falta de sinalização e bloqueios adequados, além do uso negligente de materiais perigosos.
- Impacto ambiental: demolições não regulamentadas podem resultar em excesso de poeira, ruído e poluição do ar. Além disso, materiais perigosos, como amianto ou tintas à base

de chumbo, podem ser manuseados incorretamente, liberando toxinas no meio ambiente. Outro grave problema relacionado ao impacto ambiental é o descarte inadequado de detritos de demolição, que afeta negativamente os ecossistemas e contribui para a poluição terrestre e aquática, o que, por consequência, gera danos à saúde humana;

- Danos estruturais a edifícios vizinhos: uma das funções da regulamentação é a determinação da atuação de profissionais adequados para o acompanhamento das atividades de demolição. Dessa forma, demolições realizadas sem supervisão profissional adequada podem causar danos não intencionais às estruturas adjacentes. Vibrações, queda de detritos ou atividades de escavação podem enfraquecer ou comprometer a integridade estrutural de edifícios próximos, apresentando riscos aos ocupantes e propriedades vizinhas;
- Estética urbana e preservação do patrimônio: demolições não regulamentadas podem levar à destruição de estruturas historicamente ou culturalmente significativas, apagando o patrimônio e a identidade arquitetônica de uma comunidade, o que gera um prejuízo a sua herança cultural;
- Falta de responsabilidade e transparência: A ausência ou displicência no emprego dos regulamentos pode criar um ambiente de responsabilidade limitada e falta de transparência no processo de demolição. Isso dificulta a responsabilização por quaisquer danos, acidentes ou danos ambientais que possam ocorrer.

Para mitigar esses problemas, é essencial estabelecer e implementar regulamentos abrangentes que englobem protocolos de segurança, considerações ambientais, preservação do patrimônio cultural e o bem-estar e segurança da comunidade em todas as fases dos processos de demolição. Destaca-se, ainda, a importância de desenvolver tais regulamentos em consulta com especialistas do campo, visando assegurar uma abordagem equilibrada que atenda às necessidades de todas as partes envolvidas.

2.2 Códigos Normativos Internacionais

Na esfera internacional, existem alguns códigos normativos que abrangem muitas categorias referentes às práticas de demolição, os cuidados a serem tomados para a garantia da segurança e saúde dos trabalhadores e da comunidade, assim como os procedimentos necessários na pré e pós-demolição. Os autores Martins (2017) e Martins (2019) conduziram uma revisão

bibliográfica das seguintes normas, cartilhas e instruções técnicas nacionais e internacionais que abordam o projeto e os procedimentos adequados para serviços de demolição de estruturas:

- *29 CFR 1926 - Safety and Health Regulations for Construction - Subpart T: Demolition 2016* (Estados Unidos)
- *ABNT NBR 5682:1977 - Contratação, Execução e Supervisão de Demolições* (Brasil)
- *AS 2601:2001 - The Demolition of Structures* (Austrália)
- *Best Practice Guidelines for Demolition in New Zealand: 2013* (Nova Zelândia)
- *BS 6187:2011 – Code of Practices for Demolition* (Inglaterra)
- *Code of Practices for Demolitions of Buildings: 2004* (China)
- *CSA 1980 - CSA:1980 (R2003) - Code of Practice for Safety in Demolition of Structures* (Canadá)
- *Demolition Work – Code of Practices: 2016 – Safe Work* (Austrália)
- *NR 18 - Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção - Item 5: Demolições* (Brasil)

O resultado de ambos os estudo conjunto é apresentado de maneira consolidada no Quadro 2.1.

A partir da análise do Quadro 2.1, é possível constatar que os códigos da Inglaterra e da China são os mais completos em termos de abrangência de procedimentos de pré e pós-demolição, documentação, segurança e técnicas de demolição.

Apesar do código chinês não abordar especificações sobre a remoção, separação e o armazenamento de resíduos da pós-demolição, o mesmo consta que, uma vez concluída a demolição, o local deve ser limpo e nivelado de quaisquer detritos, com o fornecimento de drenagem adequada.

Observa-se também que a ABNT NBR 5682:1977 se destaca como uma das normas mais completas sobre o tema, oferecendo diretrizes sobre os processos de pré e pós-demolição, assim como sobre as técnicas de demolição, o que levanta novamente o questionamento sobre sua suspensão.

Quadro 2.1 – Comparativo entre normas, cartilhas e manuais de boas práticas de demolição

Categorias de Análise		NBR 5682:1977 (Brasil)	NR 18.5 (Brasil)	BS 6187 (Inglaterra)	CFR 1926 (Estados Unidos)	AS 2601 (Austrália)	Code of Practices (Austrália)	Best Practice Guidelines (Nova Zelândia)	CSA:1980 (Canadá)	Code of Practices (China)
Pré-demolição	Caracterização do Edifício	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Substâncias Perigosas	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Valor Histórico do Edifício	✓		✓						✓
	Edifícios Adjacentes	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Serviços Públicos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Inspeção Estrutural	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Documentação	Projeto/Plano de Demolição			✓		✓	✓	✓		✓
	Segurança e Saúde	✓		✓		✓	✓	✓		✓
	Plano de Gestão de Resíduos			✓				✓		✓
	Licenciamento	✓					✓		✓	✓
	Requer Projetos Estruturais	✓		✓			✓	✓		✓
	Recomendações para o Projeto de Escoramento			✓		✓		✓	✓	✓
Segurança	Plano contra Vibrações e Choques	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Ambiente	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Ferramentas	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Supervisão	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Formação			✓	✓			✓		✓
	Limpeza do Local	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓
	Equipamentos de Proteção Individual	✓		✓		✓	✓	✓		✓
	Equipamentos de Proteção Coletiva	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Medidas Preventivas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Prevenção e Proteção contra Incêndios	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Pós-demolição/ Gestão de resíduos	Contenção de Fachadas	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
	Desligamento das Linhas de Distribuição e Tubulações			✓		✓	✓	✓		✓
	Remoção	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Separação			✓				✓		
	Armazenamento			✓	✓			✓	✓	
	Transporte para a Destinação Final	✓		✓				✓		✓
Técnicas de Demolição	Limpeza do Terreno	✓		✓					✓	✓
	Demolição Manual	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Demolição Mecânica	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Bola de Demolição	✓			✓	✓		✓	✓	✓
	Demolição por Explosivos	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Tração de Cabos Puxadores	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Métodos Químicos	✓		✓						
	Métodos Térmicos	✓		✓					✓	
Hidrodemolição	✓		✓					✓		

Fonte: Adaptado de Martins (2017) e Martins (2019)

2.3 Demolição Seletiva e Economia Circular

Desde a revolução industrial, o modo de produção e consumo é realizado de maneira linear. Isso possibilitou, pela primeira vez, a produção em massa, proporcionando produtos com um preço mais acessível à população, o que garantiu o aumento de bens materiais a bilhões de indivíduos (Luz *et al.*, 2017). Entretanto, devido a quantidade limitada de recursos naturais, esse sistema se torna insustentável e não corresponde às necessidades da sociedade atual.

Como é ilustrado na Figura 2.1, na economia linear, os materiais e produtos sempre se movem em uma direção: da matéria-prima ao descarte. Por essa razão, os materiais nem sempre são utilizados em todo seu potencial, configurando esse modo de produção como um modelo poluente que degrada os sistemas naturais e alimenta uma série de desafios globais, incluindo as mudanças climáticas e a perda de biodiversidade (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Figura 2.1 – Etapas do modelo da economia linear



Fonte: Adaptado de *Ellen MacArthur Foundation* (2023)

O "modelo linear" também ocasiona perdas energéticas. Um produto descartado em aterro, por exemplo, tem toda a sua energia residual perdida.

Diferente desse modo de produção, a economia circular surge como um modelo no qual a utilização de recursos e a produção de resíduos são reduzidas ao mínimo e, ao atingirem o fim de sua vida útil, são mantidos na economia mediante sua reutilização ou reciclagem e, assim, continuam gerando valor para a economia (CE100 Brasil, 2015). Essa abordagem é fundamentada no princípio de desenvolver um sistema econômico que seja completo e sustentável por si só, por meio de processos restaurativos e regenerativos que englobam todos os setores da economia (CE100 Brasil, 2017).

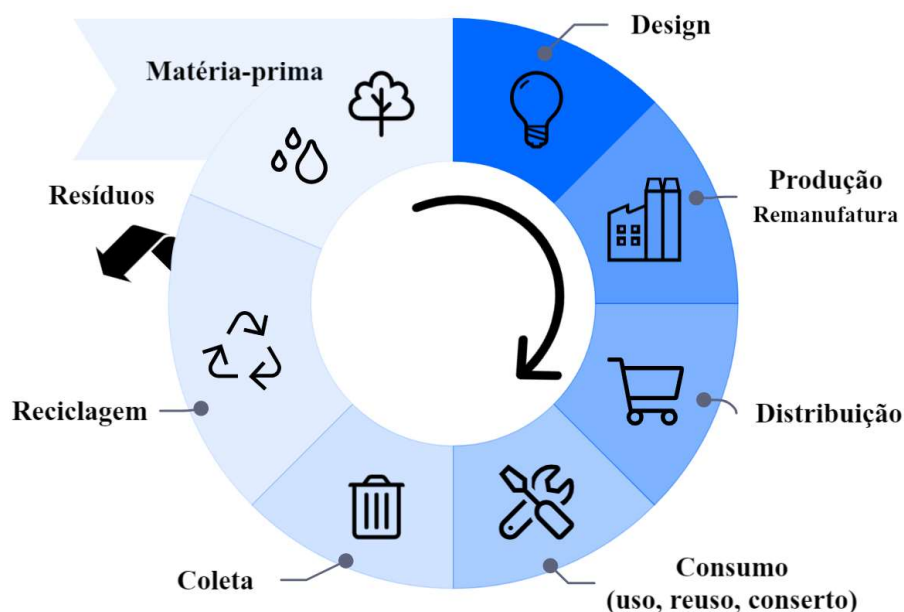
Nesse contexto, as etapas da economia circular são:

1. Extração inteligente de insumos, fabricação da matéria-prima e design do produto: nessa fase, todas as decisões são tomadas considerando o restante da cadeia produtiva;
2. Comercialização e consumo dos bens: nessa etapa, as empresas devem ter em conta o processo de remanufatura e extensão da vida útil do produto, objetivando sua recuperação;

3. Destinação, coleta e reciclagem: se concentra na reutilização ou reciclagem do produto. É quando o ciclo se reinicia.

A ilustração das etapas da economia circular é apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Etapas do modelo da economia circular



Fonte: Adaptado de Schoenmakere e Gillabel (2017)

Em último caso, quando não há como promover a reutilização do produto, deve-se garantir o adequado descarte de seus resíduos.

Apesar de reconhecerem que a economia circular é capaz de reduzir significativamente os impactos ambientais e criar uma economia mais sustentável, Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018) apontam limitações para sua eficácia, sendo elas:

1. As causas profundas dos problemas ambientais: os autores alegam que, embora a economia circular possa ajudar a reduzir o desperdício e o consumo de recursos, ela pode não abordar as causas subjacentes dos problemas ambientais, como consumo excessivo e superprodução;
2. Viabilidade e conveniência em determinados contextos: os autores sugerem que a implementação de uma economia circular pode ser mais difícil ou menos desejável em determinados contextos, como em indústrias com altos níveis de inovação ou tecnologias em rápida mudança;

3. Necessidade de mudanças significativas na produção e consumo: a implementação de uma economia circular exigiria mudanças significativas na forma como os produtos são projetados, produzidos e consumidos. Isso pode ser um desafio para muitas empresas e indivíduos, principalmente no curto prazo;
4. Desafios de infraestrutura e modelo de negócios: a implementação de uma economia circular exigiria novas infraestruturas e modelos de negócios, que poderiam ser caros e difíceis de estabelecer.

Economia Circular na Construção Civil

Para promover a aplicação dos princípios da economia circular na indústria da construção civil, é essencial dar ênfase às intervenções que visem evitar a geração de resíduos e favorecer a reutilização de materiais e produtos. É neste contexto que o conceito de demolição seletiva, ou desconstrução, ganha relevância. De acordo com Addis (2010), essa técnica consiste no processo de desmontar cuidadosamente os materiais e elementos construtivos, possivelmente com alguns danos, com a intenção de reutilizá-los. Ela permite a separação e classificação de componentes e materiais de construção, como metais, janelas, portas, telhas, tijolos, placas de gesso, etc. (Pantini; Rigamonti, 2020).

Por meio da demolição seletiva é possível garantir uma melhor qualidade dos materiais e RCD, prevenindo, em primeiro lugar, a sua contaminação com substâncias perigosas. Além disso, é possível obter maiores quantidades de produtos passíveis de serem novamente utilizados (Paiva, 2019).

Segundo Coelho e Brito (2011), a desconstrução na fase final da vida útil de uma edificação está ganhando cada vez mais importância no mercado de demolição, não apenas por razões ambientais, como recuperação de materiais, reutilização e reciclagem, mas também do ponto de vista econômico.

De acordo com Pantini e Rigamonti (2020) e Gálvez-Martos *et al.* (2018), as vantagens da demolição seletiva sobre a demolição convencional são:

- Redução da deposição de RCD em aterros, e consequente preservação do solo;
- Redução da taxa de extração de matérias-primas;
- Redução de custos da demolição com a venda de matéria-prima secundária.

No entanto, os custos com a operação e a mão-de-obra da demolição seletiva é maior do que na demolição convencional, além de ser um processo que despende de um maior tempo para sua execução.

Kamrath *et al.* (2018) dividem os materiais de desconstrução em três categorias, levando em consideração suas possibilidades de reciclagem. A primeira categoria engloba os metais e vidros, que podem ser fundidos para dar origem a novos produtos. A segunda abrange os materiais de alvenaria e concreto. No caso do concreto, é possível processá-lo para produzir agregados reciclados ou concreto triturado reciclado. Já a terceira categoria está relacionada ao uso térmico, no qual a madeira e materiais plásticos são utilizados como fontes de energia em usinas.

Na demolição seletiva, o desmonte do edifício deve ocorrer na direção inversa da sua construção, respeitando as seguintes etapas de remoção ou desmonte:

1. Acabamentos;
2. Cobertura;
3. Esquadrias e Instalações (tubulações e fiações);
4. Alvenaria;
5. Elementos Estruturais;
6. Fundação.

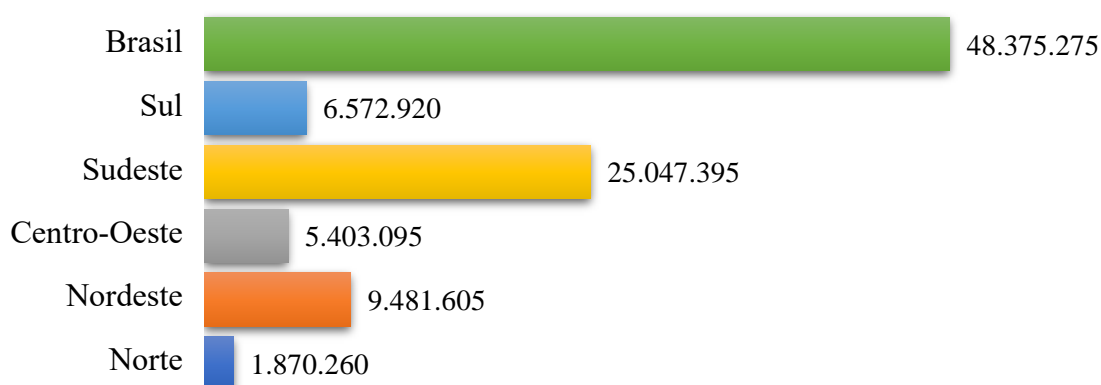
Para a escolha da demolição seletiva como processo de desmonte de uma edificação, Chini e Bruening (2003) enfatizam que, inicialmente, deve ser realizada uma análise quanto à viabilidade desse processo, levando em consideração as condições físicas das peças e elementos que compõem a estrutura, por conta de anomalias devido à decomposição, intempéries ou danos mecânicos.

2.4 Gestão de RCD no Brasil

A demolição está estreitamente associada aos resíduos produzidos ao longo do seu processo. Por isso é importante que haja uma quantificação adequada dos resíduos gerados por essa prática, pois assim torna-se possível o estabelecimento de um sistema de gestão eficaz tanto no nível do projeto quanto no nível regional (Bergsdal; Bohne; Brattebø, 2007). Os dados e

informações sobre a geração de resíduos regionais podem ajudar os tomadores de decisões a criarem políticas mais realistas, determinando o estabelecimento de novas instalações de gestão de resíduos e organizando recursos para mão de obra e logísticas de transporte. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), estima-se que foram produzidas 48.375.275 toneladas de resíduos de construção e demolição no ano de 2022 (Figura 2.3). Esse dado representa um aumento de 2,85% em relação a 2021. Ressalta-se ainda que a própria associação enuncia que os dados obtidos são parciais, visto que existem disposições irregulares de RCD encontradas em diversos locais, os quais, caso fossem quantificados, aumentariam significativamente esse número.

Figura 2.3 – Coleta de RCD nos estados brasileiros em 2022 (em toneladas)



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2022)

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON) conduziu uma pesquisa setorial em 2020 sobre a reciclagem de RCD no Brasil. Ao longo desse período, foram coletadas informações sobre a quantidade de RCD em milhões de toneladas em diversas regiões do país, considerando uma estimativa dos resíduos descartados de forma irregular. Os resultados indicaram um volume total de aproximadamente 100 milhões de toneladas de RCD por ano, o dobro da estimativa apresentada no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil para o ano de 2022 pela ABRELPE.

De acordo com a Resolução nº 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):

Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubula-

ções, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha (CONAMA, 2002).

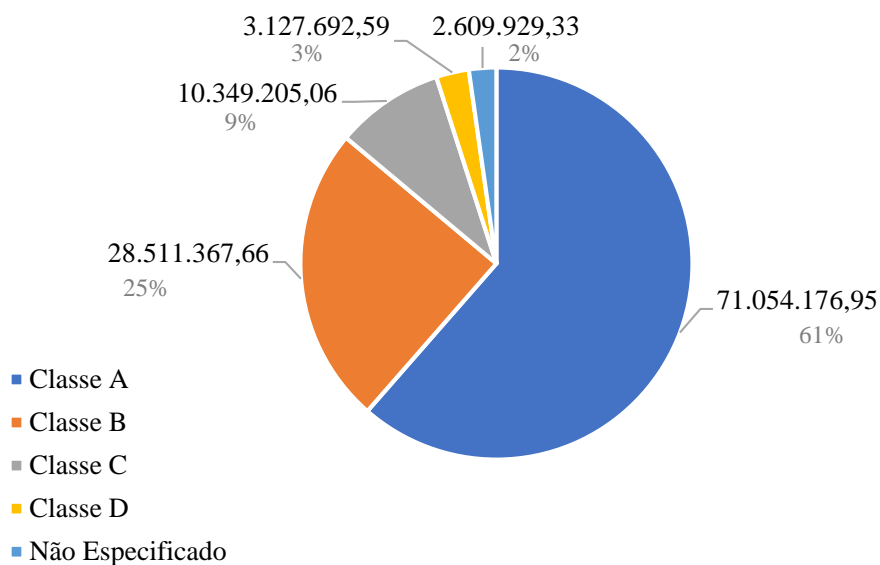
A ABNT NBR 15114:2004, a qual trata sobre a reciclagem de resíduos sólidos da construção civil, em conformidade com a Resolução CONAMA n° 307, define que os resíduos de construção civil (RCC) devem ser classificados da seguinte forma:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis, 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, etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, madeiras, vidros e outros;
- Classe C: resíduos ainda sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem/ recuperação, tais como os oriundos do gesso;
- Classe D: são os resíduos perigosos, como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

A partir das definições do CONAMA e da ABNT NBR 15114:2004, entende-se que os resíduos provenientes dos processos de demolição estão inseridos no conceito de RCC e, portanto, são contabilizados como tal pelos órgãos nacionais.

Na Figura 2.4 é apresentado um gráfico com a massa de RCC gerada por classe no ano de 2019, publicado pelo Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, de acordo com os dados levantados pelo Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR).

Figura 2.4 – Massa de RCC gerada por classe no ano de 2019 (em toneladas)

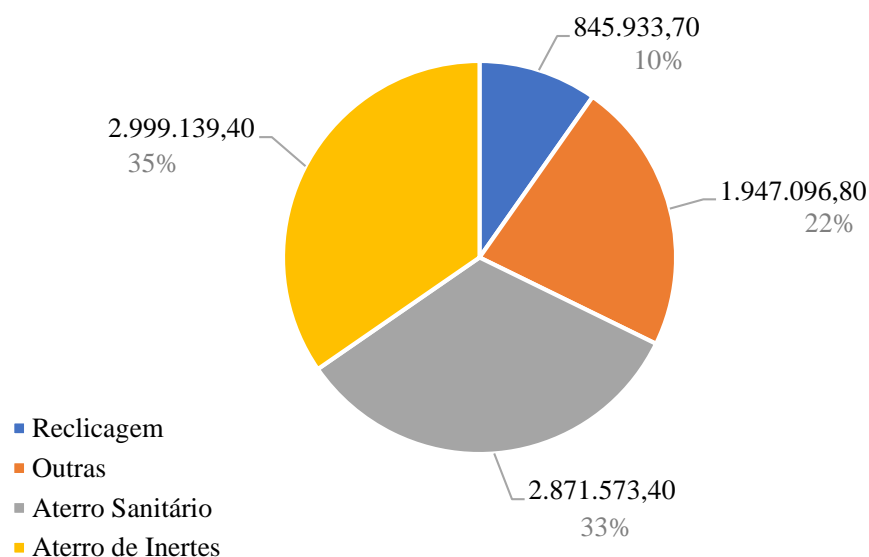


Fonte: Adaptado de SINIR (2021)

Percebe-se que, de acordo com o gráfico, a maior parte dos RCC registrados no levantamento do SINIR não são classificados de acordo com a Resolução CONAMA 307/2002.

O Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos também publicou um gráfico com os dados da destinação dos mesmos RCC, o qual é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Tipo de destinação adotada para os RCC no ano de 2019 (em toneladas)



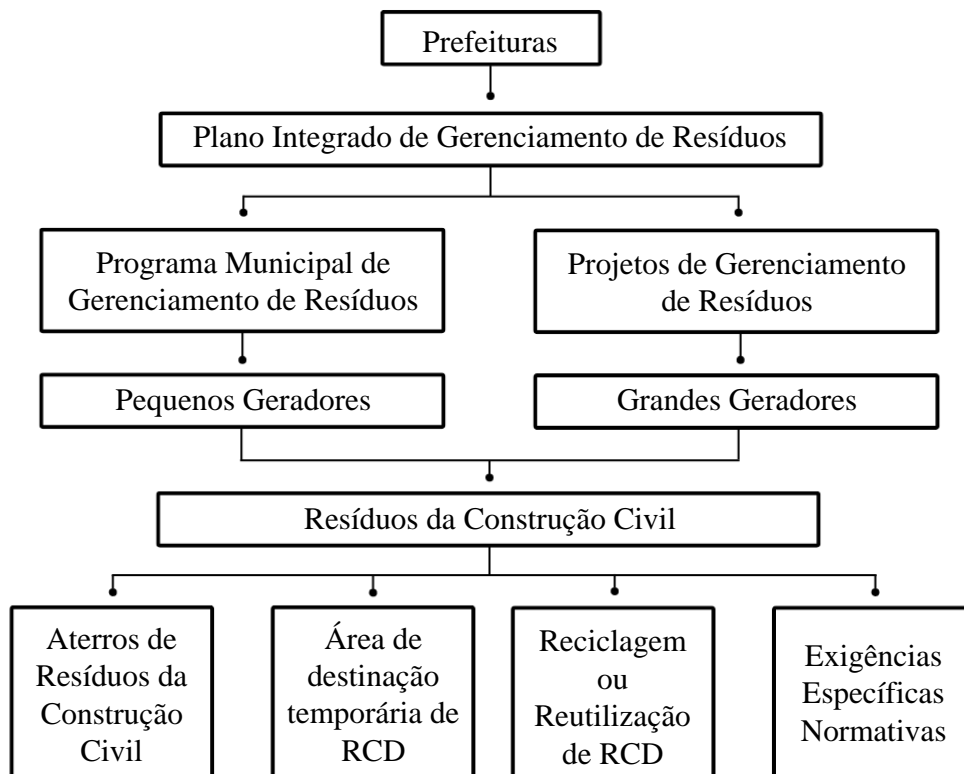
Fonte: Adaptado de SNIS (2021)

Segundo Karpinski *et al.* (2008), as principais consequências para a saúde pública e o meio ambiente decorrentes dos RCD são provocadas principalmente pelas deposições irregulares desses materiais. No entanto, de acordo com o gráfico da Figura 2.5, apenas 10%

dos RCC registrados nos municípios brasileiros são destinados à reciclagem. De acordo com o Ministério das Cidades (2019), mais da metade dos municípios brasileiros ainda não dão destinação correta aos seus resíduos, o que leva muitos deles a serem considerados entulho e descartados incorretamente em caçambas, aterros, bota-foras clandestinos, terrenos baldios e em margens de rios e córregos, acarretando diversos problemas ambientais, econômicos e sociais.

A Resolução CONAMA n° 307/2002 também estabelece diretrizes para a criação do Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC), o qual deve ser elaborado pelos órgãos do poder legislativo dos municípios e do Distrito Federal. Esse plano estabelece as responsabilidades das prefeituras municipais, geradores e transportadores no que diz respeito à gestão dos RCC, de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Fluxograma da gestão de resíduos de acordo com a Resolução CONAMA N° 307/2002



Fonte: Karpinski *et al.* (2008)

O objetivo do PMGRCC é organizar e promover a gestão adequada dos resíduos gerados pela construção civil, seguindo as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), priorizando ações de redução, reutilização, reciclagem e, quando necessário, determinando a destinação adequada dos RCC.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Em seu Art. 21, essa lei determina que o plano de gerenciamento de resíduos

sólidos deve conter o diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados. Ela também define, no Art. 25, que a efetividade das ações destinadas a garantir a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos, bem como o cumprimento das diretrizes e outras disposições estabelecidas nesta lei e seu regulamento, é uma responsabilidade conjunta do poder público, do setor empresarial e da sociedade como um todo.

Contudo, grande parte das administrações locais não cumprem com essa determinação, e mais de 90% das prefeituras brasileiras não possuem planos municipais para tratar sobre essa temática (Bighetti, 2019).

De acordo com Souza *et al.* (2014), esse processo de gestão envolve uma responsabilidade compartilhada por diversos setores. Entre eles, destacam-se os geradores, que podem ser pessoas físicas ou jurídicas responsáveis pela produção de resíduos; os transportadores, encarregados da coleta e encaminhamento adequado desses resíduos para as áreas de destino; os destinatários, que são locais designados para beneficiamento ou disposição final dos materiais; e os agentes licenciadores ou de fiscalização, representando órgãos públicos que verificam o cumprimento dos requisitos legais por parte dos geradores, transportadores e destinações finais.

3 Avaliação do Ciclo de Vida

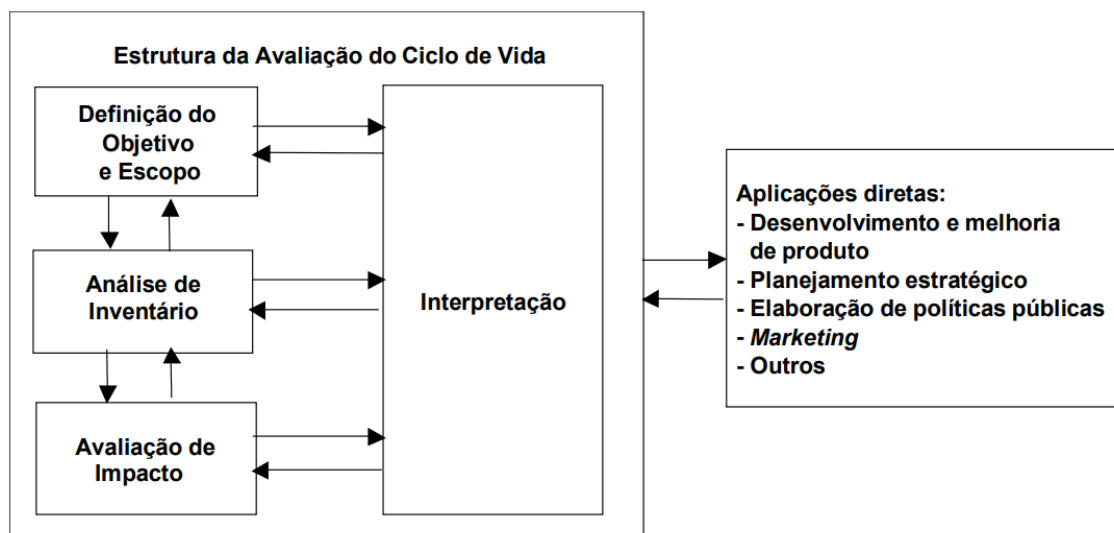
De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2014, a ACV concentra-se nos aspectos ambientais e nos impactos potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, passando pela produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final. Nesse contexto, entende-se por "produto" o conjunto de atividades inter-relacionadas ou interativas que transformam entradas em saídas.

A ACV modela o ciclo de vida de um produto por meio da representação interconectada de todas as suas fases, desde a aquisição das matérias-primas, passando pela produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final. Essa representação é denominada "sistema de produto", o qual está vinculado ao meio ambiente por fluxos elementares, que englobam o uso de recursos e as emissões para o ar, água e solo associadas ao sistema (ABNT NBR ISO 14040:2014).

A partir da ACV também é possível comparar os impactos potenciais de dois ou mais produtos ao meio ambiente e sobre a saúde humana. Por isso, essa metodologia tem sido muito utilizada em estudos comparativos para a avaliação de diferentes opções de gestão de resíduos (Ekvall *et al.*, 2007), por meio da quantificação dos possíveis impactos ambientais relacionados à recuperação, utilização e disposição final desses produtos (Butera; Christensen; Astrup, 2015).

Em 2014, a ABNT disponibilizou a versão corrigida da NBR ISO 14040, a qual corresponde a norma ISO 14040 (2006), da *International Organization for Standardization* (ISO). De acordo com essa diretriz normativa, um estudo de ACV deve incluir: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fases de uma ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2014

A definição do objetivo e escopo de estudo é essencial para todas as outras fases da ACV. De acordo com o *Joint Research Centre of the European Commission* (2010), na fase de objetivos, são identificados os contextos decisórios e as aplicações previstas do estudo, enquanto os públicos-alvo são devidamente designados. Essa etapa é crucial para nortear todas as demais fases da ACV, direcionando os aspectos detalhados da definição de escopo, que, por sua vez, estabelece a estrutura para as fases de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

A correta interpretação dos resultados é obtida por meio da definição clara do objetivo, processo que visa garantir que os produtos do estudo não serão interpretados erroneamente.

Na fase de definição de escopo, o objeto do estudo, ou seja, o produto ou sistemas de produtos a serem analisados, são identificados e detalhadamente definidos.

De acordo com o *Joint Research Centre of the European Commission* (2010), os elementos que devem ser abordados e documentados durante a definição do objetivo e escopo são:

- Os tipos de resultados que o estudo deverá produzir;
- Aplicação pretendida dos resultados;
- Limitações devido ao método;
- Motivações e contexto do estudo;

- Suposições e abrangência do impacto;
- Público-alvo do estudo, partes interessadas e outros atores influentes;
- Representatividade e adequabilidade tecnológica, geográfica e temporal;
- Tipo, qualidade e fontes dos dados e informações necessários;
- O sistema ou processo que será estudado e sua(s) função(ões), sua unidade funcional e seu(s) fluxo(s) de referência;
- Fronteiras do sistema, requisitos de completude e regras de corte relacionadas;
- Estrutura de modelagem de ICV;

Na modelagem do sistema de estudo devem ser definidas suas fronteiras e os processos que serão avaliados. O nível de detalhamento adotado na modelagem é diretamente influenciado pelo objetivo do estudo, sendo determinante para estabelecer as fronteiras de um processo elementar, as quais desempenham um papel crítico, pois definem quais processos elementares serão incorporados à análise. Essas fronteiras também são guiadas pelo objetivo e escopo do estudo, bem como pelos critérios de corte estabelecidos, os quais desempenham um papel crucial na confiabilidade dos resultados do estudo (ABNT NBR ISO 14040:2014).

A segunda fase da ACV é a fase de ICV. Nesta etapa, são coletados dados e realizados procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT NBR ISO 14040:2014). Durante o ICV, são reunidas informações sobre todas as matérias-primas, gastos de energia e insumos. Essa coleta de dados envolve não apenas as etapas de produção, mas também abrange aspectos como transporte, uso e eventual descarte. Essa fase é de suma importância pois os dados coletados irão alimentar todas as fases subsequentes do estudo.

A etapa subsequente é a fase de AICV. Seu principal objetivo é investigar a importância dos impactos ambientais potenciais identificados, utilizando os dados coletados na etapa de ICV. Esse processo envolve a associação dos dados do inventário com indicadores de categoria específicas de impacto. As categorias de impacto abrangem uma variedade de aspectos que contribuem para uma avaliação abrangente dos impactos ambientais associados a um produto durante todo o seu ciclo de vida. Estas categorias englobam emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, influências na qualidade do ar e da água, efeitos na saúde humana, impactos sobre espécies aquáticas e terrestres, bem como alterações no uso do solo. Ressalta-se

que a seleção específica de categorias pode variar dependendo do escopo e dos objetivos do estudo de ACV.

Além de analisar os impactos ambientais, a fase de AICV também desempenha um papel fundamental ao fornecer informações essenciais para a etapa subsequente, denominada Interpretação do Ciclo de Vida. Os resultados desta fase contribuem para a tomada de decisões informadas, permitindo que os profissionais envolvidos na ACV compreendam melhor a significância dos impactos ambientais e possam considerar estratégias para mitigação ou melhorias ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço em questão.

A Interpretação do Ciclo de Vida consiste em considerar conjuntamente as constatações provenientes da análise de inventário e da avaliação de impacto. Ressalta-se que a interpretação deve refletir o caráter relativo dos resultados da ACV, os quais indicam potenciais efeitos ambientais e não preveem impactos reais nos pontos finais de categoria, extrapolação de limites, margens de segurança ou riscos (ABNT NBR ISO 14040:2014). As conclusões e recomendações resultantes dessa interpretação são formuladas de maneira a serem consistentes com o objetivo e escopo do estudo, fornecendo compreensões valiosas para orientar decisões informadas sobre práticas, políticas ou estratégias futuras relacionadas ao sistema de produto ou serviço avaliado na ACV.

De acordo com o fluxograma da Figura 3.1, todas as fases da ACV incluem um processo iterativo de análise crítica com as demais etapas. Esse processo visa determinar se os objetivos foram alcançados e possibilita modificações da primeira fase do estudo caso a avaliação indique que eles não podem ser atingidos (ABNT NBR ISO 14040:2014).

Segundo Mendes (2013), as empresas que incorporam a ACV em suas práticas têm a vantagem de compreender os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto. Essa compreensão possibilita que tais empresas implementem melhorias na concepção de seus produtos, integrando aspectos ambientais aos processos produtivos, o que, por sua vez, pode resultar em benefícios tanto econômicos quanto ambientais.

Os impactos ambientais não se restringem apenas às fases iniciais, como a produção de materiais ou matérias-primas utilizados na obra. Eles abrangem todo o ciclo de vida da edificação, desde a concepção até o seu descarte final, incluindo o processo de construção e o período em que a estrutura é utilizada. Este escopo mais amplo permite uma análise abrangente dos impactos ambientais associados a todo o ciclo de vida de uma construção. Nesse contexto, várias iniciativas têm se concentrado na aplicação da ACV na construção civil. O objetivo é comparar diferentes práticas construtivas e identificar maneiras de mitigar os impactos ambientais causados pelo

setor. A ACV oferece uma abordagem sistêmica que possibilita a análise e a comparação de alternativas, promovendo práticas mais sustentáveis na construção, alinhando-se às crescentes preocupações ambientais e contribuindo para uma abordagem mais consciente e responsável no setor da construção civil (Honda, 2016).

De acordo com Bribián, Usón e Scarpellini (2009), edifícios apresentam características especiais que os distinguem dos demais produtos. Eles possuem uma vida relativamente longa, estão sujeitos a constantes alterações, muitas vezes desempenham múltiplas funções, contêm componentes distintos, são produzidos localmente, são tipicamente únicos, causam impactos locais e estão intimamente integrados à infraestrutura. Consequentemente, essa complexidade torna as fronteiras de seu sistema pouco claras.

Por isso, é fundamental considerar não apenas as fases de produção dos materiais e matérias-primas utilizados em obras, mas também o processo de construção da edificação, seu uso e o final do ciclo de vida, pois todos esses aspectos contribuem para os impactos ambientais causados, como indicado no Quadro 3.1, de acordo com a *British Standards Institution* (2011).

Quadro 3.1 – Estágios da ACV de uma edificação

Pré-operacional					Operacional					Pós-operacional				
Produção			Construção		Estágio de uso					Fim de vida				
Extração de matéria-prima	Transporte	Fabricação	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Desconstrução/ Demolição	Transporte	Processamento de Resíduos	Descarte	Reuso Recuperação Reciclagem

Fonte: Adaptado de BSI (2011)

A fase pré-operacional é dividida entre as etapas de produção e construção. Já a fase operacional se refere ao estágio de uso da edificação. Por fim, a etapa pós-operacional compreende as fases do fim de vida do edifício. Ela também pode incluir, no caso da aplicação dos princípios da economia circular, as etapas de recuperação, reciclagem ou reuso.

4 Metodologia

Este capítulo descreve o método utilizado nesta pesquisa e apresenta as estratégias adotadas para o desenvolvimento do trabalho.

4.1 Estratégia de Pesquisa

O método científico empregado nesta pesquisa é o indutivo. Seguindo a perspectiva de Marconi e Lakatos (2008), a indução implica na dedução de uma verdade de alcance geral ou universal a partir de dados específicos devidamente comprovados. No contexto deste estudo, que visou obter informações sobre a minimização do impacto ambiental relacionado ao uso de produtos provenientes da demolição seletiva, foram reunidos dados secundários de diversas fontes da literatura científica.

A natureza da pesquisa é aplicada, pois busca a resolução de problemas práticos a partir da aplicação do conhecimento científico de forma direta. Adicionalmente, ressalta-se que este estudo apresenta um caráter exploratório, uma vez que o domínio de pesquisa associado ao tema em foco necessita ainda da elaboração de conhecimento técnico-científico.

A estratégia de pesquisa adotada consiste em um estudo comparativo que analisa duas residências do modelo de moradia popular da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) do estado de São Paulo. Uma das edificações foi construída em alvenaria estrutural de blocos de concreto composto à base de pedra britada (basalto), cobertura em telhas cerâmicas e esquadrias metálicas novas. A segunda residência foi construída em alvenaria estrutural composta por blocos de concreto que tinham uma substituição de 20% do agregado convencional por ACR, como indica a ABNT NBR 15116:2021, telhas cerâmicas restauradas e esquadrias recicladas.

A abordagem metodológica é quantitativa e envolve a realização de simulações dos impactos por meio de indicadores ambientais. Ao término do estudo, os impactos dos três componentes mencionados foram somados para cada uma das edificações, visando obter a redução de impactos ambientais proporcionada pela reutilização e reciclagem de RCD.

A pesquisa foi conduzida a partir da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida, de acordo com o Guia Geral para Avaliações do Ciclo de Vida, do Sistema Internacional de Dados do Ciclo de Vida, ou *International Life Cycle Data System (ILCD)*, em inglês. Portanto, seu

desenvolvimento foi conduzido no formato de um estudo completo de ACV, incluindo as fases de Objetivo e Escopo, Inventário de Ciclo de Vida, Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida e Interpretação dos Resultados.

4.2 Aplicação Prevista

Este estudo se aplica à avaliação comparativa dos impactos ambientais potenciais de três componentes construtivos de uma edificação padrão de programas de Habitação de Interesse Social: alvenaria estrutural de blocos de concreto, cobertura de telhas cerâmicas e esquadrias metálicas com seções envidraçadas.

A Residência 1 refere-se à habitação construída com materiais novos, enquanto a moradia a ser construída com produtos provenientes da demolição seletiva é denominada Residência 2. No Quadro 4.1, são apresentados os processos de recuperação dos RCD a serem reutilizados na Residência 2.

Quadro 4.1 – Componentes construtivos da Residência 2

Elemento Construtivo	Processo de obtenção do produto
Alvenaria estrutural de blocos de concreto	Utilização de agregado de concreto reciclado na fabricação de blocos de concreto estrutural
Cobertura de telhas cerâmicas	Reutilização de telhas cerâmicas já existentes
Esquadrias metálicas	Reciclagem de esquadrias metálicas

Fonte: Autoria própria

De acordo com o Quadro 4.1, foram feitas as seguintes considerações:

- O ACR a ser incorporado nos blocos de concreto é proveniente de elementos de concreto estrutural demolidos de outras construções;
- O alumínio e o vidro utilizados na fabricação das esquadrias metálicas são produtos secundários, ou seja, são provenientes da reciclagem de RCD compostos por esses materiais;
- No caso das telhas cerâmicas, foi adotada a prática de reutilização, sendo considerado que as telhas foram retiradas de residências a serem demolidas.

4.3 Público-alvo

O presente estudo é de caráter científico, destinado à publicação para a academia e aos principais setores da construção civil do Brasil. Portanto, o público alvo é uma audiência externa e técnica.

4.4 Escopo

4.4.1 Função

A função principal de uma habitação é proporcionar um ambiente que satisfaça as necessidades fundamentais de conforto. Isso envolve condições térmicas, iluminação, ventilação e isolamento acústico que sejam adequados, levando em consideração a disposição dos cômodos e a acessibilidade. Além disso, a habitação desempenha um papel crucial ao oferecer proteção contra as condições climáticas adversas, garantindo, assim, segurança e bem-estar aos seus habitantes.

4.4.2 Unidade Funcional

O modelo de edificação avaliada no presente estudo foi uma residência unifamiliar padrão baixo (R1-B), composta por 1 pavimento, com 2 dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque, com área real de 58,64 m², de acordo com a definição da ABNT NBR 12721:2006.

4.4.3 Detalhamento do Projeto de Estudo

A residência adotada consiste em um tipo de Habitação de Interesse Social muito comum no Brasil, cujo objetivo é viabilizar o acesso à moradia adequada e regular à população de baixa renda do país (Figura 4.1).

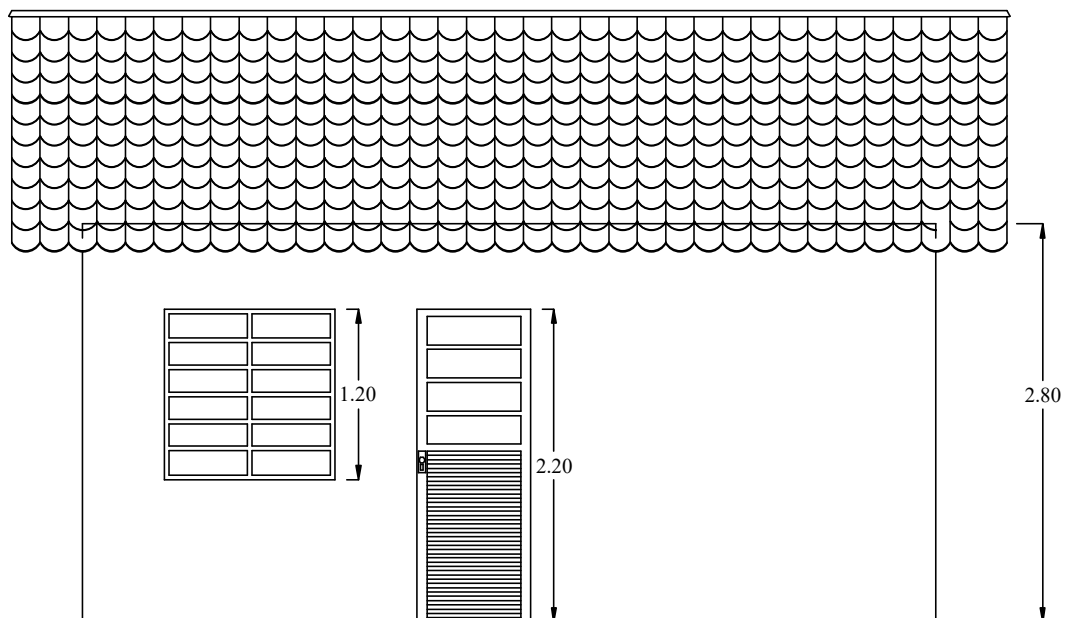
Figura 4.1 – Condomínio de casas da CDHU



Fonte: CDHU (2023)

Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentadas, respectivamente, a vista frontal, planta baixa, vista lateral e a planta de cobertura da edificação, de acordo com projeto da CDHU. Ressalta-se que o projeto adaptado segue as diretrizes padrões de todas as residências R1-B.

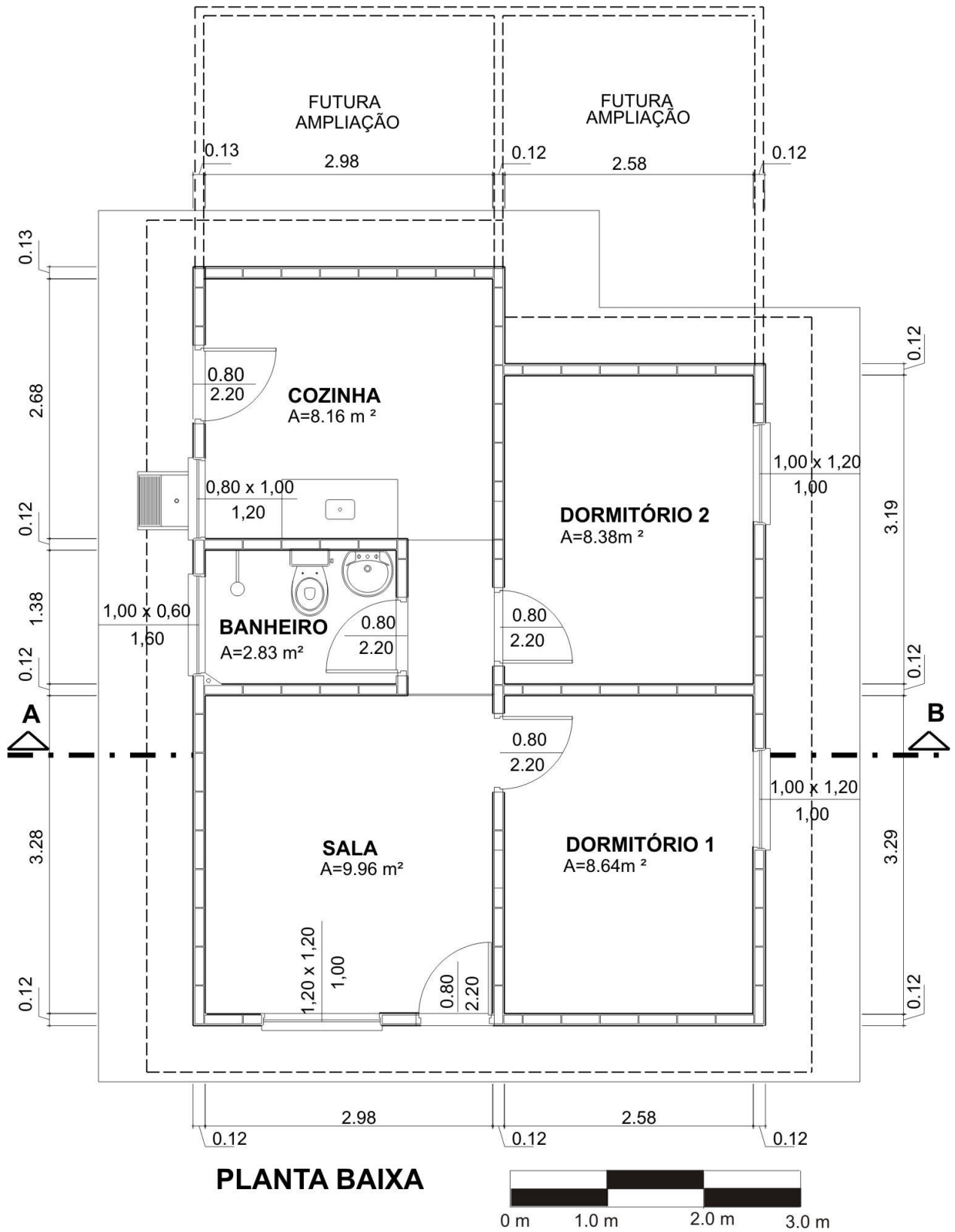
Figura 4.2 – Vista frontal da residência R1-B



Fonte: Autoria própria com base em CDHU (2007)

As altura da parede foi adotada pela autora, equivalente a 2,80 m e as dimensões das esquadrias foram selecionadas com base nos produtos disponíveis no mercado nacional.

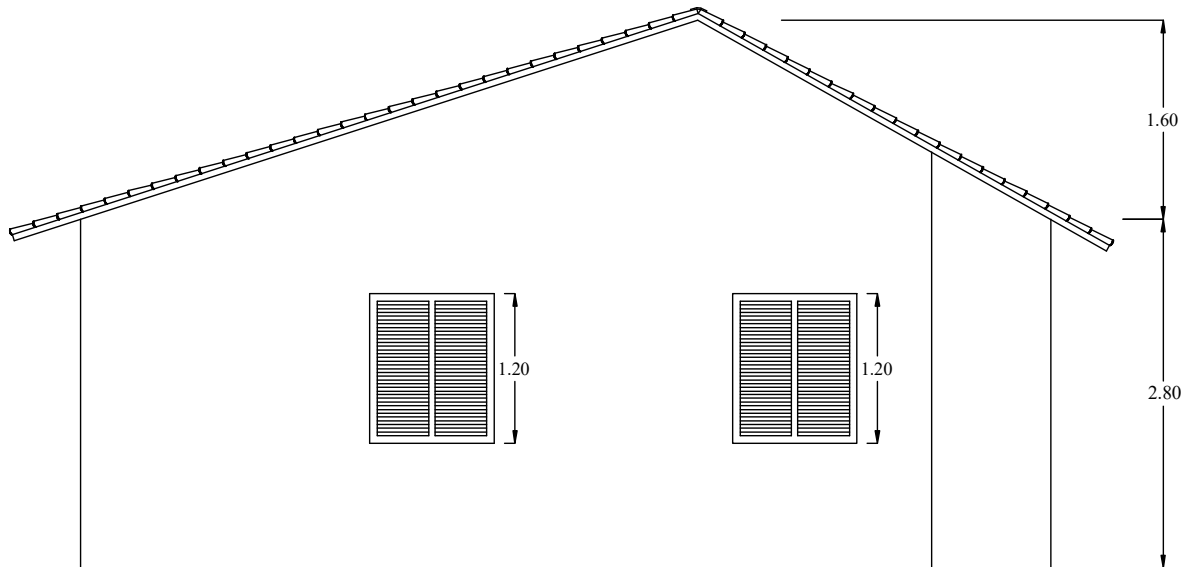
Figura 4.3 – Planta baixa da residência R1-B



Fonte: CDHU (2007)

Na vista lateral apresentada na Figura 4.4 é possível perceber que a altura da parede chega a 4,40 m devido à presença do sótão na residência.

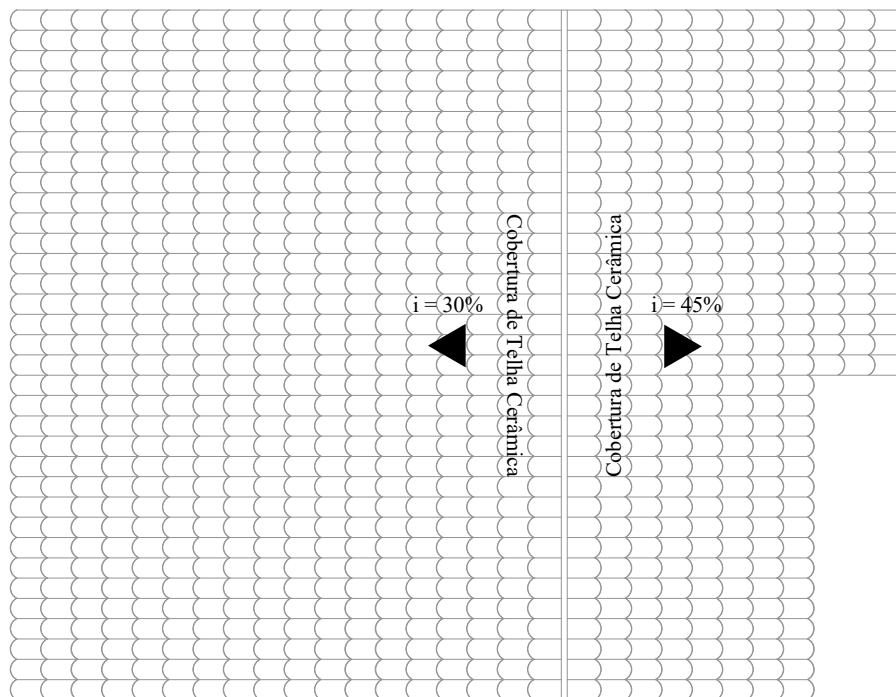
Figura 4.4 – Vista lateral da residência R1-B



Fonte: Autoria própria com base em CDHU (2007)

O telhado é composto por telhas cerâmicas do tipo portuguesa. De um lado, a inclinação da água do telhado é de 30%, enquanto do outro é de 45%.

Figura 4.5 – Planta de cobertura da residência R1-B



Fonte: Autoria própria com base em CDHU (2007)

4.4.4 Fluxo de Referência

Neste item são fornecidos os dados quantitativos referentes aos materiais e aos gastos energéticos utilizados na fabricação dos produtos analisados.

Para a modelagem dos ciclos de vida dos produtos foi utilizado o *software OpenLCA*, disponibilizado pela empresa *GreenDelta*. Os processos foram obtidos por meio da base de dados europeia *ELCD 3.2*, de 2015, do *Joint Research Center*.

Bloco de Concreto

Os fluxos de referência dos materiais para a fabricação dos Blocos de Concreto foram fornecidos por uma fábrica desse ramo, referida no estudo como "Empresa 1", a qual fornece blocos para o Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana do Laboratório de Materiais e Componentes, do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de São Carlos. Portanto, os valores dos materiais que compõem os blocos de concreto correspondem a dados primários, adaptados de acordo com a necessidade do estudo, e são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Materiais utilizados para a fabricação de blocos de concreto

Material	Quantidade de material
Cimento	0,67 kg/bloco
Pedrisco	2,67 l/bloco
Areia	2,67 l/bloco
Pó de Pedra	2,67 l/bloco
Água	0,83 l/bloco

Fonte: Adaptado de Empresa 1 (2024)

Os dados do consumo energético dos equipamentos utilizados na fabricação dos blocos também foram fornecidos pela Empresa 1 e são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Consumo de energia dos equipamentos

Equipamento	Energia elétrica consumida (kWh)
Misturador	11
Esteira inclinada	0,375
Esteira horizontal	11
Vibroprensa	18,5

Fonte: Adaptado de Empresa 1 (2024)

De acordo com Carvalho e Brinck (2010), no relatório "Britagem e Moagem", do CETEM, do Ministério da Ciência e Tecnologia, o valor da energia elétrica consumida pela máquina britadora para a fragmentação do basalto e do concreto reciclado, é de 19 e 10 kWh/t, respectivamente.

O quantitativo da área de alvenaria estrutural da unidade funcional foi calculado com base no projeto arquitetônico, sendo subtraído o valor correspondente à área das esquadrias, totalizando 114,32 m². Estimando um consumo de 12,5 blocos por m² de alvenaria, foram contabilizados 1429 blocos para a unidade funcional. A partir dos dados primários obtidos, foram calculados os valores do consumo de materiais para a fabricação dos Blocos de Concreto para a unidade funcional, de acordo com o detalhado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Materiais utilizados para a fabricação dos blocos de concreto

Material	Quantidade de material	Quantidade de material para a unidade funcional	Massa unitária (kg/m ³)	Massa Total (kg)
Cimento	0,67 kg/bloco	957,43 kg	-	957,43
Pedrisco	2,67 l/bloco	3,815 m ³	1618,14	6173,90
Areia	2,67 l/bloco	3,815 m ³	1480,18	5647,52
Pó de Pedra	2,67 l/bloco	3,815 m ³	1809,41	6903,68
Água	0,83 l/bloco	1186,07 m ³	1	1186,07

Fonte: Autoria própria

Somando os valores do consumo de energia elétrica dos equipamentos utilizados na fabricação dos blocos de concreto apresentados na Tabela 4.2, obtém-se o valor total de 31,875 kWh. De acordo com a Empresa 2, são produzidos 1600 blocos por dia, em um período de 6 horas. Portanto:

$$\text{Consumo de energia elétrica} = \left(\frac{31,875 \text{ kWh} \times 6 \text{ horas}}{1600 \text{ blocos diários}} \right) \times 1429 \text{ blocos} \quad (4.1)$$

Sendo assim, de acordo com a Equação 4.1, o consumo de energia elétrica para a produção de 1429 blocos é de 170,81 kWh.

Além do consumo energético associado à produção dos blocos, é importante considerar o consumo de energia para a britagem do basalto. Conforme definido, o valor estabelecido para o gasto de energia na britagem do basalto é de 19 kWh/t. Sendo 13,08 t desse material, o consumo de energia para sua quebra e moagem é de 248,52 kWh.

Logo, o consumo total de energia para a fabricação dos blocos de concreto é de 419,33 kWh, que equivale a 1.509,59 MJ.

Para o sistema do produto do Bloco de Concreto ACR, todos os processos permaneceram, no entanto, foi acrescentado o processo de fragmentação do concreto reciclado a partir da demolição seletiva. De acordo com a ABNT NBR 15116:2021, na utilização de agregados reciclados em compósitos ou produtos com função estrutural, como concretos de cimento Portland, artefatos pré-fabricados e argamassas com função estrutural, recomenda-se exclusivamente a aplicação de agregados de concreto reciclado, devendo a substituição de agregado natural por agregado reciclado ser restrita a um máximo de 20% da massa total de agregados. Seguindo essa diretriz, o peso total de agregados é equivalente a 18725,10 kg, logo, 20% corresponde a um total de 3745,02 kg.

As quantidades de cimento, areia e água permanecem inalteradas, enquanto a quantidade combinada de brita e pó de pedra passa a somar 9332,56 kg.

O consumo energético para produção dos blocos com ACR continua o mesmo do bloco de concreto com agregado convencional, equivalente a 170,81 kWh.

No entanto, para a britagem do concreto reciclado, foi considerado um consumo de energia de 10 kWh/t. Dessa forma, o consumo total é de 177,32 kWh para a britagem do basalto e 37,45 kWh para a britagem do concreto reciclado. No conjunto, resulta em um gasto energético total de 385,58 kWh, equivalente a 1.388,09 MJ.

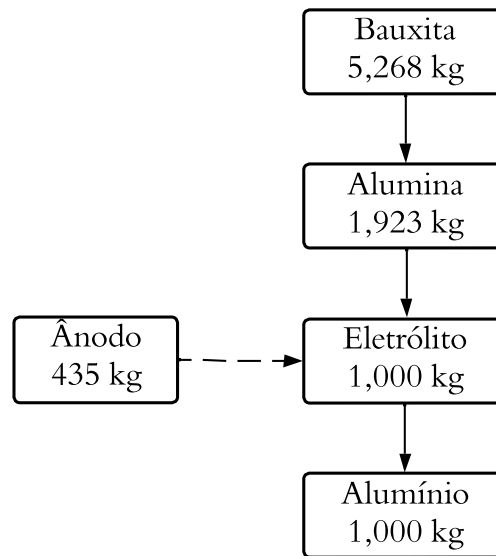
Esquadria Metálica

As esquadrias metálicas são estruturas fabricadas com metais, tais como alumínio ou aço inox. O processo de fabricação dessas esquadrias pode variar conforme o tipo de metal utilizado e o produto final desejado; neste trabalho, foram consideradas esquadrias de alumínio.

A produção do alumínio é dividida em duas partes: primária e secundária. A diferença entre elas reside no fato de que a obtenção de alumínio primário ocorre por meio da extração da bauxita, ao passo que o alumínio secundário é derivado da reciclagem de sucata, representando uma fonte significativa na produção desse metal.

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) *apud. International Aluminium Institute* (2011), para produzir 1 kg de alumínio, são necessários 5,268 kg de bauxita, conforme esquema ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Balanço de massa do processo de produção do alumínio primário



Fonte: Adaptado de *International Aluminium Institute* (2009)

As informações referentes ao consumo energético na produção de alumínio foram extraídas do relatório intitulado "Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados - Segmento Alumínio", elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em colaboração com o Ministério de Minas e Energia. No contexto deste relatório, a cadeia produtiva do alumínio foi subdividida em quatro subsegmentos, cada um com suas respectivas fases do processo, a saber:

1. Produção da Bauxita: britagem, desagregação e peneiramento;
2. Produção da Alumina: moagem, digestão, clarificação e calcinação;
3. Produção do Alumínio Primário: preparação da pasta, redução e fundição;
4. Produção do Alumínio Secundário: reciclagem e refusão.

Os gastos energéticos para cada um dos subsegmentos da produção do alumínio são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Gastos energéticos das etapas de produção do alumínio

Subsegmento	Etapa do Processo de Produção	Consumo Específico Médio de Energia Elétrica (kWh/t)	Consumo Específico Médio de Energia Térmica
Bauxita	Britagem	1,86	-
	Desagregação	2,53	-
	Peneiramento	1,35	-
Alumina	Moagem	24,00	0,72 tep/t
	Digestão	63,00	
	Clarificação	54,00	
	Calcinação	76,00	
Alumínio Primário	Processo Söderberg	15502,00	0,134 tep/t
Alumínio Secundário	Reciclagem	35,00	-
	Refusão	781,00	168 Nm ³ /t

Fonte: Adaptado de EPE (2018)

Para determinar o consumo específico térmico, foram efetuadas conversões de unidades de medida, uma vez que é necessário comparar diversos tipos de energéticos, como gás natural, óleo combustível e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A unidade empregada para expressar esse indicador é o tep (toneladas equivalentes de petróleo).

Na fase de Refusão, foi adotado o metro cúbico normal (Nm³) como unidade de medida, que representa o volume ocupado por uma substância, seja sólida, líquida ou gasosa, com massa constante, em condições padrões. Neste contexto, refere-se ao consumo específico de gás natural para essa etapa.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as descrições e quantidades das esquadrias da unidade funcional.

Tabela 4.5 – Quantitativo de esquadrias

Descrição	Altura (m)	Largura (m)	Quantidade
Janela de correr (Sala) - 2 folhas Metálica com pintura branca + Vidro incolor	1,20	1,20	1
Janela Maxim-Ar (Sanitário) - 1 folha Metálica com pintura branca + Vidro incolor	0,60	1,00	1
Janela de correr (Dormitórios) - 3 folhas Veneziana metálica com pintura branca + Vidro incolor	1,00	1,20	2
Janela de correr (Cozinha) - 2 folhas Metálica com pintura branca + Vidro temperado incolor	0,80	1,00	1
Porta de abrir (Externa) - 1 folha Veneziana metálica + Vidro incolor	2,20	0,80	2
Alçapão de abrir - 1 folha Veneziana metálica (ventilada) com pintura branca	0,60	0,60	1
Porta de abrir (Interna) - 1 folha Madeira	2,10	0,80	3

Fonte: Autoria própria

As portas internas, por serem de madeira, não foram consideradas no estudo. As áreas de alumínio e vidro presentes nas esquadrias da unidade funcional foram calculadas com base em

modelos encontrados no mercado, resultando em uma área de 8,76 m² de alumínio e 3,39 m² de vidro.

No caso do alumínio, considerando um peso de 2,5 kg/m², obteve-se um peso total de 21,9 kg de material, ou 0,0219 t.

De acordo com os dados da Tabela 4.4, ao realizar as conversões necessárias, obtém-se o gasto energético para a produção do alumínio primário e secundário expresso em megajoules, como apresentado na Tabela 4.6.

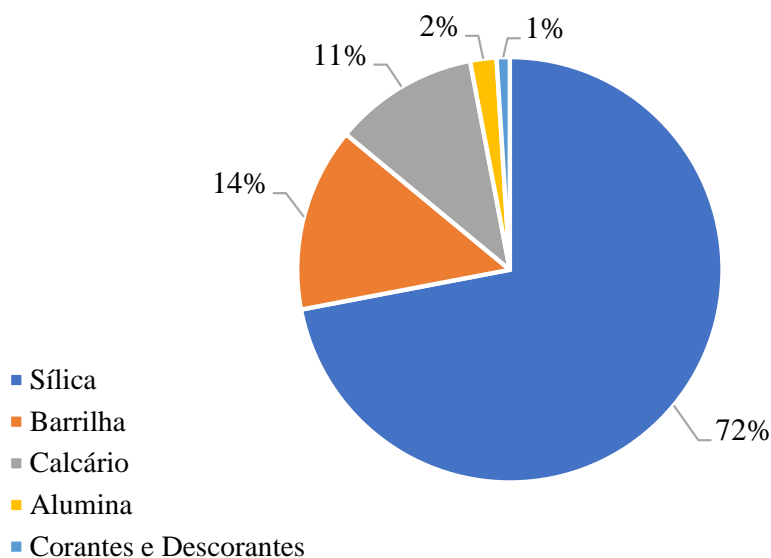
Tabela 4.6 – Consumo energético para a produção de alumínio

Subsegmento	Consumo Energético Médio de Energia Elétrica (MJ)	Consumo Energético Médio de Energia Térmica (MJ)
Alumínio Primário	1.239,74	783,04
Alumínio Secundário	64,33	139,74

Fonte: Autoria própria

O design das esquadrias metálicas sugere a presença de seções envidraçadas. No âmbito desta pesquisa, a dimensão do vidro foi fixada em 8 mm. O produto em questão é constituído por uma matriz composta de sílica (originada de areia), calcário, barrilha (carbonato de sódio), alumina (óxido de alumínio) e agentes colorantes ou descorantes, conforme as proporções especificadas no gráfico apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Composição do vidro



Fonte: Adaptado de Maia (2003)

Para o vidro das seções envidraçadas, foi considerado placas de 8 mm de espessura. Cada 1 mm de espessura tem um peso por m² fixado em 2,5kg. Logo, para 8 mm, tem-se 20

kg/m². Sendo 3,39 m² de vidro, tem-se um peso de 67,8 kg. Quanto a sua produção, com base na quantidade de cada material apresentada no gráfico da Figura 4.7 do item 4.4.4 - Fluxo de Referência, os quantitativos de materiais estão detalhados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Materiais utilizados para a fabricação do vidro

Material	Quantidade de Material	Quantidade de Material para 3,39 m ² (kg)
Areia de Sílica	72%	48,82
Barrilha	14%	11,46
Calcário	11%	9,5

Fonte: Autoria própria

Devido à pequena proporção de alumina e corantes na produção do vidro, esses materiais foram desconsiderados no sistema do produto do estudo.

Os dados relativos aos dispêndios energéticos para a produção do vidro também foram retirados do relatório "Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Seleccionados", da EPE, mas especificamente para o Segmento Cerâmica: Subsegmento Vidro, e são equivalentes a 352,67 kWh/t para a energia elétrica e 0,15227 tep/t, para a energia térmica. Logo, foram calculados os valores de 85,43 MJ e 432,24 MJ para os consumos energéticos elétrico e térmico, respectivamente.

Considerando que o processo de reciclagem do vidro é idêntico ao de produção primária do material, com exceção das etapas iniciais de limpeza e quebra, optou-se por considerar o mesmo gasto energético para os dois processos. É importante observar que, embora a energia necessária para aquecer o vidro reciclado até o ponto de fusão seja geralmente menor do que a necessária para fundir o vidro a partir de matérias-primas brutas, essa simplificação foi adotada para o escopo do estudo. Quanto à quebra do vidro, foi considerado que, por meio da demolição seletiva, essa etapa seria realizada por força física de trabalhadores com o uso de ferramentas pequenas, como a marreta.

Telha Cerâmica

Os dados relativos à produção de telha cerâmica também foram extraídos da literatura. Conforme documentado por Cruz (2016), são necessários 4 kg de argila para fabricar uma telha cerâmica.

A área da cobertura da unidade funcional é equivalente a 55,75 m². O modelo de telha portuguesa adotado possui dimensões de aproximadamente 41 cm de comprimento e 23,7 cm de

largura, caracterizando um consumo de 17 unidades por metro quadrado. Portanto, para uma área de 55,75 m², são necessárias 948 telhas, totalizando 3.792 kg de argila, ou 3,79 t.

As referências do gasto energético também foram obtidas do relatório "Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados", da EPE, junto com o Ministério de Minas e Energia, dessa vez para o Segmento Cerâmica: Subsegmento Telha Cerâmica Vermelha, e são equivalentes a 35,35 kWh/t para a energia elétrica e 0,03767 tep/t, para a energia térmica. Logo, o consumo energético calculado foi igual a 288,97 MJ e 3580,16 MJ para os consumos energéticos elétrico e térmico, respectivamente.

No caso da reutilização das telhas, são contempladas as etapas de limpeza e a aplicação de um produto para tratamento antifúngico. Com base em informações provenientes de empresas especializadas em limpeza de telhados com jato de alta pressão, estima-se que o consumo de água seja de aproximadamente 5 l/m². Destaca-se que não foi possível incorporar o tratamento antifúngico devido à ausência de um processo que detalhasse esse produto ou, ao menos, de um processo similar. Essa foi uma das limitações identificadas durante o desenvolvimento do estudo.

4.4.5 Escopo Geográfico

O escopo geográfico deste estudo abrange uma residência de Habitação de Interesse Social localizada na cidade de São Carlos, no estado de São Paulo. As matérias-primas e as fábricas dos produtos avaliados no estudo se encontram em cidades do sul de Minas Gerais e do estado de São Paulo. Nesse sentido, os materiais que compõem o sistema do produto foram considerados em relação a essa região.

Considerou-se a fabricação dos blocos de concreto por uma empresa sediada na cidade de São Carlos, que adquire os materiais de outras localidades. No caso do cimento, foi tomada como referência uma fábrica localizada na cidade de São Paulo (SP), que obtém a matéria-prima na cidade de Arcos (MG). O basalto é proveniente da cidade de Campinas (SP), enquanto a areia é obtida em Botucatu (SP).

Quanto às telhas cerâmicas, considerou-se a produção na cidade de Leme (SP).

Desse modo, as distâncias percorridas por cada material e produto até a cidade de São Carlos (SP) são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Distância de transporte dos materiais

Produto	Extração	Fábrica	Distância percorrida até São Carlos/SP (km)
Cimento	Arcos (MG)	São Paulo (SP)	740
Areia	Botucatu (SP)	-	190
Basalto	Campinas (SP)	-	140
Telha Cerâmica	Leme (SP)	Leme (SP)	95

Fonte: Autoria própria

No caso do alumínio, considerou-se a extração de bauxita em Poços de Caldas (MG) e a fábrica localizada em Alumínio (SP). Em relação ao vidro, a análise contemplou o processo de fabricação na cidade de São Paulo (SP), tendo em vista a disponibilidade dos insumos para sua produção, tais como areia de sílica, barrilha e calcário, na mesma localidade. Quanto à produção das esquadrias em si, foi considerado o cenário de fabricação em Jundiaí (SP). Sendo assim, as distâncias percorridas por cada um desses produtos até a cidade de São Carlos (SP) são detalhadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Distância de transporte dos materiais da esquadria metálica

Produto	Percurso	Distância percorrida (km)
Alumínio	Poços de Caldas (MG) - Alumínio (SP)	270
	Alumínio (SP) - Jundiaí (SP)	97
Vidro	São Paulo (SP) - Jundiaí (SP)	63
Esquadria metálica	Jundiaí (SP) - São Carlos (SP)	194

Fonte: Autoria própria

4.4.6 Escopo Tecnológico

O escopo tecnológico está diretamente relacionado aos processos apresentados no sistema do produto, ou seja, todos os dados coletados na fase do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) devem corresponder a entradas e saídas desses processos (Bento, 2016). Portanto, o escopo tecnológico é atual e estático, pois são consideradas as tecnologias existentes atualmente, sem previsão de surgimento de novas técnicas de demolição seletiva.

4.4.7 Escopo Temporal

O escopo temporal foi definido de acordo com a Vida Útil de Projeto mínima estabelecida pela ABNT NBR 15575-1:2013. O valor da VUP se refere ao período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos.

Dessa forma, o escopo temporal para cada um dos componentes construtivos é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Vida Útil de Projeto (VUP)*

Sistema	VUP mínima em anos
Estrutura	≥ 50 Conforme ABNT NBR 8681
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20
*Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-1:2013

4.4.8 Estrutura de Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A estrutura de modelagem utilizada é a atribucional, cujo objetivo é descrever a realidade dos processos e estágios de ciclo de vida do sistema analisado, estabelecendo uma analogia com a cadeia de abastecimento, o estágio de uso e o fim de vida útil (*Joint Research Centre of the European Commission, 2010*)

4.4.9 Fronteiras dos Sistemas

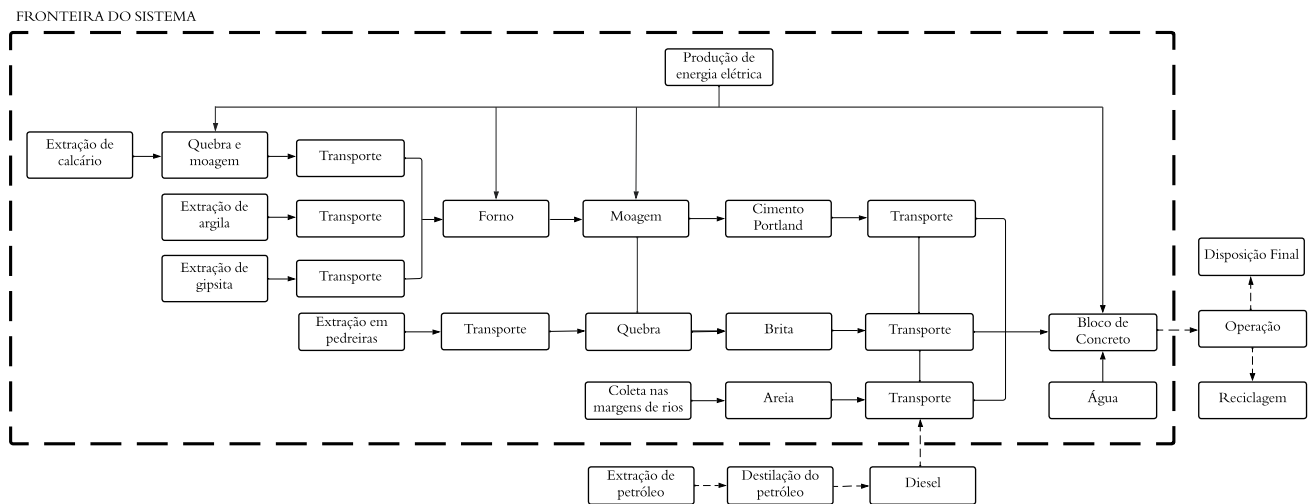
De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2009, a fronteira do sistema se refere à interface entre um sistema de produto e o meio ambiente, especificando quais processos elementares fazem parte do sistema analisado.

Bloco de Concreto

O processo elementar de produção do bloco de concreto é alimentado pelos processos de produção do cimento, areia, brita, pó de pedra e dos processos de geração de energia elétrica e consumo de água. Neste contexto, a brita e o pó de pedra, ambos derivados do basalto e sujeitos a métodos de fragmentação similares, foram agrupados em um único processo dentro do sistema do produto.

O sistema do produto para o Bloco de Concreto é apresentado na Figura 4.8, incluindo sua respectiva fronteira.

Figura 4.8 – Fronteira do sistema do bloco de concreto



Fonte: Autoria própria

As matérias-primas são dosadas em proporções específicas, garantindo uma mistura homogênea, que é então introduzida em uma máquina misturadora para assegurar uma uniformidade consistente. Em seguida, a mistura resultante é depositada em moldes que determinarão a forma e o tamanho dos blocos. Esses moldes são submetidos a vibração a fim de eliminar bolhas de ar, garantindo que o concreto preencha de maneira completa e uniforme cada cavidade.

Os blocos, uma vez moldados, são submetidos a um processo de cura, no qual são mantidos em condições ambientais controladas em relação à umidade e temperatura. Essa etapa possibilita que o concreto ganhe resistência gradualmente.

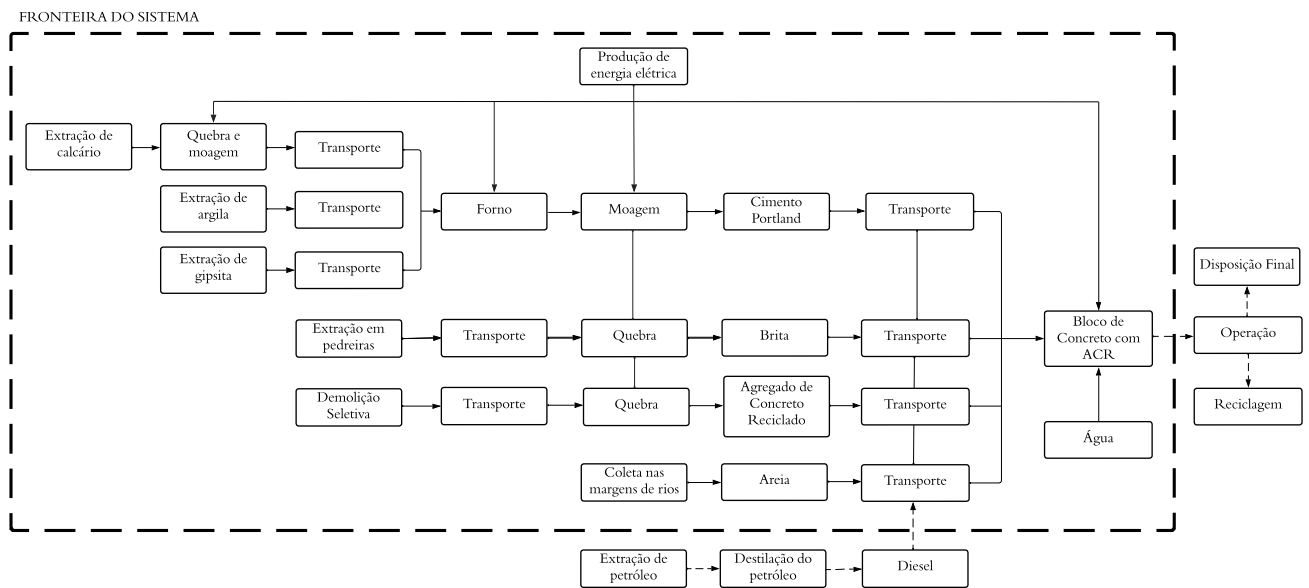
Após o adequado período de cura, os blocos são desmoldados. Nesse estágio, eles já têm a forma final, mas continuam a adquirir resistência ao longo do tempo.

Por fim, os blocos passam por inspeções para garantir que atendam aos padrões de qualidade, podendo incluir verificações visuais, medições de dimensões e ensaios de resistência à compressão. Os blocos aprovados são então armazenados e preparados para o processo de distribuição.

Bloco de Concreto com ACR

No caso do Bloco de Concreto com ACR, os agregados graúdos que compõem 20% do total de agregados são obtidos por meio da fragmentação de concreto reciclado. Portanto, foram considerados somente os processos de transporte e fragmentação dos resíduos em diâmetros menores (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Fronteira do sistema do bloco de concreto com ACR



Fonte: Autoria própria

É importante salientar que, de acordo com a ABNT NBR 15116:2021, os materiais empregados na produção dos agregados reciclados devem pertencer à Classe A, sendo proibida a presença de quaisquer substâncias em sua composição que possam comprometer a hidratação, o endurecimento do cimento, bem como a proteção da armadura contra corrosão e a durabilidade do produto final.

Esquadria Metálica

O processo de fabricação do alumínio, de acordo com a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), começa com a extração da bauxita, seguida pela etapa de beneficiamento, em que o minério é britado, peneirado e estocado em pilhas antes de ser transportado para a fábrica.

Na fábrica, a primeira etapa de produção é denominada Refinaria, a qual consiste em extrair o óxido de alumínio (alumina) da bauxita. Esse procedimento é realizado por meio de reações químicas em soluções alcalinas, sob altas pressões e temperaturas, de acordo com o processo Bayer. A alumina é então transportada em caminhões-silo até as Salas Fornos.

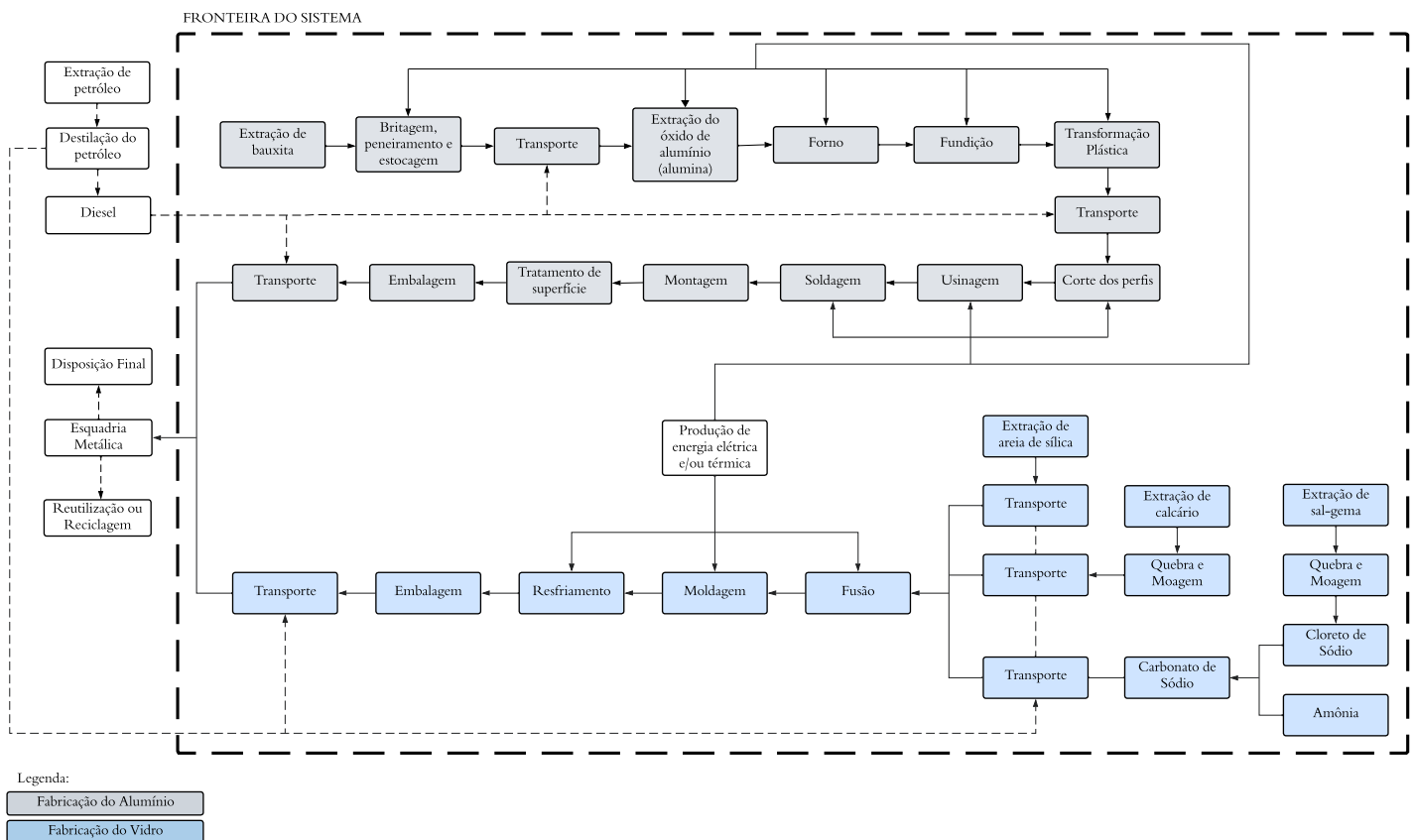
Nos fornos, além da alumina, são adicionados a pasta anódica, composta por piche e coque, e o banho eletrolítico, composto principalmente por fluoreto. Por meio da redução eletrolítica ocorrida em fornos do tipo Söderberg, a alumina é transformada em alumínio líquido, que é transportado em caminhões para as áreas da Fundição.

O processo de fundição refere-se à fusão do metal sólido para o estado líquido, seguida pelo despejo em moldes específicos para solidificação. A porção solidificada, que configura a

peça fundida, é ejetada ou removida do molde para concluir o processo. Em seguida, os produtos são moldados em formato de lingotes, tarugos, placas, rolos caster ou vergalhões. Os mesmos também podem passar por processos de laminação e extrusão, de acordo com suas necessidades específicas, como é o caso das esquadrias metálicas.

As etapas do processo de fabricação do alumínio contempladas neste estudo, bem como aquelas que estão fora da fronteira do sistema, são indicadas na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Fronteira do sistema da esquadria de alumínio



Fonte: Autoria própria

Como mencionado previamente, as esquadrias metálicas possuem seções envidraçadas. Dessa forma, o sistema do produto também compreende os processos de fabricação do vidro.

De acordo com Maia (2003), o vidro é tradicionalmente feito a partir de matérias-primas como areia de sílica, carbonato de sódio e calcário. Esses ingredientes básicos são misturados em proporções específicas como descrito no item 4.4.4 - Fluxo de Referência.

Essa mistura é aquecida a altas temperaturas em um forno, em um processo de fusão que converte os ingredientes em um líquido denominado vidro fundido.

O vidro fundido é retirado do forno e é moldado de várias maneiras. Existem diferentes métodos de formação, como a técnica de sopro para a produção de objetos ocós, o processo

de flutuação para a fabricação de vidro plano, e o processo de moldagem para objetos mais complexos.

Após a formação, o vidro é gradualmente resfriado em um processo chamado de *têmpera*. O resfriamento controlado é fundamental para evitar tensões internas no vidro, garantindo sua durabilidade e resistência.

O vidro resfriado é cortado e moldado de acordo com as especificações desejadas. Essa etapa pode incluir o corte de folhas para produzir diferentes formas e tamanhos, além de processos adicionais para adicionar detalhes ou acabamentos especiais.

O produto passa então por rigorosos controles de qualidade para garantir que atenda aos padrões estabelecidos. A inspeção pode incluir verificações de espessura, uniformidade, ausência de bolhas e outras imperfeições.

Quando finalizado, o vidro é embalado de maneira adequada para proteção durante o transporte e armazenamento.

De posse dos perfis extrudados de alumínio e das chapas de vidro, pode-se dar início ao processo de montagem das esquadrias.

De acordo com a Escola de Administração Fazendária (ESAF, 2022), o processo de fabricação de esquadrias, especialmente as feitas de alumínio, envolve várias etapas. De início, tem-se o projeto detalhado, incluindo as dimensões e as especificações técnicas. Uma vez concluído o projeto, a etapa subsequente compreende o corte dos perfis de alumínio, os quais são fornecidos em formas extrudadas, como detalhamento previamente. Esses perfis são cortados de acordo com as dimensões especificadas no projeto, manualmente ou por máquinas automáticas, dependendo da escala da produção.

Após o corte, os perfis podem passar por processos de usinagem, como furação, fresagem ou corte de encaixes, para criar as peças necessárias para a montagem das esquadrias. Em determinados casos, partes das esquadrias são soldadas para garantir uma união sólida e durável, utilizando técnicas como soldagem MIG ou soldagem a arco.

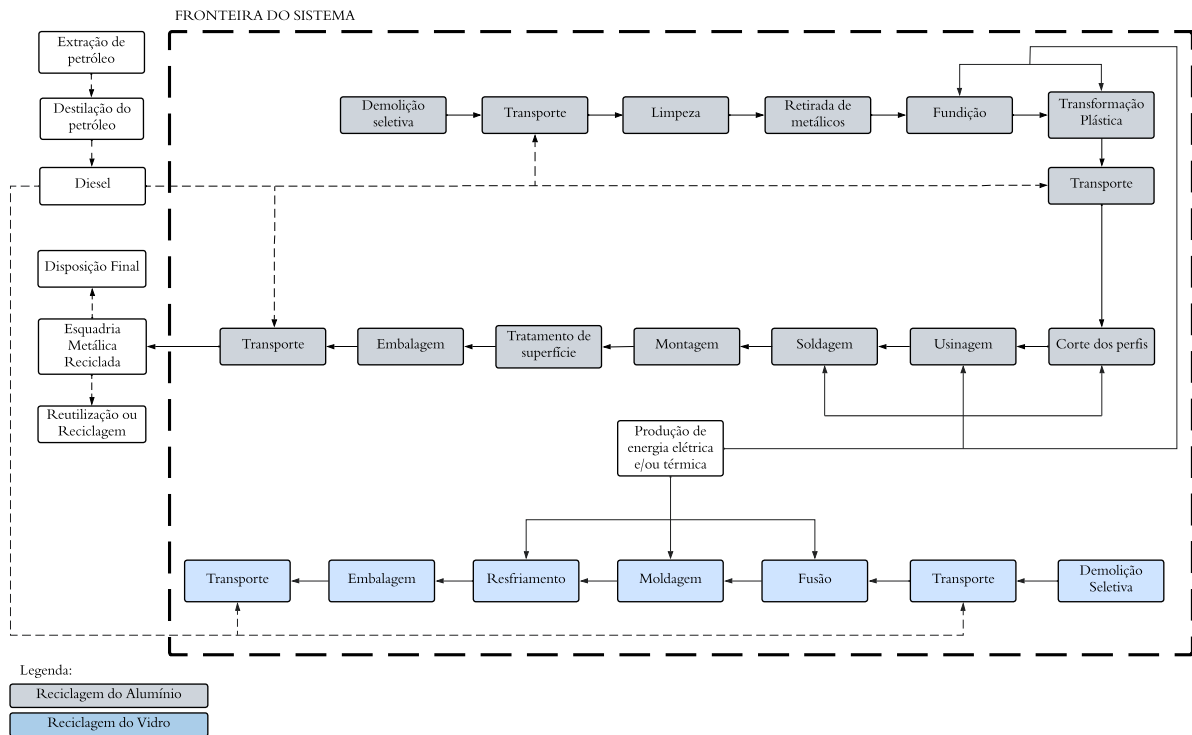
A fase seguinte envolve a montagem propriamente dita, onde as peças cortadas e usinadas são unidas conforme as diretrizes do projeto. Isso inclui a fixação das peças por meio de parafusos, rebites ou outros métodos de união. Após a montagem, as esquadrias metálicas, especialmente as de alumínio, são submetidas a tratamentos de superfície, tais como anodização, pintura eletrostática, ou outros revestimentos, visando aprimorar a resistência à corrosão e conferir um acabamento estético. Por fim, as esquadrias são devidamente embaladas para prevenir danos durante seu transporte.

Esquadria Metálica Reciclada

A reciclagem do alumínio resulta na produção do que a indústria denomina "Alumínio Secundário". Inicialmente, o material coletado é submetido a processos de separação e classificação, envolvendo a remoção de contaminantes, como plásticos ou outros metais, para garantir uma qualidade superior no material reciclado. A sucata de alumínio é então fragmentada em pedaços menores, visando aumentar a área superficial e facilitar a fusão durante a etapa subsequente do processo.

A partir do estágio de fusão, no qual as sucatas e antelgas são adicionadas aos fornos da fundição juntamente com o alumínio líquido, o produto passa a seguir os mesmos processos de produção do Alumínio Primário, conforme apresentado no fluxograma na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Fronteira do sistema da esquadria de alumínio reciclada



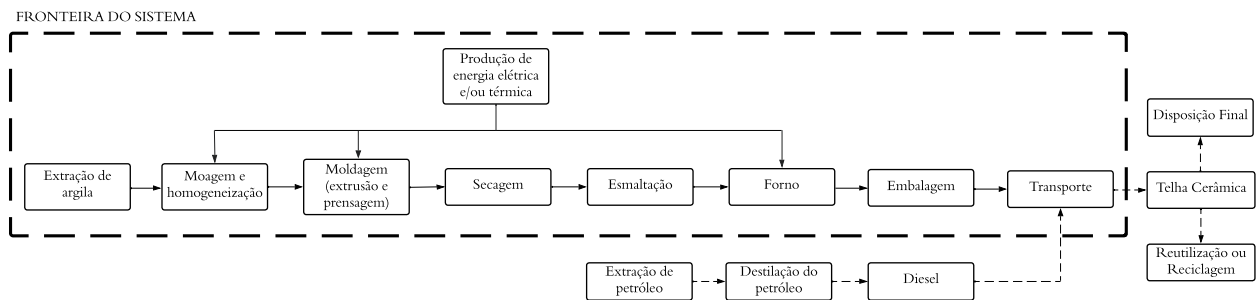
Fonte: Autoria própria

O processo de reciclagem do vidro assemelha-se ao do alumínio. Inicialmente, os resíduos de vidro coletados passam por uma fase de lavagem e separação. Posteriormente, o material é triturado e segue, então, as mesmas etapas de produção do produto primário, iniciando pelo processo de fusão do material, convertendo-o ao seu estado líquido e, em seguida, passando pela etapa de moldagem e resfriamento.

Telha Cerâmica

O processo de fabricação das telhas cerâmicas é delineado conforme detalhado por Bastos (2003). Na Figura 4.12 é apresentado o sistema de produção das telhas cerâmicas, destacando a fronteira que delimita os processos considerados neste estudo.

Figura 4.12 – Fronteira do sistema da telha cerâmica



Fonte: Autoria própria

O processo de fabricação das telhas cerâmicas inicia-se com a extração da argila. Posteriormente, a matéria-prima é submetida a processos especializados para a remoção de impurezas, atingindo a composição desejada.

A etapa subsequente envolve a moagem e homogeneização da argila para garantir uma consistência uniforme. Esse processo resulta na formação de uma massa cerâmica que será submetida à moldagem para a produção das telhas, a qual poderá ser realizada por meio de prensagem, extrusão ou outros métodos, dependendo do tipo específico de telha a ser produzido.

As telhas moldadas passam então por um processo de secagem para remover a umidade. Esse procedimento pode ocorrer em ambientes controlados para evitar deformações ou rachaduras durante a secagem.

Em determinados casos, as telhas cerâmicas podem ser esmaltadas, recebendo uma camada de esmalte em sua superfície. Essa técnica não apenas confere uma estética aprimorada, mas também pode aprimorar a resistência e durabilidade do produto.

Posteriormente tem-se a etapa de queima, onde as telhas, quer sejam secas ou esmaltadas, vão para os fornos e são submetidas a elevadas temperaturas. Esse estágio transforma a argila em cerâmica sólida, conferindo as propriedades finais às telhas.

Após o cozimento, as telhas são submetidas a uma inspeção de qualidade para garantir que atendam aos padrões estabelecidos. Essa verificação inclui a análise de dimensões, resistência, cor e acabamento.

As telhas que atendem aos critérios estabelecidos na inspeção de qualidade são então

embaladas e preparadas para distribuição.

Telha Cerâmica Restaurada

A fim de viabilizar a reutilização de telhas cerâmicas como um processo eficaz em termos de desempenho, é necessário que sejam seguidos uma série de passos para assegurar sua adequada condição e integração efetiva em um novo telhado.

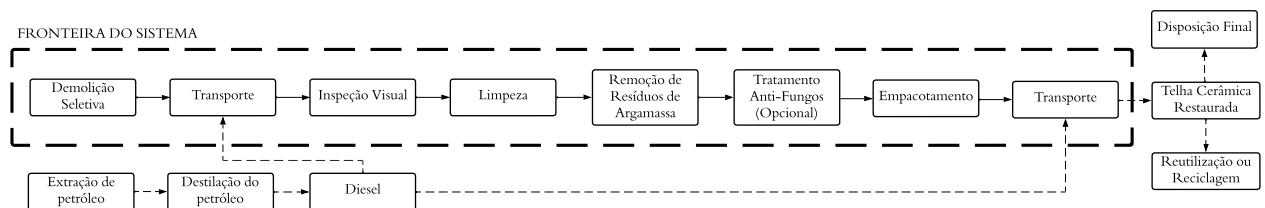
Inicialmente, é importante que seja realizada uma inspeção visual minuciosa das telhas antigas, com o intuito de identificar danos significativos, rachaduras ou desgaste excessivo.

As telhas que são consideradas em boas condições passam, então, por um processo de limpeza para a remoção de sujeira, musgo ou outros detritos acumulados. Esse procedimento pode ser executado por meio de escovas de cerdas macias em conjunto com água. Além disso, é importante realizar a remoção de resíduos antigos de argamassa ou reboco, procedimento que pode ser efetuado com o auxílio de espátulas ou escovas metálicas.

Por fim, um passo crucial consiste na aplicação de um tratamento antifúngico, visando à proteção integral do produto.

Considerando essas etapas, o sistema do produto para o cenário de telhas cerâmicas reutilizadas é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Fronteira do sistema da telha cerâmica restaurada

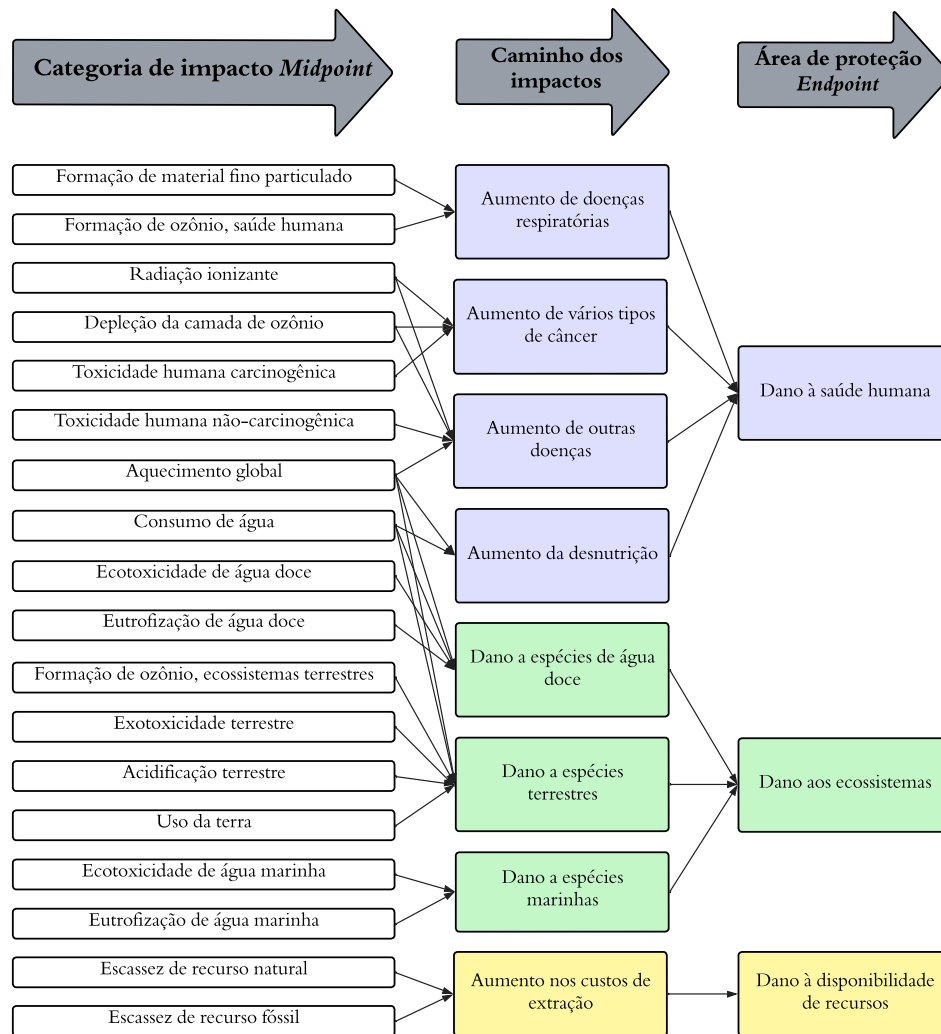


Fonte: Autoria própria

4.4.10 Categorias de Impacto

Para obter os impactos potenciais dos sistemas dos produtos avaliados foi utilizado o método ReCiPe 2016 *Midpoint (H)*. O impactos ambientais caminham a partir dos processos do sistema do produto (Inventário), passando pelas categorias de impacto *Midpoint* (Pontos Intermediários), até as categorias *Endpoint* (Pontos de Extremidade), como ilustrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Visão geral da estrutura ReCiPe 2016



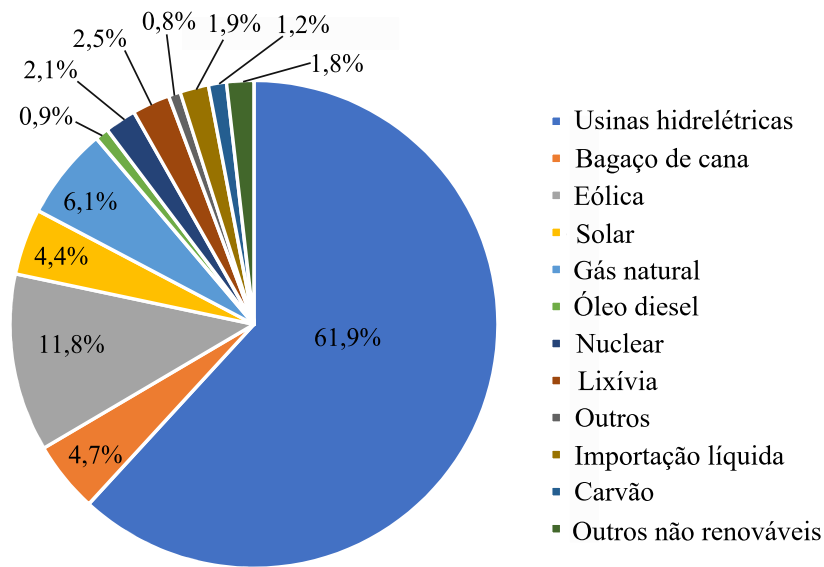
Fonte: Adaptado de RIMV (2018)

A caracterização *Midpoint* utiliza indicadores localizados ao longo dos processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto antes de chegar ao ponto final da mesma, vinculando os resultados da análise do inventário do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais da categoria (ABNT NBR ISO 14040:2009).

4.4.11 Mix Energético

Na base de dados *ELCD 3.2* eram disponibilizadas apenas matrizes energéticas de países europeus. Assim, optou-se por adotar a matriz energética mais semelhante à brasileira, na qual 62% da fonte de energia elétrica provém de usinas hidrelétricas, de acordo com o gráfico da Figura 4.15.

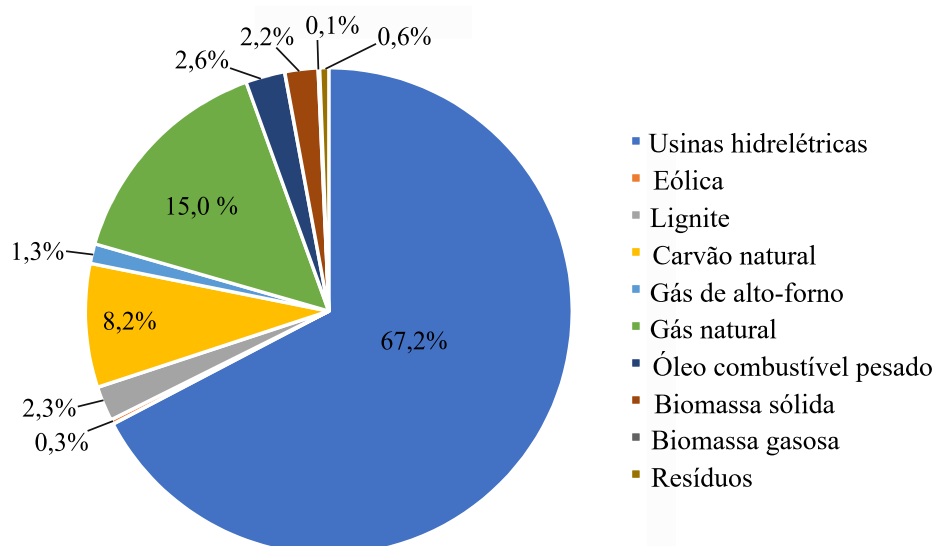
Figura 4.15 – Matriz energética do Brasil



Fonte: EPE (2023)

Dos países analisados, a Áustria apresentou a matriz de energia elétrica mais similar à brasileira, tendo 67% de sua fonte energética proveniente de usinas hidrelétricas e o restante dividido entre fontes de energia eólica, gás natural, carvão natural, biomassa e outros, de acordo com o gráfico da Figura 4.16.

Figura 4.16 – Matriz energética da Áustria



Fonte: ELCD 3.2 (2015)

4.5 Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) envolve a elaboração de um inventário de fluxos elementares, que incluem materiais ou energia retirados do meio ambiente, bem como todas as emissões do sistema do produto para o ambiente.

A partir da coleta dos dados, de acordo com a unidade funcional estabelecida, foi calculado o consumo dos materiais para a construção das Residências 1 e 2, bem como o consumo energético para a fabricação dos produtos. Na Tabela 4.11 são apresentados os dados do consumo de materiais para a construção da Residência 1.

Tabela 4.11 – Materiais para a construção da Residência 1

Componente construtivo	Material	Quantidade de material (kg)	
Alvenaria Estrutural	Cimento	957,43	
	Areia	5647,52	
	Brita	6173,90	
	Pó de Pedra	6903,68	
	Água	1186,07	
Esquadria Metálica	Bauxita	115,37	
	Vidro	Sílica	48,82
		Barrilha	11,46
		Calcário	9,50
Telha Cerâmica	Argila	3792	

Fonte: Autoria própria

Da mesma forma, o consumo dos materiais para a construção da Residência 2 foi calculado e é apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Materiais para a construção da Residência 2

Componente construtivo	Material	Quantidade de material (kg)
Alvenaria Estrutural	Cimento	957,43
	Areia	5647,52
	Brita e Pó de Pedra	9332,56
	ACR	3745,02
	Água	1186,07

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 4.13 são apresentados os dados relacionados ao consumo energético para a fabricação dos produtos.

Tabela 4.13 – Consumo energético para a fabricação dos produtos

Componente construtivo	Material	Consumo médio de energia elétrica (MJ)	Consumo médio de energia térmica (MJ)
Alvenaria Estrutural	Bloco de Concreto	1509,59	-
	Bloco de Concreto com ACR	1388,09	-
Esquadria Metálica	Alumínio Primário	1239,74	783,04
	Alumínio Secundário	64,33	139,74
	Vidro	85,43	432,24
Telha Cerâmica	Argila	288,97	3580,16

Fonte: Autoria própria

Para o transporte rodoviário, processo comum aos três elementos construtivos analisados, foi considerado um consumo de 0,25 litros de combustível por quilômetro percorrido.

Destaca-se que, de acordo com a base de dados utilizada para avaliar os sistemas dos produtos do estudo em questão, o impacto do transporte é calculado proporcionalmente ao peso dos materiais transportados. Dessa forma, os valores do peso, expressos em toneladas, multiplicados pela distância percorrida, em quilômetros, para cada um dos produtos, são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Peso × Distância de transporte dos materiais para a Residência 1

Produto	Peso (kg)	Distância de Transporte (km)	Peso × Distância (t × km)
Cimento	957,43	740	708,50
Areia	5647,52	190	1073,03
Brita e Pó de Pedra	13077,58	140	1830,86
Telha Cerâmica	2274,60	95	216,09
Alumínio	21,90	367	8,04
Vidro	67,80	63	4,27
Esquadria	89,70	194	17,40

Fonte: Autoria própria

No contexto do Bloco de Concreto com ACR e da Telha Cerâmica para reutilização, foi considerada a obtenção desses produtos na própria cidade de São Carlos (SP), com uma distância de transporte estipulada em 30 quilômetros. Para os demais materiais (cimento, areia, brita e pó de pedra), as distâncias permaneceram as mesmas.

Para a reciclagem das esquadrias metálicas, as indústrias responsáveis pela fabricação dos materiais primários também conduzem o processo de reciclagem. Portanto, foi mantida a mesma distância mencionada anteriormente. No entanto, é importante ressaltar que outra limitação identificada no estudo está relacionada à impossibilidade de rastrear todas as distâncias percorridas pelos produtos (alumínio e vidro) até as fábricas para serem reciclados.

Sendo assim, os valores do peso pela distância percorrida, para cada um dos produtos da Residência 2, são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Peso × Distância de transporte dos materiais para a Residência 2

Produto	Peso (kg)	Distância de Transporte (km)	Peso X Distância (t*km)
Cimento	957,43	740	708,50
Areia	5647,52	190	1073,03
Brita e Pó de Pedra	9332,56	140	1306,56
Telha Cerâmica	2274,60	30	216,09
Alumínio	21,90	97	2,12
Vidro	67,80	63	4,27
Esquadria	89,70	194	17,40
Agregado de Concreto Reciclado	3745,02	30	112,35

Fonte: Autoria própria

5 Resultados e Discussões

Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

A fase de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) tem como principal objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto, utilizando os dados compilados no ICV. Essa análise permite direcionar esforços para áreas específicas que possam ser aprimoradas visando a redução dos impactos ambientais associados ao sistema em questão.

Para a seleção das categorias de impacto, foram considerados os efeitos dos processos sob uma perspectiva local, logística e ambiental. As cidades envolvidas na aquisição e produção dos produtos dos sistemas estudados estão situadas na região Sudeste do Brasil, mais especificamente em São Paulo e no sul de Minas Gerais. Essa região abrange parte da Mata Atlântica e do Cerrado, desempenhando um papel fundamental na preservação da biodiversidade desses biomas.

Ainda, a região abriga a bacia hidrográfica do Rio Paraná, que estende-se por 4.880 km e alimenta dois importantes sistemas hidrográficos. O primeiro é a própria Bacia do Paraná, situada no Brasil, e o segundo é a Bacia do Rio da Prata, que abrange também os territórios boliviano, argentino, uruguaio e paraguaio. Esse rio, o segundo mais longo da América do Sul e um dos mais extensos do mundo, desempenha um papel crucial no abastecimento urbano residencial da área mais populosa do país, além de contribuir para o dinamismo econômico da região (Guitarrara, 2021).

Conforme mencionado anteriormente, a modelagem dos sistemas de produtos foi realizada utilizando o *software OpenLCA*, e os resultados da AICV foram obtidos por meio do método de análise de impacto ReCiPe 2016 *Midpoint (H)*, disponível no mesmo *software*. Esse método foi desenvolvido em colaboração entre o Instituto Nacional Holandês de Saúde Pública e Meio Ambiente (RIVM), a Universidade Radboud de Nijmegen, a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia e a PRÉ (*Pre Consultants*), uma empresa de consultoria especializada em ACV.

O método ReCiPe 2016 *Midpoint (H)* adota a abordagem de ponto médio, especificamente sob a perspectiva hierárquica. Nessa abordagem, os impactos ambientais são avaliados em um nível intermediário, situado entre as emissões iniciais e os efeitos finais sobre o meio

ambiente e a saúde humana. Esse procedimento é alcançado por meio da associação de indicadores de impacto a parâmetros ambientais específicos. A abordagem de ponto médio proporciona uma avaliação mais completa e integrada dos impactos ambientais, ao considerar não apenas as emissões isoladas, mas também os possíveis efeitos dessas emissões sobre o meio ambiente e a saúde humana.

A perspectiva hierárquica, escolhida para este método, é amplamente aceita pela comunidade científica e pelos formuladores de políticas públicas. Essa perspectiva baseia-se em fatos respaldados por documentos científicos ou políticas que possuem conhecimento suficiente, sendo direcionada para o médio prazo em termos temporais.

A análise abrangeu 15 categorias de ponto médio dentre as 18 disponibilizadas pelo método. As categorias de impacto consideradas foram:

- Formação de material fino particulado (FMP);
- Escassez de recurso fóssil (ERF);
- Ecotoxicidade de água doce (ETA);
- Eutrofização de água doce (EA);
- Aquecimento global (AG);
- Toxicidade humana carcinogênica (THC);
- Toxicidade humana não-carcinogênica (THNC);
- Radiação ionizante (RI);
- Escassez de recurso natural (ERN);
- Formação de ozônio, saúde humana (FOH);
- Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (FOET);
- Depleção da camada de ozônio (DO);
- Acidificação terrestre (AT);
- Ecotoxicidade terrestre (ETT);
- Consumo de água (CA).

No Apêndice A, encontra-se uma breve definição das categorias de impacto da metodologia ReCiPe 2016 *Midpoint (H)*. Destaca-se que a categoria "Uso da Terra" não foi incluída, pois não apresentou uma contribuição significativa nos sistemas dos produtos avaliados. Da mesma forma, as categorias relacionadas aos recursos de água marinha não foram consideradas, uma vez que estão fora do escopo geográfico deste estudo.

5.1 Blocos de Concreto

Para a análise comparativa, são apresentados, na Tabela 5.1, os valores totais dos impactos dos dois tipos de blocos para cada uma das categoria de impacto avaliadas. É possível constatar que, como esperado, houve uma redução nos impactos ambientais em todas as categorias analisadas. No entanto, essa redução foi pequena em termos de porcentagem, levando em consideração a unidade funcional analisada.

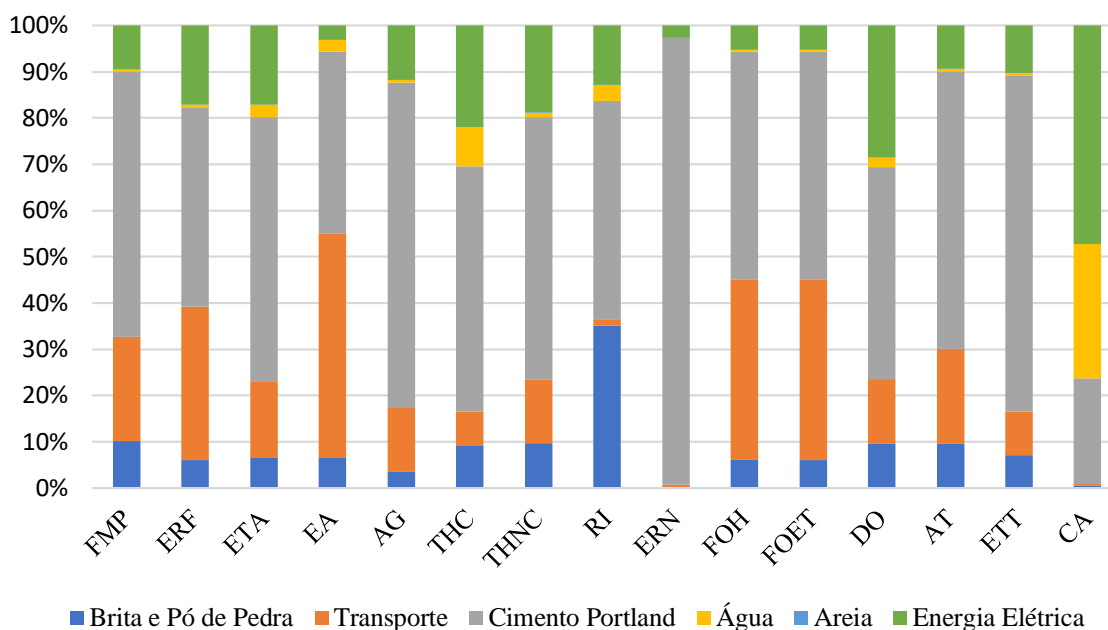
Tabela 5.1 – Redução dos impactos ambientais devido à utilização de ACR

Categoria de Impacto	Unidade	Blocos de Concreto	Blocos de Concreto com ACR	Redução do Impacto (%)
Formação de material fino particulado	kg PM2.5 eq	0,9055	0,8454	6,65
Escassez de recurso fóssil	kg oil eq	153,9141	142,3934	7,49
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,0335	0,0317	5,44
Eutrofização de água doce	kg P eq	1,83E-04	1,67E-04	8,54
Aquecimento global	kg CO2 eq	1233,3886	1186,5018	3,80
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB	0,1364	0,1291	5,38
Toxicidade humana não-carcinogênica	kg 1,4-DCB	7,9659	7,4789	6,11
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	13,8952	12,3278	11,28
Escassez de recurso natural	kg Cu eq	0,5613	0,5595	0,31
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	3,5542	3,2934	7,34
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NOx eq	3,5922	3,3294	7,32
Depleção da camada de ozônio estratosférica	kg CFC11 eq	1,47E-04	1,37E-04	6,90
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	2,8294	2,6531	6,23
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	158,7674	152,2109	4,13
Consumo de água	m ³	4,5153	4,3337	4,02

Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

Na Figura 5.1 é apresentado um gráfico de barras com as contribuições dos materiais constituintes do Bloco de Concreto para cada uma das categorias de impacto.

Figura 5.1 – Contribuição dos materiais do bloco de concreto nas categorias de impacto



Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

Com base no gráfico, observa-se que o cimento Portland foi o material que apresentou os maiores impactos ambientais nas categorias avaliadas. No entanto, ao considerar o Bloco de Concreto com ACR, a reciclagem, que está focada na substituição dos agregados graúdos (brita e pó de pedra), não se mostra tão atrativa em termos de redução dos impactos ambientais.

Apesar da restrição imposta pela ABNT NBR 15116:2021, que permite a substituição de apenas 20% da quantidade total de agregados, diversos estudos já exploram a variação da quantidade de ACR, desafiando essa limitação. Um exemplo é o estudo conduzido por Buttler (2007), no qual foi investigada a substituição de 33% a 100% de agregados reciclados de blocos e vigotas. O objetivo da pesquisa foi avaliar a incorporação de agregados reciclados de concreto em blocos estruturais para três classes de resistência (4,5 MPa, 8,0 MPa e 12,0 MPa).

De maneira geral, em relação aos blocos de concreto, independente do grupo avaliado, todas as unidades atenderam aos requisitos referentes às propriedades físicas e mecânicas, com exceção dos blocos compostos por agregados miúdos. De acordo com Buttler (2007), esse cenário evidencia a viabilidade técnica da produção de blocos estruturais de concreto utilizando agregados graúdos reciclados de concreto. Ele ainda destacou que somente a propriedade de retração por secagem foi afetada pelos agregados reciclados, e essa influência foi atenuada pela redução da distância entre as juntas de controle. Em síntese, a pesquisa demonstrou a viabilidade técnica, econômica e eficaz mitigação dos efeitos adversos, ressaltando o potencial positivo da

incorporação de agregados reciclados na fabricação de blocos estruturais de concreto.

Ainda, com base na revisão bibliográfica conduzida pelo mesmo autor, diversos pesquisadores chegaram à conclusão de que, para composições próximas a 30% de agregado de RCD, os resultados foram satisfatórios. Além disso, ao considerar apenas a fração graúda reciclada, os resultados estiveram em conformidade com a ABNT NBR 7173:1982 para uma taxa de substituição de até 40% em relação ao total de agregados. A partir dessas constatações, os estudiosos apontam para as potencialidades de utilização de agregados de RCD na produção de blocos de concreto, destacando a necessidade de cautela ao empregar a fração miúda (< 2,4 mm) na fabricação dessas unidades.

No entanto, a brita, juntamente com pó de pedra, apresentou um impacto considerável de aproximadamente 40% na categoria de "Radiação Ionizante". Isso pode ser explicado pela presença do processo de moagem, que gera poeira e partículas finas. Se a pedra basalto contiver substâncias radioativas, como o urânio e o tório, que são fontes naturais de radiação ionizante, essas partículas têm o potencial de contribuir para a dispersão de material radioativo, resultando em um aumento perceptível no impacto ambiental associado a essa categoria específica.

5.2 Esquadrias Metálicas

Na Tabela 5.2, são expostos os índices dos impactos relativos às esquadrias metálicas, considerando tanto a versão primária quanto a reciclada. São também evidenciadas as reduções advindas do processo de reciclagem do alumínio e do vidro nas categoria de impacto.

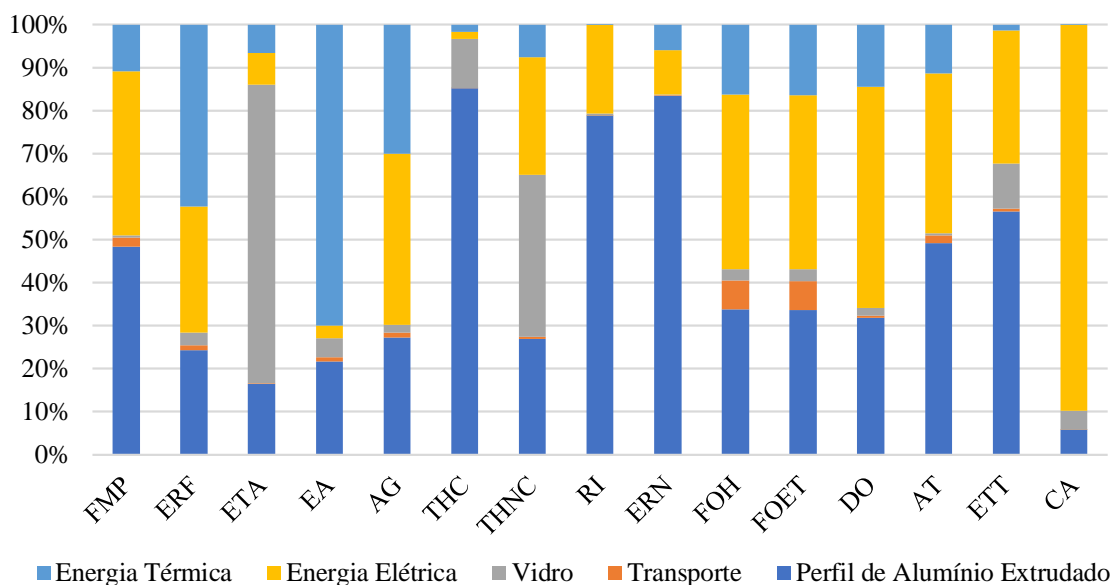
Tabela 5.2 – Redução dos impactos ambientais devido à reciclagem das esquadrias

Categoria de Impacto	Unidade	Esquadria	Esquadrias Recicladas	Redução do Impacto (%)
Formação de material fino particulado	kg PM2.5 eq	0,2068	0,0409	80,25
Escassez de recurso fóssil	kg oil eq	78,3369	21,3032	72,81
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,0690	0,0101	85,31
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,0004	0,0003	29,18
Aquecimento global	kg CO2 eq	330,3051	82,6516	74,98
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB	1,5614	0,1856	88,12
Toxicidade humana não-carcinogênica	kg 1,4-DCB	5,0315	0,8799	82,51
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	8,0678	1,2763	84,18
Escassez de recurso natural	kg Cu eq	0,1212	0,0153	87,34
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,4016	0,0914	77,25
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,4059	0,0927	77,15
Depleção da camada de ozônio estratosférica	kg CFC11 eq	7,53E-05	1,57E-05	79,16
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	0,6531	0,1268	80,59
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	49,5512	8,7928	82,26
Consumo de água	m ³	2,0714	0,2180	89,48

Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

Para avaliar os impactos individuais de cada material na produção do alumínio primário e, conseqüentemente, compreender o efeito da redução desses impactos por meio da reciclagem desse produto, foi elaborado o gráfico ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Contribuição dos materiais da esquadria metálica nas categorias de impacto



Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

Analisando o gráfico apresentado na Figura 5.2, é possível identificar que o maior impacto ambiental ocorre no processo de produção do alumínio, especialmente devido ao elevado consumo energético associado a esse processo. Este cenário justifica os resultados favoráveis na redução dos impactos proporcionados pela reciclagem do alumínio. A prática da reciclagem desse material geralmente demanda menos processamento, resultando em uma diminuição na Formação de Material Particulado. Além disso, o processo de fusão do alumínio reciclado geralmente emite menos partículas em comparação com a produção a partir de minérios.

Quanto ao Aquecimento Global, é importante observar que a produção primária de alumínio é intensiva em emissões de gases de efeito estufa, principalmente dióxido de carbono (CO₂), devido ao processo eletrolítico envolvido.

As categorias de Escassez de Recursos Fósseis, Ecotoxicidade e Acidificação Terrestre são significativamente impactadas pela extração da bauxita, essencial para a produção de alumínio primário. Por eliminar a necessidade de novas extrações de bauxita, a prática da reciclagem beneficia diretamente essas categorias.

No que se refere às categorias de Depleção da Camada de Ozônio e Radiação Ionizante, percebe-se que a extração e os processos relacionados à bauxita para a produção do alumínio

primário exercem influência nessas categorias. Embora as concentrações normais de elementos radioativos na bauxita sejam geralmente baixas, é importante considerar que, durante o processo de obtenção do alumínio, especialmente no método Bayer, pequenas quantidades de elementos radioativos, como urânio e tório, podem estar presentes como impurezas. Essas impurezas podem ser introduzidas no processo durante a extração e o beneficiamento da bauxita. Assim, apesar das concentrações usuais serem relativamente baixas, a presença desses elementos pode impactar as categorias mencionadas.

5.3 Telhas Cerâmicas

Na Tabela 5.3, são apresentados os índices dos impactos relativos às telhas cerâmicas primárias e restauradas para reutilização, juntamente com a redução dos impactos entre os dois processos.

O processo de recuperação das telhas cerâmicas para reutilização demonstrou ser mais vantajoso em termos de redução de impactos ambientais. A reutilização, ao contrário da reciclagem, não envolve modificações intensivas no produto original, como processamento e refabricação, as quais consomem considerável quantidade de energia. A reutilização, por sua vez, utiliza o produto original sem a necessidade de tais processos intensivos, preservando assim a energia investida na produção original.

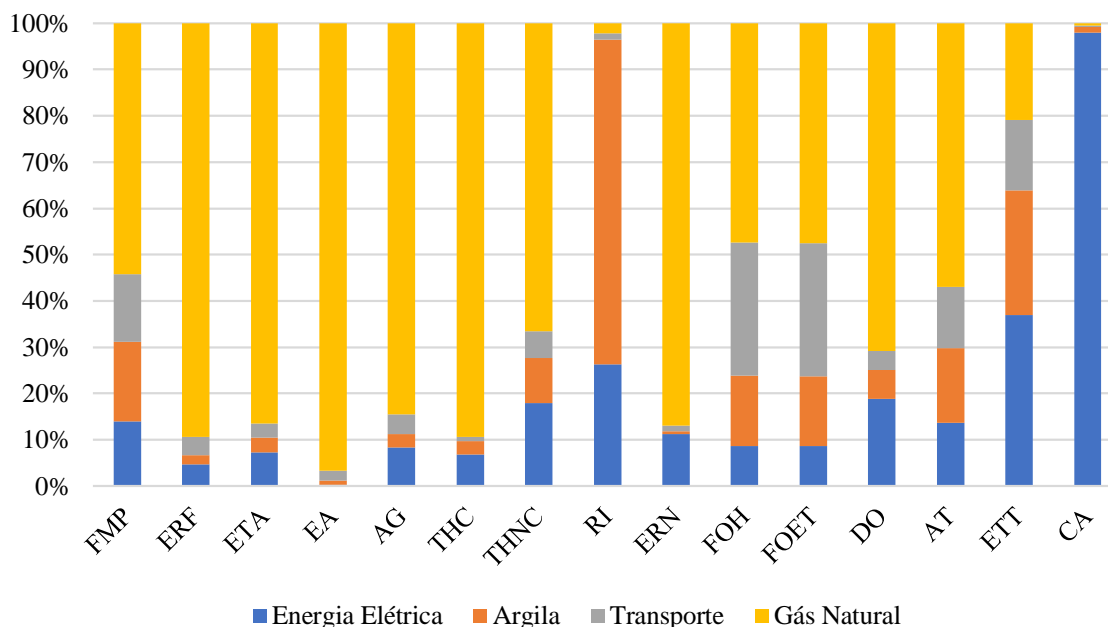
Tabela 5.3 – Redução dos impactos ambientais devido à reutilização das telhas cerâmicas

Categoria de Impacto	Unidade	Telhas Cerâmicas	Telhas Cerâmicas Reutilizadas	Redução do Impacto (%)
Formação de material fino particulado	kg PM2.5 eq	0,1182	9,52E-04	99,19
Escassez de recurso fóssil	kg oil eq	108,9932	0,2160	99,80
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,0150	1,04E-04	99,31
Eutrofização de água doce	kg P eq	3,56E-04	3,75E-07	99,89
Aquecimento global	kg CO2 eq	334,3001	0,9764	99,70
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB	0,0846	0,0013	98,44
Toxicidade humana não-carcinogênica	kg 1,4-DCB	1,6005	0,0055	99,65
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	1,3004	0,0047	99,64
Escassez de recurso natural	kg Cu eq	0,0243	5,37E-05	99,78
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,4077	0,0056	98,62
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,4133	0,0057	98,63
Depleção da camada de ozônio estratosférica	kg CFC11 eq	4,27E-05	2,35E-07	99,45
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	0,3717	0,0028	99,24
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	8,4472	0,0859	98,98
Consumo de água	m ³	0,4170	0,6011	-44,13

Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

No gráfico apresentado na Figura 5.3, é possível observar o impacto dos processos na produção das telhas cerâmicas.

Figura 5.3 – Contribuição dos materiais da telha cerâmica nas categorias de impacto



Fonte: Autoria própria, com base nos resultados de *OpenLCA* (2024)

De acordo com o gráfico da Figura 5.3, observa-se que o gás natural é o produto que possui o maior impacto nas categorias analisadas. Essa constatação está em consonância com as informações contidas no relatório "Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Seleccionados", da EPE, destacando especialmente o elevado consumo energético durante a etapa de queima das telhas em fornos. Este aspecto ressalta a importância de considerar a eficiência energética como um ponto crucial na avaliação dos impactos ambientais associados à produção de telhas cerâmicas.

O gás natural, empregado como fonte de energia térmica, representa uma fonte não renovável e, além de emitir gases de efeito estufa, acarreta impactos ambientais ao longo de sua cadeia produtiva, desde a extração até o consumo. Sua extração envolve práticas como a fratura hidráulica e a perfuração de poços, que acarretam impactos na paisagem, biodiversidade e qualidade da água, influenciando categorias como Ecotoxicidade Aquática. Além disso, a construção da infraestrutura necessária para o transporte e processamento do gás natural também gera impactos ambientais, tais como o uso de recursos naturais, alterações na biodiversidade e modificações na paisagem.

Durante a fase de queima, o uso de gás natural resulta na emissão de dióxido de carbono

(CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e partículas finas, exercendo impactos adversos na qualidade do ar e influenciando categorias associadas à poluição atmosférica e acidificação.

Já o processo de extração de argila, o qual envolve a remoção de camadas do solo para obter esse recurso mineral, resultando na utilização intensiva de recursos minerais e contribuindo para a escassez desse elemento. Essa atividade, além de influenciar diretamente a disponibilidade desses recursos, também pode ter efeitos negativos sobre o ambiente local, incluindo alterações na paisagem e possíveis impactos na biodiversidade.

Além disso, durante a extração de argila, emissões atmosféricas e partículas finas são liberadas no ar. Essas emissões, muitas vezes resultantes do uso de maquinário pesado e processos de mineração, contribuem para a poluição atmosférica e representam riscos à saúde humana.

Nesse contexto, a reutilização de telhas cerâmicas desempenha um papel crucial ao reduzir substancialmente a necessidade de extrair argila e utilizar gás natural, resultando em uma diminuição de quase 100% nos impactos ambientais em grande parte das categorias avaliadas. Essa prática demonstra ser uma estratégia eficaz na minimização dos impactos ambientais decorrentes do processo produtivo das telhas cerâmicas.

5.4 Discussão dos Resultados

Conforme a metodologia adotada para esta pesquisa, cada componente foi associado a um processo específico visando a sua reintegração no ciclo econômico. O bloco de concreto foi direcionado para o processo de reciclagem parcial, enquanto a esquadria metálica foi designada para o processo de reciclagem total. No caso da telha cerâmica, a abordagem consistiu na recuperação dos produtos, preparando-os para serem reintegrados por meio de sua reutilização.

O processo de reutilização destacou-se como a opção mais vantajosa em termos de redução dos impactos ambientais. Essa prática envolve a utilização de materiais existentes, reduzindo a demanda por novas matérias-primas e minimizando a necessidade de processos industriais intensivos em recursos naturais.

No entanto, o processo de utilização de agregado de concreto reciclado em novos blocos estruturais não demonstrou uma redução significativa dos impactos ambientais. Isso se deve, majoritariamente, ao fato de que a substituição desse material foi limitada a 20% do total de agregados. Essa limitação resultou em uma redução proporcionalmente modesta dos impactos ambientais, evidenciando que, em certas circunstâncias, as práticas de substituição podem ter um

impacto limitado na melhoria da sustentabilidade. Contudo, esse material pode ser reutilizado em maiores proporções em outros produtos, como *pavers*, pavimentos rígidos de concreto e concretos sem função função estrutural.

Em contraste, os processos de reciclagem do alumínio e do vidro para a produção de novas esquadrias metálicas apresentaram resultados favoráveis. Mesmo passando por processos industriais para a reciclagem, esses métodos demonstraram ser menos danosos ao meio ambiente em comparação com os processos para a produção primária desses produtos. Isso é particularmente significativo, pois os processos de produção primária geralmente envolvem a extração de novas matérias-primas, o que pode ter impactos ambientais mais significativos, incluindo degradação de ecossistemas e consumo intensivo de energia.

Essa análise ressalta a importância de considerar não apenas a reciclagem como uma alternativa ambientalmente amigável, mas também avaliar a eficácia de diferentes práticas, como a reutilização de materiais e produtos, para otimizar a redução dos impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida.

6 Conclusões

Os resultados deste estudo revelam que a utilização de resíduos provenientes da demolição seletiva pode resultar em uma significativa redução de impactos ambientais a depender da abordagem escolhida para seu tratamento. Os resíduos provenientes da demolição seletiva são passíveis de serem recuperados e reintegrados no ciclo produtivo por meio de práticas sustentáveis, tais como a reciclagem ou a reutilização de produtos. No entanto, é necessário realizar uma análise específica para cada escopo, considerando diversos fatores, desde os processos utilizados na recuperação até a quantidade permitida e viável de ser empregada em novos produtos, de modo a avaliar qual o processo mais eficiente para a reintrodução desses materiais no ciclo produtivo da economia.

Um ponto a ser destacado é a consolidação da demolição seletiva como uma alternativa sustentável para o fim de vida de edificações. Embora haja na literatura muitos estudos sobre a recuperação de RCD, há uma carência de pesquisas que direcionem a atenção para a fase anterior da obtenção desses resíduos. Ter um olhar cuidadoso para a etapa de demolição é fundamental, pois possibilita maximizar o reaproveitamento desses produtos.

Além disso, ressalta-se as consequências negativas da falta de códigos normativos nacionais que abordem os procedimentos de demolição e suas questões associadas. Essa ausência normativa não apenas impacta o meio ambiente, mas também compromete a segurança dos trabalhadores e da comunidade civil. Por isso, é importante que haja uma revisão da ABNT NBR 5682:1977, introduzindo nela o conceito de demolição seletiva e apresentando os métodos adequados para essa prática. Essa revisão é necessária para viabilizar um maior reaproveitamento de RCD, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria da construção e alinhando-se aos princípios da economia circular.

Também observa-se que, apesar da existência de políticas públicas e regulamentos, como a PNRS e a Resolução CONAMA n° 307/2002, as instruções e diretivas presentes nesses documentos são, muitas das vezes, ignoradas pelos setores privados que oferecem esses serviços, assim como também pelos governos municipais. Diante disso, para enfrentar o desafio do descarte inadequado de RCD, é de extrema importância que o poder público invista em ações de conscientização direcionadas à população e aos responsáveis por esse setor, ressaltando o valor da adoção de práticas sustentáveis na gestão desses materiais. Ainda, é imprescindível que haja a implementação efetiva das políticas públicas existentes, incluindo o desenvolvimento de

infraestrutura adequada para a coleta seletiva, como também para a correta destinação desses resíduos quando não mais passíveis de serem reaproveitados.

Em relação ao desenvolvimento dos sistemas dos produtos no *OpenLCA*, diversos desafios merecem consideração. Notavelmente, destaca-se a ausência de uma base de dados brasileira abrangente que contemple os processos comuns aos produtos fabricados no país, configurando-se como a principal dificuldade enfrentada no desenvolvimento do estudo.

Para superar esses desafios, é necessário investir em iniciativas que promovam o desenvolvimento e a atualização contínua de bases de dados nacionais, levando em consideração as especificidades do contexto brasileiro.

Por fim, destaca-se a importância de integrar a metodologia da ACV nos setores educacionais e no mercado de trabalho, assegurando uma compreensão abrangente e a aplicação efetiva da avaliação de impacto ambiental nas práticas industriais do país. Essa abordagem é essencial para impulsionar a transição para uma economia mais sustentável, alinhada com os princípios da economia circular.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando as limitações identificadas durante o desenvolvimento deste estudo, são apresentadas sugestões para futuras pesquisas sobre a redução de impactos ambientais por meio da demolição seletiva, sob a perspectiva da metodologia da ACV:

- Realizar estudos comparativos para outros componentes de edificações, como diferentes tipos de alvenaria, cobertura e sistemas de instalações hidráulicas e elétricas. Isso proporcionará uma compreensão mais abrangente dos impactos ambientais associados a diferentes componentes construtivos.
- Discutir o escopo do estudo para outras unidades funcionais, como edificações verticais. A análise de diferentes tipos de construções permitirá uma comparação mais holística dos impactos ambientais ao considerar variáveis específicas de cada contexto.
- Comparar o estudo de ACV utilizando diferentes bases de dados e métodos de cálculo para fins comparativos. Certificar-se de que os valores estão em concordância com os resultados obtidos pelo uso do *software OpenLCA*. Essa abordagem proporcionará compreensões sobre a sensibilidade dos resultados às escolhas metodológicas e bases de dados utilizadas.

- Introduzir algoritmos de otimização ao estudo. Isso permitirá ajustar a dosagem de RCD passível de ser incorporada em cada produto.
- Propor o desenvolvimento de um método de AICV que atenda às especificidades do contexto brasileiro. Isso é crucial para garantir uma avaliação mais precisa e alinhada com as características particulares da indústria da construção e dos padrões ambientais do país.

Referências

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. [S.l.], 2022.
- ADDIS, B. Reuso de materiais e elementos de construção. **Tradução de Christina Del Posso**. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2010.
- ARMASA. **Argamassa Expansiva para Demolição, Corte e Perfuração**. 2023. Disponível em: <<https://armasa.com.br/argamassa-expansiva/>>.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5682 - Contratação, Execução e Supervisão de Demolições**. [S.l.], Rio de Janeiro, 1977.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114 - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. [S.l.], Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721 - Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios**. [S.l.], Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípio e estrutura**. [S.l.], Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais**. [S.l.], Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116 - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio**. [S.l.], Rio de Janeiro, 2021.
- BALDASSO, P. C. P. Procedimentos para desconstrução de edificação verticalizada: estudo de caso. 2005.
- BASTOS, F. A. Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto. Florianópolis, SC, 2003.
- BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento**. 2016. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- BERGSDAL, H.; BOHNE, R. A.; BRATTEBØ, H. Projection of construction and demolition waste in norway. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 3, p. 27–39, 2007.
- BIGHETTI, E. **Resíduos de construção e demolição pedem destino adequado**. 2019. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/residuos-de-construcao-e-demolicao-pedem-destino-adequado/8573>>.
- BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and environment**, Elsevier, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

- BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified lca methodology as a complement for building certification. **Building and environment**, Elsevier, v. 44, n. 12, p. 2510–2520, 2009.
- BRITO, J. d. *et al.* Técnicas de demolição de edifícios correntes. **cadeira de Processos de Construção**, 1999.
- BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste management**, Elsevier, v. 44, p. 196–205, 2015.
- BUTTLE, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- CARDOSO, J. G. d. R. *et al.* A indústria do alumínio: estrutura e tendências. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011.
- CARVALHO, E.; BRINCK, V. B. Britagem e Moagem. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Coordenação de Processos Mineraiis–COPM, Rio de Janeiro**, 2010.
- CE100 Brasil. **Evento de Lançamento da CE100 Brasil. Ellen MacArthur Foundation: Cajamar**. [S.l.], 2015.
- CE100 Brasil. **Uma Economia Circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. [S.l.], 2017.
- CHINI, A. R.; BRUENING, S. Deconstruction and materials reuse in the united states. **The future of sustainable construction**, IeJC Gainesville, FL, USA, v. 14, n. October, p. 1–22, 2003.
- COELHO, A.; BRITO, J. de. Economic analysis of conventional versus selective demolition—a case study. **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 55, n. 3, p. 382–392, 2011.
- CONAMA. **Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil**. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente Brasília, DF, 2002.
- CRUZ, A. C. **Otimização do processo de produção de telhas por meio da utilização das ferramentas do lean manufacturing**. 2016. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- EKVALL, T. *et al.* What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. **Waste management**, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 989–996, 2007.
- EPE. **Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Balanço Energético Nacional 2022**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>> Acesso em: 03/03/24.
- FERREIRA, J. P. d. S. P. **Otimização da gestão dos resíduos de construção e demolição na ótica dos projetistas**. 2012. Tese (Doutorado), 2012.
- GÁLVEZ-MARTOS, J.-L. *et al.* Construction and demolition waste best management practice in europe. **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 136, p. 166–178, 2018.

GOMES, G. M. **Medidas Preventivas na Execução de Trabalhos de Demolição e Reabilitação de Edifícios Antigos: Técnicas e Equipamentos de Demolição**. 2010. Dissertação (Mestrado), 2010.

GUITARRARA, P. **Geografia Física do Brasil: Rio Paraná**. **Brasil Escola**. 2021. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/rio-parana.htm>>.

HONDA, W. S. **Certificação da sustentabilidade de edifícios de escritórios corporativos no Brasil**. 2016. Tese (Doutorado) — Doctoral dissertation, University of Sao Paulo, 2016.

HUIJBREGTS, M. A. *et al.* Recipe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 22, p. 138–147, 2017.

INSTITUTION, B. B. S. **BS ISO EN 15978: 2011. Sustainability of construction works-assessment of environmental performance of buildings-calculation method**. [S.l.]: British Standards Institution, 2011.

KAMRATH, P. *et al.* Deconstruction, recycling and reuse of lightweight metal constructions. In: CRC PRESS. **Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium**. [S.l.], 2018. p. 2467–2472.

KARPINSKI, L. A. *et al.* Gestão de resíduos da construção civil: uma abordagem prática no município de passo fundo-rs. **Estudos tecnológicos**, v. 4, n. 2, p. 69–87, 2008.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological economics**, Elsevier, v. 143, p. 37–46, 2018.

LUZ, B. *et al.* Economia circular holanda: Brasil: da teoria à prática. **Rio de Janeiro: Exchange**, v. 4, 2017.

MAIA, S. B. **Vidro e a sua fabricação**. [S.l.]: Rio de Janeiro: Intrínseca, 2003.

MAIDEL, B. **Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações Verticais: Estudo Comparativo entre CLT (Cross-laminated Timber) e Alvenarias Convencionais a partir do Projeto em BIM**. 2020. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2020.

MALMQVIST, T. *et al.* Life cycle assessment in buildings: The enslic simplified method and guidelines. **Energy**, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 1900–1907, 2011.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l.]: São Paulo: Atlas, 2008.

MARTINS, A. S. M. **Diretrizes para o planejamento de uma demolição sustentável em edifícios**. 2017. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

MARTINS, P. H. S. Procedimentos e projeto de demolições para edificações em concreto armado. Universidade Federal de São Carlos, 2019.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

- MESA, J. A.; FÚQUENE-RETAMOSO, C.; MAURY-RAMÍREZ, A. Life cycle assessment on construction and demolition waste: A systematic literature review. **Sustainability**, MDPI, v. 13, n. 14, p. 7676, 2021.
- MOURA, J. d. *et al.* Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: segmento celulose e papel. **Qualitec-Applus**, 2018.
- PAIVA, A. C. F. **Demolição seletiva: o conceito e a percepção dos intervenientes**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2019.
- PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Is selective demolition always a sustainable choice? **Waste Management**, Elsevier, v. 103, p. 169–176, 2020.
- QUÉHEILLE, E. *et al.* A life cycle assessment model of end-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 339, p. 130694, 2022.
- RIMV. **LCIA: the ReCiPe model**. 2018. Disponível em: <<https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>> Acesso em: 21/08/23.
- RUPPRECHT, C. D. *et al.* Multispecies sustainability. **Global Sustainability**, Cambridge University Press, v. 3, p. e34, 2020.
- RUUSKA, A.; HÄKKINEN, T. Material efficiency of building construction. **Buildings**, MDPI, v. 4, n. 3, p. 266–294, 2014.
- SÁ, J. C. D. F. d. **Normalização dos trabalhos de demolição: proposta de elaboração de um modelo de um plano de demolição**. 2013. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- SCHOENMAKERE, M. D.; GILLABEL, J. **Circular by design: Products in the circular economy**. [S.l.]: Publications Office of the European Union, 2017.
- SCOTTISHPOWER. **Demolition Of Cockenzie Power Station**. 2015. Disponível em: <https://www.scottishpower.com/news/pages/scottishpower_today_saturday_26th_september_carried_out_the_explosive_demolition_of_cockenzie_power_station.aspx>.
- SINIR. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos - Ano Base 2019**. 2021. Disponível em: <<https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>.
- SNIS. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos - Ano Base 2019**. 2021. Disponível em: <<https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>.
- SOARES, C. **Demolição do Machadinho**. 2011. Disponível em: <<https://canindesoares.com/demolicao-do-machadinho>>.
- SOUZA, R. C. C. de *et al.* Métodos estimativos da geração e composição de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. **Revista Engenharia e Construção Civil**, v. 1, n. 2, 2014.
- UGAYA, C.; NETO, J. A.; FIGUEIREDO, M. d. Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro. **Relatório da Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida-RAICV**. Brasília: IBICT/MCT, 2019.

YAZDANBAKHSH, A. A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies. **Waste management**, Elsevier, v. 77, p. 401–412, 2018.

ZANNI, S. *et al.* Life cycle assessment applied to circular designed construction materials. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 69, p. 154–159, 2018.

Apêndices

APÊNDICE A – Técnicas de Demolição

Segundo Ferreira (2012), a boa escolha do método de demolição irá traduzir-se na execução de um processo seguro, rápido e que permita um melhor aproveitamento dos resíduos de demolição, fazendo com que os danos provocados no meio ambiente sejam reduzidos. Os tipos de demolição mais comuns são:

- Demolição Manual;
- Demolição Mecânica;
- Demolição por Métodos Químicos;
- Demolição por Métodos Térmicos;
- Demolição por Métodos Abrasivos.

A escolha do tipo de demolição a ser adotado dependerá, principalmente, da condição estrutural da edificação e do tempo e custo disponíveis para sua execução.

A.1 Demolição Manual

A demolição manual é um dos métodos mais tradicionais de demolição nas construções civis. É executada com o auxílio de ferramentas manuais, como marreta, martelo, picareta e escopro.

Por ser realizada de maneira manual, permite um maior cuidado com a estrutura, possibilitando a retirada precisa de elementos, a remoção de paredes internas, revestimentos, pavimentos, telhados, portas, janelas, materiais de isolamento, instalações elétricas e hidráulicas, entre outros (Gomes, 2010).

Na maioria das vezes, é utilizada em construções pequenas, quando não se faz necessário o uso de grandes máquinas. Para realizar a demolição manual, o trabalhador deve estar equipado com par de luvas, óculos de segurança e protetor auricular, para proteção contra poeira e alto ruído. Também se faz necessário o uso de máscara respiratória semi-facial em casos onde o trabalhador estará exposto à substâncias tóxicas, como sílica e amianto, presente em materiais como cimento e tintas (Figura A.1).

Figura A.1 – Demolição manual com marreta



Fonte: Obramax (2021)

As técnicas de demolição manual podem ser conduzidas de maneira meticulosa e controlada, visando maximizar a possibilidade de reutilização e reciclagem dos materiais removidos (Gomes, 2010).

A.2 Demolição Mecânica

A demolição mecânica se caracteriza pelo uso de ferramentas mecânicas, podendo essas serem manuais, como o martelo pneumático, ou máquinas de médio e grande porte, como escavadeiras e guindastes, como ilustrado na Figura A.2.

Figura A.2 – Demolição mecânica utilizando escavadeira com rompedor



Fonte: Soares (2011)

A utilização de equipamentos de alta potência, aliada aos avanços tecnológicos, permite aumentar exponencialmente o rendimento e a rapidez das atividades de demolição. Isso reduz o esforço físico, ao mesmo tempo em que preserva a integridade e a segurança dos trabalhadores (Gomes, 2010).

Entre as vantagens desse método, destacam-se a rapidez e a eficiência do processo de demolição, permitindo a remoção de grandes volumes de material em um curto período de tempo. Há também o fator da segurança dos operadores, os quais conseguem realizar o trabalho de demolição a partir de uma distância segura. Além disso, as máquinas permitem remoção de materiais perigosos, como amianto, de forma segura e controlada (Brito *et al.*, 1999).

No entanto, a demolição mecânica é processo ruidoso e gera uma grande quantidade de poeira e vibrações. Portanto, são necessárias algumas medidas para a diminuição dos impactos ambientais e garantia da segurança dos trabalhadores e das áreas circundantes, como o uso de protetor auricular e a aspersão de água sobre os elementos demolidos, ou o uso de barreiras físicas para reduzir o espalhamento da poeira.

Bola de Demolição

A demolição mecânica utilizando bola de demolição é o método mais antigo em termos de utilização de máquinas de grande porte (Baldasso, 2005). O peso bola de demolição pode variar de 500 a 4000 kg. Ela é suspensa por uma corrente presa a um guindaste e pode ser movimentada segundo três direções: vertical (em queda), horizontal ou rotacional (Figura A.3). Essa operação é repetida conforme necessário, até que seja alcançada a demolição desejada, resultando em fragmentos de grandes dimensões (Brito *et al.*, 1999).

De acordo com a antiga ABNT NBR 5682:1977, é um técnica potencialmente perigosa e exige um afastamento de no mínimo 6 metros ou de metade da altura da edificação a ser demolida. Além disso, sua utilização é limitada a edificações de até 30 metros.

Esse método é eficaz em estruturas de concreto ou alvenaria, mas nem sempre é adequado para edifícios de grande porte ou em áreas densamente povoadas, devido ao risco de danos colaterais e à dispersão de poeira e detritos.

Figura A.3 – Demolição mecânica utilizando bola de demolição



Fonte: iStock (2020)

Demolição por Tração de Cabos Puxadores

A demolição por tração de cabos puxadores consiste no desmantelamento de estruturas por meio da aplicação de carga de tração em cabos de cordoalha de aço fixados na estrutura (Brito *et al.*, 1999). Os cabos devem estar devidamente fixados em ambas as extremidades, ou seja, na edificação e no veículo de tração, e a carga seja aplicada lenta e gradualmente. Ao aplicar a força de tração nos cabos, a estrutura é gradualmente puxada e colapsa em direção à direção desejada, geralmente em uma área pré-determinada e segura.

Por estarem submetidos a uma alta carga de tração, deve-se ter cuidado para que não haja o rompimento dos cabos, ocasionando o ricocheteamento dos mesmos (Brito *et al.*, 1999). A antiga ABNT NBR 5682:1977 estabelecia, inclusive, que a área com raio de $3/4$ do comprimento da linha de projeção deveria ser evacuada para a segurança dos trabalhadores. Além disso, a referida norma também orientava que o comprimento dos cabos deveria ser maior que 2 vezes o tamanho da edificação e possuir o diâmetro superior a 12 milímetros.

É uma técnica utilizada em demolições de estruturas de grande porte, como viadutos, torres, chaminés e estádios (Figura A.4).

É um método que oferece algumas vantagens significativas. Em primeiro lugar, permite um alto grau de controle sobre o processo de demolição, já que a força de tração pode ser ajustada e monitorada conforme necessário. Além disso, é um método relativamente seguro, pois os operadores podem executar a demolição a uma distância segura do local.

Outra vantagem é a capacidade de direcionar a queda dos materiais. Ao ancorar os cabos

Figura A.4 – Demolição de arquibancada de estádio esportivo por tração de cabos puxadores



Fonte: Notas de Aula da Disciplina "Análise e Comportamento de Sistemas Estruturais em Concreto", do PPGE Civ (UFSCar, 2022)

em pontos estratégicos, é possível direcionar a queda dos detritos, evitando danos a estruturas adjacentes. Isso é especialmente útil em áreas urbanas densamente povoadas, onde é necessário tomar precauções adicionais para garantir a segurança pública.

No entanto, é importante destacar que a demolição por tração de cabos puxadores requer um planejamento cuidadoso e profissionais experientes. É necessário avaliar a resistência e a estabilidade da estrutura a ser demolida, além de garantir a integridade dos cabos e das máquinas utilizadas. Deve ser feito o isolamento da área, além da necessidade de monitoramento contínuo.

A.3 Demolição por Métodos Químicos

Também chamada de "demolição por ataque químico", essa técnica é utilizada para a fragmentação de estruturas por meio da aplicação de agentes químicos que enfraquecem ou geram fraturas nos elementos construtivos (Gomes, 2010). Um exemplo é o uso de produtos químicos que causam a corrosão do concreto ou do aço, enfraquecendo sua estrutura. Esses produtos podem ser aplicados diretamente na estrutura ou injetados em perfurações feitas previamente. Há também a argamassa composta por calcário altamente expansivo que, em contato com a água, ocasiona uma reação química que faz com que haja um excessivo aumento em seu volume, com uma força superior à resistência dos elementos a serem demolidos (Figura A.5).

A demolição por métodos químicos é uma opção viável em casos em que outros métodos de demolição são impraticáveis ou perigosos, como em estruturas localizadas em áreas de difícil acesso ou em locais sensíveis onde o uso de equipamentos pesados é limitado. Além disso, a demolição química pode ser uma alternativa quando há a necessidade de minimizar vibrações,

Figura A.5 – Demolição química por argamassa expansiva



Fonte: Armasa (2023)

ruídos e poeira associados a outros métodos de demolição.

No entanto, existem algumas considerações importantes a serem feitas em relação a essa técnica. Primeiramente, é necessário garantir que os produtos químicos utilizados sejam seguros e não causem danos ambientais significativos. Além disso, o processo de demolição química pode ser mais lento e demandar um tempo maior para a ação dos agentes químicos (Gomes, 2010).

É importante ressaltar que a demolição por métodos químicos requer conhecimento especializado e supervisão de profissionais qualificados.

Demolição por Explosivos

Também chamada de demolição por implosão, essa técnica é realizada por meio de explosivos, substâncias inflamáveis que, uma vez incendiadas, liberam uma grande quantidade de gases e calor em uma alta velocidade, gerando pressões elevadas e de grande poder destruidor. As cargas explosivas devem ser estrategicamente colocadas nos principais vínculos estruturais da edificação, na maioria das vezes, nos elementos de apoio. Ao serem ativados, os explosivos são detonados em uma sequência precisa, transformando os pórticos em hipostáticos, provocando uma rotação e instabilidade da estrutura, e então inicia-se uma reação em cadeia que faz com que a estrutura colapse de forma controlada. Então, por meio da queda livre dos elementos, a estrutura é fragmentada em partes menores e de fácil transportação (Martins, 2019).

A demolição por explosivos é uma técnica muito utilizada para derrubar estruturas de grande porte, como prédios, pontes, chaminés e estádios e em casos onde não há espaço suficiente para a demolição convencional. Caracterizado como um método eficiente e preciso,

permite a remoção rápida e segura de estruturas. No entanto, é essencial que seja realizada por profissionais experientes e devidamente treinados, que levem em consideração todos os aspectos de segurança para evitar riscos à vida humana. Além disso, medidas de segurança rigorosas devem ser implementadas para garantir que a área ao redor seja evacuada antes da explosão.

Na Figura A.6 é apresentado um registro da demolição das chaminés da Central Elétrica de Cockenzie, na Escócia, em 2015.

Figura A.6 – Demolição de chaminés da Central Elétrica de Cockenzie por meio de explosivos



Fonte: ScottishPower (2015)

No caso da Figura A.6, a demolição das chaminés foi realizada por uma equipe especializada em demolição controlada e seu desabamento ocorreu em segundos, a partir da ativação das cargas explosivas posicionadas em seus apoios.

A.4 Demolição por Métodos Térmicos

Conhecida também como demolição por corte a quente, é um método de demolição controlada mediante o uso de altas temperaturas, causando fraturas ou fragmentação por meio do choque térmico entre o concreto e o aço (Gomes, 2010). Ele se diferencia de acordo com os aparelhos utilizados, podendo esses serem lança térmica, maçarico ou laser, e suas respectivas fontes de calor. Na Figura A.7 é apresentada um corte em uma peça de concreto utilizando a lança térmica.

Um dos principais benefícios da demolição térmica é a capacidade de minimizar os impactos ambientais e reduzir a quantidade de resíduos gerados. Além disso, ela permite corte precisos, de 3 a 5 cm de largura, mesmo de estruturas de grande espessura.

Figura A.7 – Demolição em elemento de concreto por corte com lança térmica



Fonte: Soldas Brasil (2023)

Gomes (2010) também ressalta que esse procedimento deve ser considerado apenas em casos nos quais não haja riscos de incêndio ou explosão, devendo materiais inflamáveis e combustíveis serem retirados do local. Ainda, é fundamental garantir que a temperatura e o tempo de exposição sejam controlados adequadamente para evitar danos a estruturas próximas e aos trabalhadores envolvidos nesse processo.

A.5 Demolição por Métodos Abrasivos

A demolição por métodos abrasivos é uma técnica utilizada para realizar reabilitações ou remover camadas de materiais indesejados ou deteriorados de superfícies sólidas, como concreto, metal ou pedra (Gomes, 2010). Nesse processo, materiais abrasivos, como areia, granalha de aço, pedra de diamante ou jato de água de alta pressão, são direcionados para a superfície, removendo essas camadas.

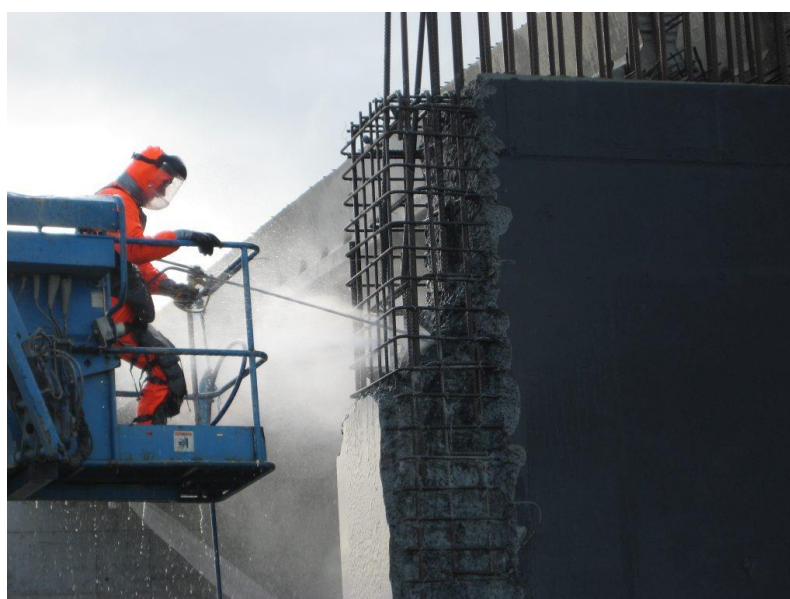
Uma das principais vantagens desse método é a capacidade de remover camadas de material de forma controlada, preservando a integridade da estrutura subjacente. É um processo eficaz para remover tinta, ferrugem, revestimentos e outros resíduos sem danificar a superfície original.

Essa metodologia oferece flexibilidade em termos de controle da intensidade e direção do jato abrasivo. Isso permite que os operadores ajustem a pressão, a velocidade e o tipo de abrasivo usado, de acordo com as necessidades específicas do projeto. Além disso, os métodos abrasivos são considerados mais ecologicamente corretos, uma vez que não envolvem o uso de produtos químicos agressivos.

Hidrodemolição

A Hidrodemolição é um método eficiente que promove a remoção de concreto fazendo uso de jatos de água de alta pressão contra sua superfície (Gomes, 2010), como é ilustrado na Figura A.8. A energia necessária é fornecida por meio de ar comprimido, que impulsiona a água através de uma bomba de alta pressão (Brito *et al.*, 1999). A água penetra os vazios e as microfissuras do concreto e, quando sua pressão no interior dos espaços vazios supera a pressão do concreto, ocorre uma pequena explosão que rompe o mesmo.

Figura A.8 – Hidro-demolição com jato d'água



Fonte: JET Tecnic (2023)

A principal vantagem da hidrodemolição é sua capacidade de preservar a integridade das armaduras de aço embutidas no concreto, uma vez que a água não causa danos aos metais. Além disso, a técnica não produz vibrações excessivas nem gera resíduos sólidos, tornando-a mais sustentável em comparação com outros métodos tradicionais, como o uso de martelos pneumáticos.

É frequentemente utilizada em obras de reabilitação de estruturas, como pontes, viadutos e edifícios, onde a remoção do concreto deteriorado é necessária para a aplicação de reparos ou para aumentar a vida útil da estrutura. Também é amplamente empregada em projetos que exigem precisão e controle, pois permite a remoção seletiva de camadas de concreto sem afetar as armaduras.

Como medidas de segurança, o operador das máquinas e o trabalhador que opera ma-

nualmente a lança devem utilizar os devidos equipamentos de proteção individual, tais como capacete com viseira adequada para esse trabalho, luvas, botas e vestuário específico (Gomes, 2010).

Demolição por Corte Diamantado

Na demolição por corte diamantado uma serra equipada com lâminas de diamante é utilizada para realizar cortes controlados e altamente precisos (Brito *et al.*, 1999), como demonstrado na Figura A.9. É um dos sistemas de demolição controlada mais versátil, pois permite o corte de todos os tipos de estrutura, como aço, concreto, ferro fundido, alvenaria, rochas e outros. Seu acabamento é praticamente perfeito e a operação não causa grande dispersão de poeira. Nesse processo as vibrações também são reduzidas, evitando danos à estrutura e às edificações adjacentes.

Figura A.9 – Demolição de superfície de concreto com fio diamantado



Fonte: Terracam (2020)

É ideal para a abertura de vãos destinados à passagem de tubulações, juntas de dilatação, portas, janelas, entre outros, em paredes exteriores ou divisórias de betão armado, assim como em lajes e cortes de vigas e pilares durante a demolição por desmonte controlado. Esse método resulta em blocos de betão que podem ser posteriormente segurados e removidos com o auxílio de uma grua (Gomes, 2010).

É importante destacar que a demolição por corte diamantado requer habilidades técnicas especializadas e equipamentos adequados para ser realizada com segurança e eficiência. Profissi-

onais treinados são responsáveis por executar os cortes, seguindo procedimentos específicos e garantindo a proteção de todas as partes envolvidas.

APÊNDICE B – Categorias de Impacto *ReCiPe* 2016 Midpoint (H)

As categorias de impacto ambiental da metodologia *ReCiPe 2016 Midpoint (H)* utilizadas na análise do estudo foram descritas com base nos relatórios "*ReCiPe 2016 v1.1 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level - Report I: Characterization*", do RIVM (2017) e "Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro", do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2019):

- Formação de material fino particulado: corresponde a formação de resíduos tóxicos da queima de combustíveis fósseis, ou de outros processos, como atividades agrícolas e processos industriais. Essas partículas finas podem conter substâncias tóxicas, metais pesados e compostos orgânicos prejudiciais, sendo responsáveis por problemas respiratórios, cardiovasculares e até mesmo câncer;
- Escassez de recursos fósseis: refere-se à diminuição ou esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, que são fontes de energia não renováveis. Com o consumo crescente desses combustíveis para atender às demandas da sociedade moderna, as reservas disponíveis estão sendo utilizadas a um ritmo mais rápido do que são naturalmente repostas. Além disso, o uso intensivo de combustíveis fósseis também está associado a problemas ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global e as mudanças climáticas.
- Ecotoxicidade de água doce: refere-se à capacidade que uma substância química tem de causar danos ou ser tóxica para organismos aquáticos presentes em ecossistemas de água doce;
- Eutrofização de água doce: ocorre quando há acúmulo excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, nos ecossistemas aquáticos. Esse acúmulo de nutrientes ocorre devido à atividades humanas, como a agricultura intensiva, o lançamento de esgotos não tratados, o uso de agrotóxicos em lavouras e o desmatamento em áreas próximas a corpos d'água. O aumento na disponibilidade de nutrientes na água estimula o crescimento excessivo de

algas e outras plantas aquáticas. Uma vez que as algas morrem, elas são decompostas por bactérias, que consomem oxigênio para realizar esse processo. Esse consumo excessivo de oxigênio leva à diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido na água, provocando a morte de peixes e outros organismos aquáticos e causando um desequilíbrio no ecossistema aquático;

- **Aquecimento global:** fenômeno climático causado pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre devido à atividade humana. Gases como o dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) atuam como uma cobertura que retém o calor do sol na Terra, impedindo que ele escape de volta para o espaço. No entanto, as atividades humanas têm liberado uma grande quantidade desses gases, causando um aumento significativo na retenção de calor e, conseqüentemente, a um aumento gradual da temperatura média da Terra. Esse fenômeno gera o derretimento de geleiras e calotas polares, elevação do nível do mar, assim como o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos;
- **Toxicidade humana carcinogênica:** refere-se à capacidade de uma substância ou agente possui em causar câncer em seres humanos. Carcinógenos são agentes físicos, químicos ou biológicos que podem danificar o DNA das células, levando a mutações que resultam em seu crescimento descontrolado e no desenvolvimento de tumores malignos. A exposição a carcinógenos pode ocorrer através da inalação, ingestão ou absorção pela pele;
- **Toxicidade humana não-carcinogênica:** refere-se aos efeitos nocivos que uma substância ou agente pode causar no corpo humano, excluindo o desenvolvimento de câncer. Esses efeitos podem incluir irritação na pele ou nos olhos, danos ao sistema nervoso, problemas respiratórios, danos ao fígado ou rins, entre outros;
- **Radiação ionizante:** consiste em uma forma de radiação com energia suficiente para remover elétrons dos átomos, produzindo íons carregados eletricamente. Ela pode ser encontrada na natureza, por meio de raios cósmicos e radiação natural, ou ser gerada artificialmente mediante aplicações médicas, industriais e nucleares. Essa radiação pode interagir com células e tecidos vivos, causando danos ao material genético e aumentando o risco de problemas de saúde, incluindo câncer;
- **Uso da terra:** refere-se às práticas humanas que causam degradação, destruição ou esgotamento dos recursos naturais e ecossistemas terrestres. Isso inclui atividades como

desmatamento excessivo, agricultura intensiva sem manejo sustentável, mineração não regulamentada e a alta taxa de crescimento urbano. Essas atividades têm impactos negativos significativos, como perda de biodiversidade, erosão do solo, degradação de habitats naturais, esgotamento de recursos hídricos, aumento da poluição e contribuição para as mudanças climáticas;

- Escassez de recurso natural: ocorre quando a demanda por recursos naturais, como água, energia e minerais excede disponibilidade finita da natureza. Essa escassez ocorre devido ao crescimento populacional, ao aumento da exploração e do consumo humano e à poluição ambiental;
- Formação de ozônio, saúde humana: O ozônio na estratosfera desempenha um papel vital ao absorver grande parte da radiação ultravioleta prejudicial do sol, protegendo a vida na Terra dos efeitos nocivos dessa radiação, como o câncer de pele e danos aos olhos. Por outro lado, na baixa atmosfera, conhecida como troposfera, o ozônio é um poluente. É produzido quando poluentes como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis reagem na presença de luz solar. Esses poluentes são liberados por atividades humanas, como queima de combustíveis fósseis em veículos e indústrias. A exposição à poluição do ozônio na troposfera pode ter efeitos negativos na saúde humana, pois o ozônio irrita as vias respiratórias e pode causar falta de ar, tosse, dor no peito e agravamento de problemas respiratórios pré-existent;
- Formação de ozônio, ecossistemas terrestres: além dos danos à saúde humana, o ozônio presente na troposfera pode afetar negativamente vegetações, causando danos nas folhas e prejudicando o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Ele também tem a capacidade de diminuir a qualidade do ar nas áreas urbanas e afetar a visibilidade, além de contribuir para a formação de chuva ácida;
- Depleção da camada de ozônio estratosférica: ocorre devido a liberação de gases, conhecidos como CFC's (clorofluorcarbonetos) na atmosfera. Esses compostos liberam átomos de cloro e bromo na estratosfera, os quais reagem com as moléculas de ozônio, destruindo essa camada protetora. Esse efeito permite a entrada de uma maior taxa de radiação ultravioleta na Terra, o que pode levar a danos à saúde humana, impactos negativos na vida marinha, na agricultura e nos ecossistemas;

- Acidificação terrestre: ocorre quando há a deposição de substâncias ácidas, como o ácido sulfúrico e o ácido nítrico, na superfície da Terra. Essa deposição ocorre por meio de chuvas, nevoeiro ou neve. Os efeitos negativos incluem mudanças no equilíbrio ecológico, perda de nutrientes do solo, além de afetar a saúde de plantas e animais;
- Ecotoxicidade terrestre: refere-se à capacidade de substâncias ou produtos químicos causarem danos ao meio ambiente terrestre, incluindo solo, plantas e animais. Essas substâncias tóxicas podem ser liberadas por atividades humanas, como indústria, agricultura, mineração e descarte inadequado de resíduos. A exposição a esses compostos pode levar a efeitos prejudiciais na saúde e no equilíbrio dos ecossistemas terrestres, ameaçando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos essenciais para a vida humana;
- Consumo de água: refere-se ao uso excessivo e insustentável desse recurso natural finito. O alto consumo de água pode levar a problemas como escassez hídrica, esgotamento de aquíferos, redução de rios e lagos, degradação de ecossistemas aquáticos e falta de água potável para comunidades. Além disso, a utilização insustentável da água pode afetar a disponibilidade de recursos naturais essenciais e prejudicar a biodiversidade.