

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

VITOR BEHAR BAUM

ANÁLISE COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS ÀS ROTAS PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DA PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO BASEADO NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA ESTRUTURA METÁLICA DE UM PAVILHÃO INDUSTRIAL EXECUTADA A PARTIR DE SUCATA FERROSA RECICLADA

Porto Alegre
2021

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ANÁLISE COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS ÀS ROTAS PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DA PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO BASEADO NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA ESTRUTURA METÁLICA DE UM PAVILHÃO INDUSTRIAL EXECUTADA A PARTIR DE SUCATA FERROSA RECICLADA

VITOR BEHAR BAUM

ENGENHEIRO CIVIL

DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**Porto Alegre
Maio, 2021**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ANÁLISE COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS ÀS ROTAS PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DA PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA SIDERÚRGICA: ESTUDO DE CASO BASEADO NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA ESTRUTURA METÁLICA DE UM PAVILHÃO INDUSTRIAL EXECUTADA A PARTIR DE SUCATA FERROSA RECICLADA

VITOR BEHAR BAUM

ENGENHEIRO CIVIL

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCUS SEFERIN

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre/Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Maio, 2021**

Ficha Catalográfica

B347a Baum, Vitor Behar

Análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica : Estudo de caso baseado na Avaliação do Ciclo de Vida da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada a partir de sucata ferrosa reciclada / Vitor Behar Baum. – 2021.

72 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Seferin.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Aço. 3. Estrutura Metálica. 4. Sucata Ferrosa. 5. Reciclagem. I. Seferin, Marcus. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS
ASSOCIADOS ÀS ROTAS PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DA
PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA SIDERÚRGICA:
ESTUDO DE CASO BASEADO NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA DA ESTRUTURA METÁLICA DE UM PAVILHÃO
INDUSTRIAL EXECUTADA A PARTIR DE SUCATA FERROSA
RECICLADA**

CANDIDATO: VITOR BEHAR BAUM

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DR. MARCUS SEFERIN - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

**DR. ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE
BLUMENAU**

DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - PGETEMA - PUCRS

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

www.pucrs.br/politecnica

*A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu
tamanho original
(Albert Einstein)*

DEDICATÓRIA

A DEUS, grande energia de luz e amor universais, fonte maior de inspiração deste trabalho científico, o qual faz parte indissociável de minha vida;

À memória de meus pais, Berek Bensjon Baum e Lisete Behar Baum que me legaram um maravilhoso exemplo de amor e vida, riqueza principal de minha existência, aos quais serei eternamente grato por tudo que fizeram e ainda fazem por mim, junto de DEUS;

A meus irmãos, Gilberto Herschdorfer e Ilana Behar Baum (*In Memoriam*), grandes e incansáveis parceiros de todas as horas, acima de tudo, mais do que irmãos, me orgulho de tê-los como grandes amigos, leais e sinceros;

A minha linda e amada esposa Jenifer Barth de Oliveira, mulher de coração maravilhoso, que fez renascer em mim o prazer e a alegria de viver, dedico todo o meu amor e paixão;

À Doutora Eleani Maria da Costa, M.D. Ex-Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais - PGETEMA por ter acreditado no meu sonho e tê-lo tornado possível, a ela a minha total admiração e respeito;

Ao Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais Vinícius Gonçalves Maciel, grande e inestimável parceiro de curso, que com a sua sabedoria, paciência, amizade, carinho, respeito e prestimosa colaboração, facilitou, sobremaneira, a elaboração desse trabalho, a ele dedico a minha amizade, carinho e respeito;

Ao Doutor Marcus Seferin, meu orientador, grande parceiro e amigo que, com seu conhecimento e sabedoria, tornou viável a execução deste trabalho, a ele dedico a minha amizade, carinho e respeito.

AGRADECIMENTOS

Aos Engenheiros Isaias, Crestina e Roberto, por terem me disponibilizado os dados necessários para a elaboração dos inventários do ciclo de vida da fabricação de uma estrutura metálica, da empresa localizada no município de Novo Hamburgo-RS;

Ao CEPAC-PUCRS, na pessoa do Químico Industrial professor Rogério Vescia Lourega, por ter me disponibilizado estudos e dados sobre emissões poluentes ao meio ambiente indispensáveis à execução deste trabalho;

Aos professores do PGETEMA que com seus ensinamentos, me forneceram subsídios valiosos para este trabalho e para a continuidade futura de meus estudos, em nível de Doutorado;

Aos meus colegas mestrandos, em especial o Químico Industrial Alessandro Silva Ramos, Engenheiro Mecânico Victor Velho de Castro e o Físico Rodrigo Carvalho de Campos, grandes parceiros e amigos de todas as aulas, trabalhos e provas que fizemos juntos;

Às secretarias do PGETEMA, Cláudia Marina P. Silva, Viviane Nunes Dornelles e Dayane Pinto Souza, incansáveis e dedicadas na solução de todas as minhas demandas;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais - PGETEMA, por ter me dado a inestimável oportunidade de realizar os meus estudos em nível de Mestrado e concretizar um sonho acalentado durante toda a minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da PUCRS através do Programa Institucional de Bolsas PRO-Stricto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Específico	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Desenvolvimento sustentável na construção civil	20
3.2 A sustentabilidade ambiental do aço e das construções com estruturas metálicas	21
3.2.1 Caracterização das estruturas metálicas	22
3.2.2. Impactos ambientais da produção de aço em usina siderúrgica.....	24
3.3. Sustentabilidade ambiental da reciclagem do aço	27
3.3.1. Panorama atual.....	27
3.3.2. Aspectos da sustentabilidade ambiental do ciclo de vida do aço.....	29
3.3.3. Benefícios e cargas ambientais da reciclagem do aço	30
3.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	30
3.4.1 Introdução à Avaliação do Ciclo de Vida.....	30
3.4.2 Conceitos básicos de Avaliação do Ciclo de Vida.....	32
3.4.3 Estrutura da ACV	33
3.4.4 ACV na Construção Civil.....	35
3.4.4.1 EN 15804 – Conceitos, princípios e estrutura.....	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1 Considerações iniciais.....	41
4.2 Objetivo e escopo da Avaliação do Ciclo de Vida.....	41
4.3 Etapas e Módulos para montagem do ICV da ACV proposta	43
4.3.1 Etapa de produto (Módulos A1 – A3) e Etapa do processo de construção (Módulos A4 – A5).....	43
4.3.2 Etapa de Uso (Módulos B1 – B7).....	45
4.3.3 Etapa do Fim de Vida (Módulos C1 – C4) e Módulo D	45
4.4 Natureza e qualidade dos dados obtidos	47
4.5 Categorias de impacto ambiental adotados na ACV	50
5. RESULTADOS OBTIDOS E SUA INTERPRETAÇÃO	52

5.1 – Análise dos resultados obtidos	56
5.1.1. Determinação do Benefício Ambiental Líquido (Módulo D), segundo a EN 15804.	59
5.1.2. Análise comparativa da modelagem no SimaPro com achados da literatura científica internacional	61
6. CONCLUSÃO	63
7. PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	65
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tour Eiffel (Paris-France).....	23
Figura 2 - Destinação dos materiais utilizados nas estruturas de edifícios	26
Figura 3 - Produção de aço em usina siderúrgica	28
Figura 4 - Unidade de processo e fluxos relacionados.....	33
Figura 5 - Estrutura de uma ACV	34
Figura 6 – Tipos de EPD com respeito às etapas do ciclo de vida compreendidas e as etapas e módulos do ciclo de vida para a avaliação de edificações..	39
Figura 7 - Fluxograma da ACV da Estrutura Metálica	47
Figura 8 - Contribuição dos módulos nas categorias de impactos ambientais da ACV proposta	57
Figura 9 - Contribuição dos módulos da ACV proposta no Potencial de Aquecimento Global.....	58
Figura 10 - Contribuição dos módulos da ACV proposta na Energia Primária Demandada Total.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados pavilhão industrial	41
Tabela 2 - Módulos da ACV proposta	43
Tabela 3 - Energia usada (em MJ/kg) para demolição/desconstrução de diferentes modelos estruturais em edificações	45
Tabela 4 - Valores de referência para parâmetros básicos	47
Tabela 5 - Verificação da qualidade e abrangência dos dados utilizados na modelagem da ACV proposta no SimaPro, a partir dos datasets adotados e literatura científica internacional.	49
Tabela 6 – ICV, Módulos A1 e A2.	52
Tabela 7 - ICV, Módulo A3.	53
Tabela 8 - ICV, Módulos C1 a C4 e D.	54
Tabela 9 - Resultados do ciclo de vida da estrutura metálica por categoria de impacto ambiental e por modulo da ACV proposta	55
Tabela 10 - Resultados do ciclo de vida da unidade declarada (kg da estrutura metálica) por categoria de impacto ambiental e por módulo da ACV proposta.	55
Tabela 11 - Resultados do ciclo de vida da estrutura metálica por tipo de energia primária demandada e por módulo da ACV proposta	55
Tabela 12 - Resultados do ciclo de vida da unidade declarada (kg da estrutura metálica) por tipo de energia primária demandada e por módulo da ACV proposta.	55
Tabela 13 - Demonstração do Benefício Ambiental Líquido das emissões de CO2 (Modulo D).....	60
Tabela 14 - Demonstração do Benefício Ambiental Líquido da EPD total (Módulo D).....	60
Tabela 15 - Comparativo Emissões CO2 (ton. CO2-eq/TCS).	61
Tabela 16 – Valores Energia Primária Demandada Total (GJ/TCS)	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ASTM – American Society for Testing Material

BOF – Basic Oxygen Furnace

CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço

C&D – Construction & Demolition

EAF – Electric Arc Furnace

EPA – Environmental Protection Agency

EPD – Energia Primária Demandada

FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

GJ – Giga Joule

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IM – Integrated Steel Mill

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO – International Standard Organization

LCA – Life Cycle Assessment

MIG – Metal Inert Gas

NBR – Norma Brasileira

PIB – Produto Interno Bruto

TCS – Ton of Crude Steel

tkm – tonelada quilômetro

WSA – World Steel Association

RESUMO

BEHAR BAUM, Vitor. **Análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica: Estudo de caso baseado na Avaliação do Ciclo de Vida da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada a partir de sucata ferrosa reciclada.** Porto Alegre. 2021. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Este trabalho teve como propósito fazer uma análise comparativa dos impactos ambientais associados às duas rotas da produção de aço em uma usina siderúrgica: primária, a partir da fundição de minério de ferro em alto forno e a secundária, a partir da fundição de sucata ferrosa em forno de arco elétrico. Para o cumprimento deste propósito, foi utilizada a técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), em uma abordagem do berço ao portão com opções, do ciclo de vida incompleto, compreendendo a Etapa de Produto, Cenário de Fim de Vida e Módulo D, tendo sido adotadas como unidade declarada o kg de aço da estrutura metálica, tudo conforme a norma europeia EN 15804 que trata da ACV de produtos da construção civil, e uma taxa de reciclagem de aço de 90%, com 10% de resíduos inaproveitáveis enviados para aterro. A ACV foi realizada a partir de um estudo de caso da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada com sucata ferrosa reciclada, localizado na cidade de Sapucaia do Sul/RS. Como principais resultados, os benefícios ambientais líquidos pela adoção da rota de produção secundária e pelo elevado potencial de reciclagem da sucata ferrosa, em termos de emissões totais de CO₂ eq e energia primária demandada total foram de $-1,81 \times 10^5$ kg CO₂ eq e $-1,76 \times 10^6$ MJ, respectivamente, sendo que o sinal negativo, nestes valores, indica o volume de emissões de CO₂ eq que foi evitado de ser lançado à atmosfera e a energia primária demandada total que foi poupada, quando comparados com a rota primária da produção do aço em uma usina siderúrgica. Com base nestes resultados, pode-se concluir que a rota secundária é benéfica ao meio ambiente natural, na comparação com a rota primária, por mitigar as emissões de CO₂ eq e poupar energia primária demandada total, na produção de aço em uma usina siderúrgica.

Palavras-Chaves: Avaliação do Ciclo de Vida, Aço, Estrutura Metálica, Sucata Ferrosa, Reciclagem Rota Primária, Rota Secundária.

ABSTRACT

BEHAR BAUM, Vitor. **Comparative analysis of the environmental impacts associated with the primary and secondary routes of steel production in a steel mill: Case study based on the Life Cycle Assessment of the metallic structure of an industrial pavilion made from recycled ferrous scrap.** Porto Alegre. 2021. Master/PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The purpose of this work was to make a comparative analysis of the environmental impacts associated with the two routes of steel production in a steel mill: primary, from the smelting of iron ore in a blast furnace and the secondary, from the smelting of ferrous scrap in electric arc furnace. To fulfill this purpose, the Life Cycle Assessment (LCA) technique was used, in an approach from the cradle to the gate with options, from the incomplete life cycle, comprising the Product Stage, End of Life Scenario and Module D, the kg of steel of the metallic structure having been adopted as a declared unit, all according to the European standard EN 15804 that deals with LCA of civil construction products, and a steel recycling rate of 90%, with 10% of unusable waste sent to landfill. The LCA was carried out from a case study of the metallic structure of an industrial pavilion built with recycled ferrous scrap, located in the city of Sapucaia do Sul/RS. As main results, the net environmental benefits from the adoption of the secondary production route and the high recycling potential of ferrous scrap, in terms of total emissions of CO₂ eq and total primary energy demanded were -1.81×10^5 kg CO₂ eq and $-1,76 \times 10^6$ MJ, respectively, and the negative sign, in these values, means the volume of CO₂ eq emissions that was avoided from being released into the atmosphere and the total demanded primary energy that was saved, when compared with the primary production route of the steel in a steel mill. Based on these results, it can be concluded that the secondary route is beneficial to the natural environment, in comparison with the primary route, since it mitigates CO₂ eq emissions and saves total primary energy demanded in the production of steel in a steel plant.

Keywords: Life Cycle Assessment, Steel, Metallic Structure, Ferrous Scrap, Recycling, Primary Route, Secondary Route

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo onde a população atingirá em torno de 9 bilhões de pessoas nos próximos 30, 40 anos, o gerenciamento de nossos limitados recursos naturais está se tornando uma questão crítica. Deve-se abandonar a mentalidade ultrapassada de “pegar, fazer, consumir e dispor” e atuar sobre um modelo de economia circular para otimizar a eficiência dos recursos. Os produtos devem ser projetados para reuso e remanufatura, os quais podem reduzir significativamente os custos em termos de energia e recursos naturais (Broadbent, 2016).

Os últimos 50 anos tem, sem dúvida nenhuma, mostrado a transformação da relação humana com o ambiente natural mais rápida em toda a história (Steffen et al., 2004).

Na era pós Segunda Guerra Mundial, o constante crescimento econômico verificado pelos incrementos no PIB e o progressivo desenvolvimento tecnológico tem sido a regra geral (Sörlin and Warde, 2009).

O rápido aumento dos dispositivos de telecomunicação móveis nos países em desenvolvimento é um excelente exemplo de progresso tecnológico. Se tal progresso tecnológico puder ser estendido aos sistemas energéticos, os países em desenvolvimento podem alcançar uma dissociação entre desenvolvimento econômico e impactos ambientais. Por outro lado, os gases de efeito estufa ainda estão aumentando rapidamente, ameaçando a estabilidade do sistema climático e florestas tropicais, sendo que o desmatamento permanece elevado. A busca pelo crescimento econômico global continua, mas, a responsabilidade pelos seus impactos no sistema terrestre ainda não foi assumida (Steffen et al., 2015).

A construção e o uso de edificações são responsáveis por 40% do uso global de recursos e 40% do consumo anual de energia em todo o mundo. O uso de matérias-primas dobrou ao longo dos últimos 30 anos. Um estudo recente do Painel de Recursos Internacionais identificou uma crescente extração global de recursos

por ano (em média) ao longo das últimas quatro décadas sobre quatro categorias: 4% de minerais não metálicos, 2,8% de minerais metálicos, 1,9% de minerais fósseis, e 2% de biomassa. A crescente demanda por minerais para a construção domina o crescimento da extração global de matérias-primas (Sameer and Bringezu, 2019).

A atividade econômica pode conduzir, de um modo geral, a mais do que dobrar a extração global de matérias-primas até 2050. Há uma crescente percepção internacional com o propósito de desenvolver estratégias para evitar o risco da falta de suprimento de recursos. Ao mesmo tempo, a escassez de recursos parece ser menos crítica que os crescentes impactos da extração de recursos, uso, e disposição de resíduos resultantes da cadeia de produção-consumo (Sameer and Bringezu, 2019).

O setor da construção civil sendo um dos maiores consumidores de matérias primas e energia está ativamente envolvido no estabelecimento de práticas que promovam a sustentabilidade tanto em materiais como em processos da construção (Bragança, Mateus and Koukkari, 2007; Intini and Kühtz, 2011; Karimpour et al., 2014; Kim et al., 2014; König and De Cristofaro, 2012).

Os fabricantes de produtos da construção estão engajados em pesquisa focada na redução de impacto ambiental de seus produtos com o propósito de ganhar uma vantagem competitiva no atual mercado orientado para a sustentabilidade (Haapio, 2010; Melià et al., 2014) e as companhias construtoras estão em um caminho similar, analisando e avaliando o impacto ambiental dos processos construtivos requeridos para a entrega de projetos técnicos com o propósito de identificar as áreas onde melhorias podem ser feitas (Love, Edwards and Smith, 2013; Ochoa, 2014; Passer et al., 2015; Sarkisian, 2014).

Conforme Rios et al. (2019), na publicação “Towards Circular Economy,” a Fundação Ellen MacArthur referiu-se aos Resíduos de Construção & Demolição (RCD) como uma oportunidade notável para a economia circular. Conforme a Fundação, somente de 20% a 30% dos RCD são reciclados ou reutilizados, às vezes porque as edificações não são projetadas para a sua desmontagem e reutilização, a qual resulta numa perda significativa de materiais valiosos para o ambiente natural (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Economia Circular é uma

abordagem econômica regenerativa que dissocia consumo e recursos pela extensão da vida útil dos produtos e possibilitando múltiplas reutilizações (Rios et al., 2019).

O aço talvez seja um material com um dos maiores potenciais de reutilização dentre os materiais de construção. A capacidade deste material de ser fundido e usado para produção de novas quantidades de aço sem a necessidade de novas extrações de matéria-prima e sem que haja uma perda significativa em qualidade e propriedades fornece a base para o aumento da sustentabilidade dos materiais na construção (Kaziolas et al., 2015).

. No entanto, isso depende dos projetistas e profissionais da construção envolvidos no projeto técnico para materializar este potencial pela aplicação de medidas para permitir a maior recuperação possível de aço durante a fase de demolição. A taxa de reciclagem do aço recuperado tem, portanto, um papel importante na determinação do impacto ambiental total no ciclo de vida de um projeto (Kaziolas et al., 2015).

Este trabalho de pesquisa científica constitui-se na aplicação da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida sobre a estrutura metálica de um pavilhão industrial executado com sucata ferrosa reciclada, na cidade de Sapucaia do Sul – RS, iniciando na reciclagem da sucata ferrosa na aciaria para a fusão e elaboração de produtos siderúrgicos, passando pela fabricação da estrutura metálica e a sua correspondente disposição e tratamento de resíduos, após o final da sua vida útil, assim como todas as operações de transporte que permeiam estas etapas.

A partir da aplicação da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida foi possível fazer uma análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária (minério de ferro) e secundária (reciclagem da sucata ferrosa) da produção de aço em uma usina siderúrgica, bem como a determinação dos benefícios ambientais líquidos decorrentes da adoção da rota secundária na produção do aço empregado na estrutura metálica, objeto do estudo de caso deste trabalho.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho ambiental da estrutura metálica de um pavilhão industrial, executada a partir de sucata ferrosa reciclada, ao longo de todo o seu ciclo de vida, localizado na cidade de Sapucaia do Sul/RS, compreendendo:

- ✓ Elaboração e análise do Inventário do Ciclo de Vida;
- ✓ Avaliação dos impactos ambientais associados ao Inventário do Ciclo de Vida;
- ✓ Proposição de um cenário de fim de vida com vistas à determinação dos benefícios e cargas ambientais causados pela reciclagem da sucata ferrosa.

2.1 Objetivo Específico

- ✓ Análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desenvolvimento sustentável na construção civil

A construção, sendo uma das principais indústrias na economia das nações, contribui para o aumento do Produto Interno Bruto (Crosthwaite, 2000. Tatari & Kucukvar, 2012a; Tatari & Kucukvar, 2012b).

O desenvolvimento sustentável tornou-se uma questão crucial para as nações em todo o mundo (Onat, Kucukvar, 2020). A definição mais amplamente usada de desenvolvimento sustentável foi dada por um relatório da Comissão Brundtland elaborado em 1987 afirmando que o desenvolvimento sustentável é a compreensão sobre as necessidades atuais, considerando também as necessidades das gerações futuras (Brundtland, 1991).

Segundo Rossi (2014), a consciência de que esta sustentabilidade, tanto nas edificações quanto nas construções em geral, assume grande importância em função de três aspectos:

- a) Conceito multifacetado, ao estabelecer um elo nas inter-relações entre as dimensões ambiental, social e econômica;
- b) Conceito dependente do tempo demandado para uma reflexão sobre o ciclo de vida;
- c) Conceito dependente do espaço ao considerar a importância da interação da construção com o seu entorno ambiental.

Nos últimos anos, empresas têm reavaliado o ambiente construído com o objetivo de atingir um desempenho superior. A comunidade internacional adotou em 2015 um conjunto de 17 metas como parte de uma agenda global 2030 para o desenvolvimento sustentável (United Nations, 2015). Dentre estas metas estão: Meta 11: Comunidades de edificações sustentáveis e Meta 12: Atingimento de produção e consumo sustentáveis (AbouHamad; Abu-Hamd, 2019).

Como forma de atingir estas metas na construção de edificações, os projetistas devem considerar inteiramente o importante ato de fazer o balanceamento entre os três pilares da sustentabilidade: econômica, ambiental e limitações sociais quando consideradas a escolha dos materiais, o sistema estrutural da edificação e a função a longo prazo da edificação (AbouHamad; Abu-Hamd, 2019).

Em setores como as construções em aço, onde o potencial de sustentabilidade dos principais materiais utilizados é expressivo (Burgan and Sansom, 2006), a otimização dos processos construtivos torna-se uma questão crucial em relação ao alcance da sustentabilidade (Chubbs and Steiner, 1998). Pesquisadores têm apontado várias questões e aspectos do processo da entrega de um processo construtivo que podem afetar significativamente o seu impacto ambiental (Grant and Ries, 2013; Hoxha et al., 2014).

Basbagill et al. (2013) relatam que os materiais de construção podem influenciar notoriamente o impacto ambiental total de uma edificação, enquanto Blengini (2009) mostrou que comparado com as cargas ambientais associadas com os materiais incorporados no canteiro de obra de uma edificação residencial o potencial de reciclagem é de 29% e 18% em termos de ciclo de vida de energia e emissões de efeito estufa, respectivamente.

3.2 A sustentabilidade ambiental do aço e das construções com estruturas metálicas

Neste item da revisão bibliográfica, embora haja outros fluxos importantes em uma avaliação do ciclo de vida do aço e das estruturas metálicas, o foco da discussão se concentra, principalmente, no uso de materiais, consumo de energia e emissões geradas da produção siderúrgica pelas rotas primária (a partir de minério de ferro) e secundária (a partir de sucata ferrosa reciclada), uma vez que o objetivo específico deste trabalho científico é fazer uma análise comparativa dos impactos ambientais associados a estas rotas da produção de aço.

3.2.1 Caracterização das estruturas metálicas

As estruturas metálicas têm sido utilizadas em escala industrial no mundo a partir de 1750, sendo que no Brasil este processo iniciou-se em 1812. Estas estruturas são constituídas por perfis laminados (conformados a quente) ou perfis de chapa dobrada (conformados a frio).

Como principais vantagens das estruturas metálicas podem-se citar:

- a) Fabricação de estruturas com precisão milimétrica;
- b) Material resistente à vibração e choques;
- c) Execução de obras mais rápidas e limpas;
- d) Execução de estruturas leves para vencer grandes vãos;
- e) Possibilidade de reutilização/recuperação/reciclagem dos materiais em grandes quantidades.

Como principais desvantagens das estruturas metálicas podem-se citar:

- a) Limitação de execução em fábrica;
- b) Necessidade de tratamento superficial contra a corrosão;
- c) Demanda mão-de-obra e equipamentos especializados para a sua fabricação e montagem;
- d) Limitação no fornecimento de perfis estruturais.

As aplicações mais usuais das estruturas metálicas são:

- a) Telhados, reservatórios;
- b) Edifícios comerciais, industriais, residenciais;
- c) Pontes, viadutos, passarelas, hangares, torres;
- d) Escadas, mezaninos, postes (Pinheiro, 2005).



Figura 1 - Tour Eiffel (Paris-France)

Fonte: Wikipedia

3.2.2. Impactos ambientais da produção de aço em usina siderúrgica

A maioria das emissões geradas pela indústria do aço usualmente vem da redução do ferro, a interação química entre o carbono e o minério de ferro em altos fornos para produzir ferro fundido. Tecnologias inovadoras têm sido geradas para mitigar as emissões e aumentar a eficiência da utilização de recursos relativos a um aço mais sustentável. Outros procedimentos têm sido propostos incluindo; aumento das sucatas (Ramadan and Sash, 2015), produção de aços de alto desempenho para ampliar a vida útil e a reutilização e o armazenamento de CO₂ (Andrade et al., 2016).

Um dos atributos chave do aço é que ele pode ser reciclado diversas vezes sem que haja uma perda significativa de suas propriedades em resistência, ductilidade e conformação a qual marca a reciclagem do aço como um circuito fechado (Ramadan e Sash, 2015).

Uma redução significativa das emissões de CO₂ pode ser alcançada utilizando o forno de arco elétrico. O aço primário produzido em uma usina integrada de aço (IM) emite 2,1t de CO₂ por tonelada de aço bruto enquanto somente 0,6 t de CO₂ por tonelada de aço bruto são emitidas a partir do aço produzido no Forno de Arco Elétrico (Ramadan e Sash, 2015). Yellishetty et al. (2011) tem mostrado que usando Forno de Arco Elétrico para gerar aço a partir de sucatas reduz entre 32,14% e 40,32% das emissões de CO₂ por tonelada do que usando Fornos Básicos de Oxigênio.

O Forno de Arco Elétrico é também menos intensivo em energia, uma tonelada de aço através da rota do Forno de Arco Elétrico consome 9-12,5 GJ/TCS enquanto o aço do Forno Básico de Oxigênio consome 28-31 GJ/TCS. O aço pela rota primária de produção utiliza 2,5 vezes mais energia do que a energia proveniente da fusão da sucata ferrosa (Taha et al., 2016).

Cabe ressaltar que estes dados se referem à produção de aço na usina siderúrgica, seja pela rota primária (minério de ferro), seja pela rota secundária

(sucata ferrosa), não sendo levadas em conta as demais etapas que venham a compor o ciclo de vida do aço.

Segundo a Associação Mundial do Aço, 1 tonelada de aço reciclado poupa mais de 1,4 toneladas de minério de ferro, 1,4 toneladas de emissões de CO₂, 120 kg de calcário, 740 kg de carvão e 67% de quantidades de energia gasta no processo de produção do aço (Andrade et al., 2016).

Aye et al. (2012) concluíram que usando um sistema de aço pré-fabricado podem reduzir até 50,7% do peso em consumo de matéria-prima e 50% da energia incorporada comparando com edificações em concreto armado.

A flexibilidade das estruturas de aço impulsiona a reutilização das edificações; prolongando assim a sua vida útil (Andrade et al., 2016). Edificações de aço podem ser facilmente desconstruídas ou desmontadas no final da sua vida útil.

Uma pesquisa conduzida em 2012 dos estados membros da União Europeia revelou que entre 92% e 98% do aço são recuperados de um canteiro de demolição de uma edificação típica (SCI, 2012).

O site britânico STEEL CONSTRUCTION (2018) apresenta em uma publicação cenários de fim de vida para o concreto armado, a madeira e o aço, empregados nas estruturas correntes das edificações, conforme a Figura 2.

De acordo com esta figura, em relação ao aço, pode-se recuperar entre 93% e 99% de um canteiro de demolição de uma edificação típica, o que reforça a conclusão da supramencionada pesquisa de 2012 da União Europeia, pela similaridade dos valores obtidos.

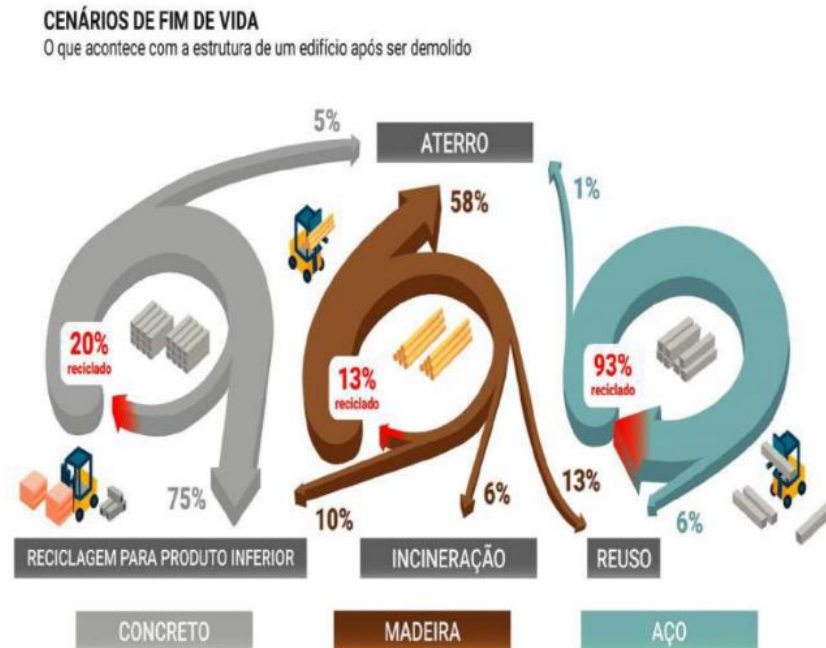


Figura 2 - Destinação dos materiais utilizados nas estruturas de edifícios

Fonte: CBCA (2019), adaptado de Steel Construction (2018).

Analisando-se os dados dessa figura, conclui-se que o aço possui um percentual elevado de reuso/reciclagem, nas mesmas condições originais de utilização do material em comparação com o concreto armado e a madeira. No caso do concreto, grande parte da reciclagem se faz para produto inferior, ao passo que na madeira, grande parte é totalmente inproveitada (mais de 60%, conforme o estudo).

Os componentes da estrutura de aço são certificados para reutilizar em outras edificações. Aye et al. (2012) determinaram que reutilizando as unidades pré-fabricadas e outros elementos da estrutura principal em outras novas edificações, pouparam até 81,3% da energia incorporada inicial e resultaram em uma grande redução seja nos materiais virgens seja nos resíduos enviados para aterros.

3.3. Sustentabilidade ambiental da reciclagem do aço

3.3.1. Panorama atual

A economia circular é um conceito amplo que vem ganhando espaço na literatura desde a segunda metade da década passada (Kirchherr et al., 2017).

A economia circular é um sistema industrial que visa o reaproveitamento e a regeneração através de uma nova concepção, substituindo o conceito de fim de vida por um modelo novo que visa à reutilização e reciclagem de materiais, uso de energias renováveis, eliminação de produtos químicos tóxicos que prejudicam este reaproveitamento e visa à eliminação de resíduos inaproveitáveis por meio de uma concepção superior em termos de materiais, produtos e sistemas produtivos, orientados para um novo modelo de negócios (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

A reciclagem do aço é notável como uma estratégia de economia circular, com o ciclo fechado do ferro na tecnosfera. (Torres de Souza & Pacca, 2021).

A tecnosfera é definida como sendo os estoques de materiais gerados pela ação humana, os quais devem ser originados a partir de processos tecnológicos, em contraste com os estoques na litosfera (crosta terrestre), gerados a partir de lentos processos geológicos primários (Johanson et al., 2013).

Na manufatura do aço, o termo 'produção primária' geralmente se refere à manufatura do ferro a partir do minério de ferro em um alto-forno, o qual é subsequentemente processado no forno básico de oxigênio para fazer aço. 'Produção secundária' se refere à rota da reciclagem e é tipicamente o processo do forno de arco elétrico, o qual converte sucata em aço novo por fundir aço antigo (Broadbent, 2016).

A Figura 3 apresenta, de forma esquemática, as rotas primária (siderurgia integrada) e secundária (siderurgia a forno elétrico) da produção de aço em uma usina siderúrgica convencional.

Rotas de Produção do Aço

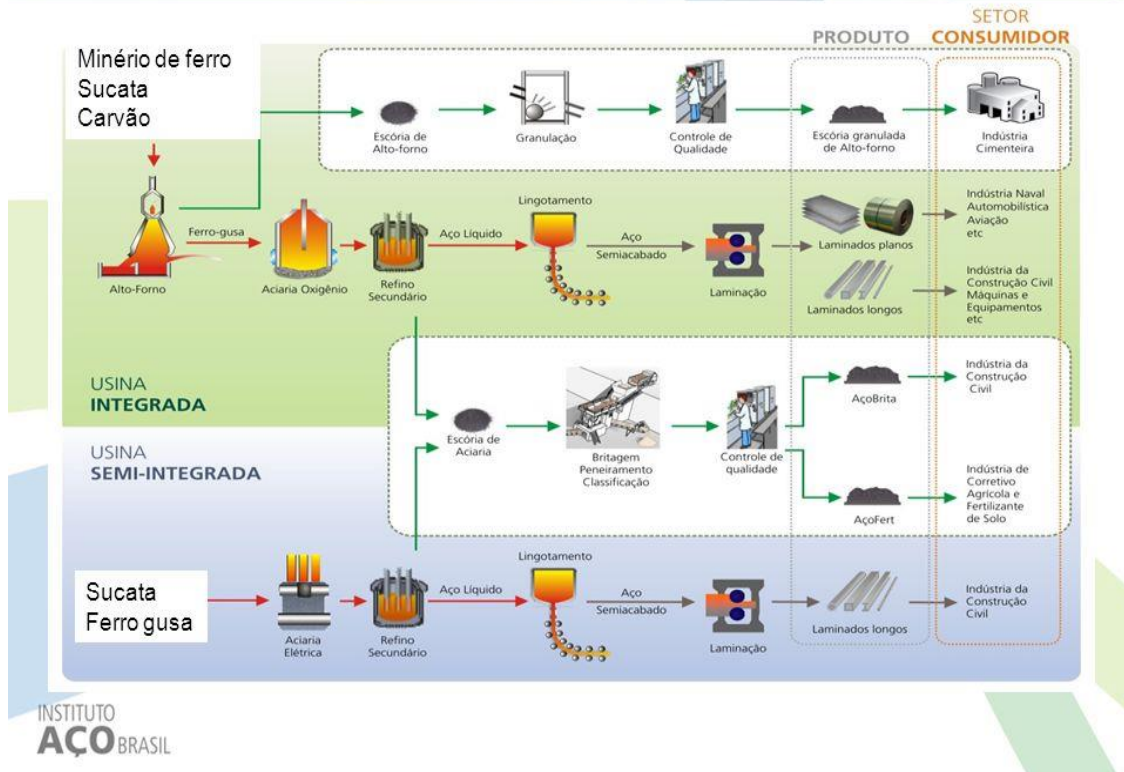


Figura 3 - Produção de aço em usina siderúrgica

Fonte: Instituto Aço Brasil

Nesta figura, a Usina Integrada refere-se à produção de aço pela rota primária (a partir de minério de ferro) e a Usina Semi-Integrada refere-se à produção de aço pela rota secundária (a partir de sucata ferrosa).

Considerado globalmente, em torno de 70% do aço é produzido em alto-forno, 29% é produzido em forno de arco elétrico e 1% usando fornos abertos (WSA, 2018), sendo que a participação da rota secundária na siderurgia brasileira é inferior (cerca de 14%), em relação à média mundial, em 2017 (WSA, 2019).

No Brasil, embora a reciclagem seja suportada por um fator de emissão de energia que o posiciona abaixo da média global, seu potencial é limitado pelos padrões de consumo de aço e baixas taxas de recuperação, as quais conduzem a um estoque insuficiente de sucata. Enquanto as simulações mais otimistas indicam uma taxa de reciclagem de 39% para o Brasil em 2050, os Estados Unidos já alcançaram 70% de produção de aço pela rota secundária em 2019, uma meta que

pode ser alcançada em países desenvolvidos que não necessitam investimentos significativos em infraestrutura adicional (Hites, 2020).

Além do mais, o Brasil é um país líder nas reservas globais de minério de ferro, o que não incentiva uma mudança natural da produção pela rota primária para a rota secundária. As flutuações de preço da sucata também prejudicam uma produção mais estável pela rota secundária. Faz-se necessária uma regulação governamental para regular estas flutuações (Torres de Souza & Pacca, 2021).

3.3.2. Aspectos da sustentabilidade ambiental do ciclo de vida do aço

O impacto ambiental do sistema de produto é dependente da taxa de reciclagem no fim de vida. Onde um material é reciclado no fim de vida, o sistema de produto é creditado com um impacto evitado baseado na demanda reduzida pela produção de material virgem no próximo ciclo de vida. Este método é conhecido também como o método do ciclo fechado de material porque a reciclagem economiza a produção de material virgem com as mesmas propriedades. A partir de uma perspectiva política, este método encoraja a reciclagem de produtos no final de suas vidas (Broadbent, 2016).

Conforme este mesmo autor, o aço é 100% reciclável e a sucata é convertida para o mesmo (ou maior ou menor) tipo de aço dependendo da metalurgia e processamento do produto requerido. O aço é reciclado em um ciclo fechado de material; as propriedades inerentes dos produtos primários e secundários são equivalentes e, portanto, o material secundário substitui a produção primária. A magnitude da reciclagem do aço é conduzida pelas taxas de reciclagem de fim de vida e a abordagem do fim de vida captura o impacto de diferentes taxas de reciclagem, regiões e categorias de produtos.

3.3.3. Benefícios e cargas ambientais da reciclagem do aço

Segundo um estudo conduzido por Rosado et al (2019), sobre a avaliação do ciclo de vida da construção e gestão de resíduos de demolição, no estado de São Paulo, Brasil, os benefícios e cargas ambientais da reciclagem do aço e da gestão de resíduos da construção civil, sinteticamente, são os seguintes:

- a) *“Os benefícios ambientais da reciclagem do aço se originam do consumo evitado de carvão, na formação do coque metalúrgico, para depleção abiótica de combustíveis fósseis (energias não renováveis), ferro-gusa para aquecimento global, pelas emissões de CO₂ evitadas e sinterização para oxidação fotoquímica e acidificação, os quais são usados na produção de aço pela rota primária;*
- b) *As etapas de transportes, causadas pela queima de óleo diesel, através do sistema de gerenciamento de resíduos de construção e demolição, se constituem em importantes fontes de emissões atmosféricas de dióxido de carbono (Aquecimento Global) e óxidos de nitrogênio (Acidificação);*
- c) *Os impactos de aterros de resíduos de construção e demolição são importantes para o aquecimento global e oxidação fotoquímica, devido às emissões de metano biogênico relacionados aos aterros de resíduos de papelão;*
- d) *A grande importância da reciclagem de resíduos de construção e demolição é destacada, é não somente relacionada aos resíduos não depositos em aterros, mas, principalmente, para os impactos evitados dos materiais recuperados.”*

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

3.4.1 Introdução à Avaliação do Ciclo de Vida

A crescente importância das questões ambientais, como a mudança climática, tem criado uma necessidade para avaliar os impactos dos produtos utilizados nos

projetos. Uma das principais técnicas para possibilitar a quantificação e comparação do impacto ambiental de um produto é a Avaliação do Ciclo de Vida. A ACV foi desenvolvida para analisar e quantificar as consequências ambientais de produtos e serviços durante todo o ciclo de vida (Ramesh et al., 2010).

Os métodos orientados para o ciclo de vida foram os precursores da atual ACV, tendo sido desenvolvidos nos anos 60, a partir de uma parceria entre as universidades e a indústria. Eram conhecidos como Análise de Perfil Ambiental e Recurso ou Eco balanços até o termo ACV se tornar a regra geral nos anos 90 (Hunt et al., 1992).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica para avaliar o impacto ambiental de um produto durante todo o seu ciclo de vida. Isso engloba a extração ou reciclagem de matérias-primas, transporte, fabricação, construção ou montagem, uso, manutenção e operação e destino até o fim da sua vida útil. Em consequência, a ACV requer não apenas um conhecimento detalhado dos fluxos associados a todas as etapas de produção, mas exige “conhecer” também o futuro do produto, os fluxos associados ao seu uso e pós-uso (JOHN, 2017).

Segundo Bjorn et al. (2018), a Avaliação do Ciclo de Vida possui as seguintes características:

- a) *“Assume uma perspectiva do ciclo de vida ao considerar todos os processos necessários para a entrega do produto ou serviço avaliado;*
- b) *Abrange uma ampla gama de questões ambientais, ou seja, uma cobertura abrangente dos processos sobre o ciclo de vida, que é complementada por uma cobertura abrangente das questões ambientais;*
- c) *Quantitativa, significando que pode ser usada para comparar impactos ambientais de diferentes processos e sistemas de produtos;*
- d) *Baseada em ciência, pois, a quantificação dos impactos potenciais na ACV está embasada na ciência natural.”*

Em anos recentes, a filosofia do ciclo de vida tem se tornado o foco chave na formulação de políticas ambientais. Várias ferramentas foram desenvolvidas para

auxiliar a técnica da ACV a fazer a análise de forma mais conveniente e automática. Conforme uma pesquisa em 60 profissionais de ACV realizada em 2006, GaBi e SimaPro eram as ferramentas de ACV mais populares, correspondendo a 58% e 31% do mercado, respectivamente (Cooper et al., 2006).

A ACV é uma estrutura para avaliação dos impactos ambientais de produto, processo ou serviço do berço à cova. A ACV é definida na ISO 14040 como a: *“Compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto através do seu ciclo de vida (NBR ISO 14040, 2009).”*

3.4.2 Conceitos básicos de Avaliação do Ciclo de Vida

O primeiro conceito é aquele que está prescrito na norma sobre Ciclo de Vida como sendo: *“estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final (NBR ISO 14040, 2009).”*

Por sua vez, a avaliação do ciclo de vida é uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares que entram no sistema produtivo (berço) à disposição final (túmulo) (CHEHEBE, 2002).

Outros conceitos importantes para a ACV dizem respeito à Função, Unidade Funcional, Fluxo Elementar, Fronteiras do sistema inicial e Unidade de processo.

A Função, em termos de ACV, consiste na definição clara das características de desempenho do produto a ser modelado (CHEHEBE, 2002).

A Unidade Funcional, conforme a prescrição da Norma Técnica, *“define a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto. O propósito primário de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV. A comparabilidade dos resultados de ACV é particularmente crítica quando diferentes sistemas estão sendo avaliados, para assegurar que as comparações entre eles sejam feitas em uma base comum (NBR ISO 14040, 2009).”*

Por sua vez: “o Fluxo Elementar diz respeito ao material ou energia retirados do meio ambiente e que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana (NBR ISO 14040, 2009).”

Conforme a Introdução a LCA (Goedkoop et al., 2010), os limites da análise são dependentes do objeto e dos objetivos do estudo, e é mais importante capturar os itens mais essenciais e não todos os processos envolvidos no ciclo de vida para simplificar o inventário e destacar o tema.

Já a Unidade de processo é a menor parte de um sistema de produto para a qual os dados são coletados visando à realização de uma ACV. Este é o volume de controle de cada atividade do ciclo, necessitando ser caracterizado, principalmente pelas entradas e pelas saídas. A Figura 4 representa uma unidade de processo e os fluxos de entrada e de saída (OMETTO, 2005).

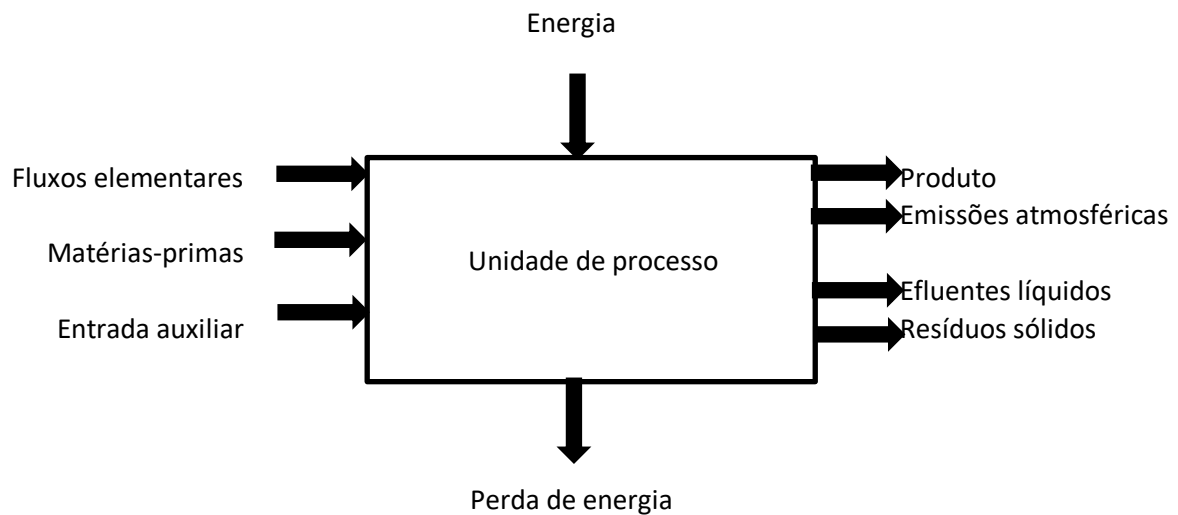


Figura 4 - Unidade de processo e fluxos relacionados.

Fonte: OMETTO (2005)

3.4.3 Estrutura da ACV

A ISO 14040 estabelece que a Análise do Ciclo de Vida de Produtos deve incluir a definição do objetivo e do escopo do trabalho, uma análise do inventário,

uma avaliação de impacto e a interpretação dos resultados, conforme a Figura 5 (CHEHEBE, 2002).

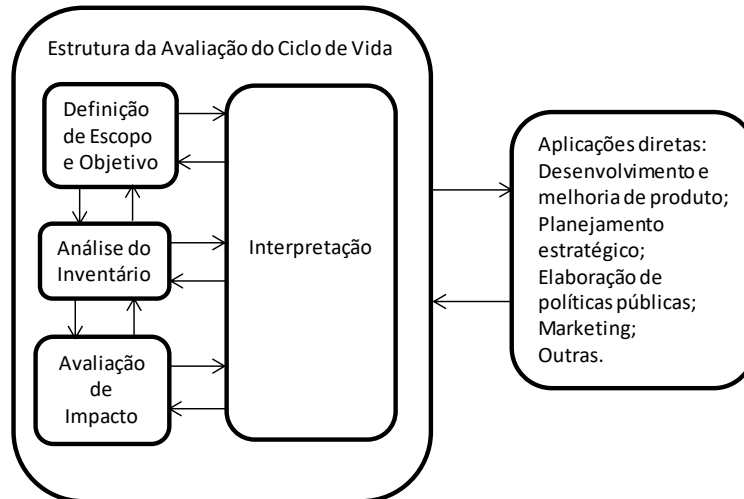


Figura 5 - Estrutura de uma ACV

Fonte: (CHEHEBE, 2002)

Segundo diversos autores (Huang & Hunkeler, 1995; Bültmann, 1997; Hanssen, 1999; Baumann, 2000; Heiskanen, 2000; Frankl & Rubik, 2000; Ekvall, 2012), a aplicação da ACV nas empresas pode ser classificada em cinco finalidades principais:

- a) *“Suporte à tomada de decisão no desenvolvimento de processo e produto;*
- b) *Ações de marketing;*
- c) *Desenvolvimento e seleção de indicadores usados no monitoramento de desempenho ambiental de produtos e plantas industriais;*
- d) *Seleção de fornecedores e subcontratados;*
- e) *Planejamento estratégico”.*

“A fase de definição do objetivo e escopo inclui a motivação do estudo, a aplicação pretendida e o público-alvo (NBR ISO 14040, 2009).” Esta fase é também

quando os limites do sistema do estudo são descritos e a unidade funcional é definida. A unidade funcional é uma medida quantitativa das funções que os bens (ou serviços) fornecem. A fase do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) resulta em uma compilação de entradas (recursos) e saídas (emissões) de um produto através do seu ciclo de vida em relação à unidade funcional (Cho et al., 2012).

“A fase da Análise do Inventário de Ciclo de Vida (AICV) é focada na compreensão e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais do sistema (NBR ISO 14040, 2009).” “Na fase de interpretação, os resultados das fases prévias são avaliados em relação ao objetivo e escopo do estudo de modo a obter conclusões e oferecer recomendações (NBR ISO 14040, 2009).”

A análise de sensibilidade e a análise de incerteza são aplicadas como parte da interpretação para conduzir ao desenvolvimento de conclusões a partir dos resultados, para estimar a robustez das conclusões e para identificar os pontos principais para trabalhos futuros, a fim de fortalecer ainda mais as conclusões (Hauschild, 2018).

3.4.4 ACV na Construção Civil

Assim como existe uma norma que regulamenta a aplicação da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida para produtos e serviços em geral, a ISO 14040, a construção civil, pela sua relevância no contexto da sustentabilidade ambiental, possui as suas normas específicas, destacando-se a EN 15978 e a EN 15804 as quais tratam da avaliação do desempenho ambiental de edificações e de produtos da construção civil, respectivamente.

3.4.4.1 EN 15804 – Conceitos, princípios e estrutura.

Esta norma europeia fornece as regras de categoria de produtos principais para todos os produtos e serviços da construção. Esta norma fornece uma estrutura

para assegurar que todas as Declarações Ambientais de Produtos referentes aos produtos, serviços e processos da construção são originados, verificados e apresentados de forma harmonizada.

Uma Declaração Ambiental de Produto comunica informação ambiental verificável, acurada e não equivocadas para os produtos e suas aplicações, suportando, deste modo, escolhas justas baseadas cientificamente e estimulando o potencial da melhoria ambiental continua dirigida ao mercado.

A informação da Declaração Ambiental de Produtos é expressa em módulos, a qual permite a expressão e organização dos dados através do ciclo de vida do produto. A abordagem requer que os dados fundamentais sejam consistentes, reproduzíveis e comparáveis.

A Declaração Ambiental de Produto é expressa de modo a permitir a agregação (adição) para fornecer informação completa para edificações. Esta norma não está de acordo com a agregação no nível das edificações nem essa norma descreve as regras para aplicação de Declarações Ambientais de Produtos em avaliação de edificações.

Segundo a EN 15804, o objetivo da norma é fornecer informação ambiental quantificada para um produto ou serviço da construção em uma base científica e harmonizada. Também fornece informações da saúde relacionadas às emissões do ar interno, solo e água durante a etapa de uso da edificação. O propósito de uma Declaração Ambiental de Produto no setor da construção é fornecer a base para avaliação de edificações e outros tipos de construções e, identificando aquelas Declarações que causam menos danos ao meio-ambiente.

Quanto às etapas do ciclo de vida cobertas em relação aos tipos de Declaração Ambiental de Produto, a EN 15804 classifica em três tipos (conforme a Figura 4):

- a) Somente a Etapa de Produto. Tal como uma Declaração Ambiental que cobre o suprimento de matéria-prima, transporte, manufatura e processos associados; esta Declaração Ambiental de Produto é dita como sendo “berço ao portão” e se torna uma

Declaração Ambiental de Produto baseada na informação dos módulos A1 ao A3;

- b) A Etapa de Produto e outras etapas do ciclo de vida selecionadas. Tal como uma Declaração Ambiental de Produto é dita como sendo “berço ao portão com opções” e se torna uma Declaração Ambiental de Produtos baseada na informação dos módulos A1 ao A3 mais outros módulos opcionais selecionados, ou seja, informação dos módulos C1 ao C4 do fim de vida. A informação do módulo D pode ser incluída nesta Declaração Ambiental de Produto;
- c) O ciclo de vida de um produto conforme as fronteiras do sistema. Neste caso, a Declaração Ambiental de Produto cobre a etapa de uso, instalação até a edificação, uso e manutenção, substituições, demolição, processamento de resíduos para reuso, recuperação, reciclagem e é dita como sendo “berço à cova” e torna-se uma Declaração Ambiental de Produto referente aos produtos da construção baseada em uma ACV, ou seja, cobrindo todas as informações dos módulos A1 ao C4. Nesta Declaração Ambiental de Produto, a informação do módulo D pode ser incluída.

A princípio, a comparação de produtos, com base nas suas Declarações Ambientais de Produtos, é definida pela contribuição que eles causam no desempenho ambiental da edificação. Consequentemente, a comparação do desempenho ambiental dos produtos de construção utilizando as informações da Declaração Ambiental de Produto deve ser baseada no uso dos produtos e seus impactos na edificação, e deve considerar o ciclo de vida completo (informações de todos os módulos).

Ainda, segundo a EN 15804, a unidade declarada é usada ao invés da unidade funcional quando a função precisa de um produto ou cenários em termos de edificações não é declarada ou é desconhecida. A unidade declarada deve ser aplicada quando uma Declaração Ambiental de Produto cobre uma ou mais etapas

do ciclo de vida como informações dos módulos, ou seja, no caso de Declarações Ambientais de Produtos “berço ao portão” e “berço ao portão com opções” e quando estas não são baseadas em uma ACV “berço ao túmulo” completa. A unidade declarada fornece uma referência pelo meio da qual os fluxos de materiais das informações dos módulos de um produto da construção são normalizados (em um senso matemático) para produzir dados, expressos em uma base comum. A unidade declarada fornece a referência para combinar fluxos de materiais atribuídos ao produto da construção e para combinar os impactos ambientais para as etapas do ciclo de vida incompleto do produto da construção. A unidade declarada deve ser relacionada às aplicações típicas dos produtos.

Em relação aos benefícios e cargas ambientais causados pelos processos de reuso, reciclagem e recuperação de materiais, a EN 15804 afirma que:

“O módulo D reconhece o conceito de planejamento para reutilização, reciclagem e recuperação de materiais de edificações pela indicação dos benefícios potenciais do uso futuro evitado de materiais e combustíveis primários, enquanto leva em conta cargas associadas com os processos de recuperação e reciclagem além da fronteira do sistema.

No módulo D, os impactos líquidos são calculados pela adição dos impactos relacionados aos processos de recuperação e reciclagem para além da fronteira do sistema (após o cenário de fim de vida) até o ponto da equivalência funcional onde o material ou combustível secundário substitui a produção primária e subtraindo os impactos resultantes da produção substituída do material ou a geração de energia substituída a partir de fontes primárias.”

A Figura 6 mostra como, segundo a EN 15804, se estrutura a avaliação do ciclo de vida de uma edificação.

INFORMAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE EDIFICAÇÕES																																																						
INFORMAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES		INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR ALÉM DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÃO																																																				
EPD	<p>Berço ao pontão Unidade declarada</p> <p>Berço ao pontão com opções declarada/Unidade funcional</p> <p>Berço ao túmulo Unidade funcional</p>	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Mandatário</td> </tr> <tr> <td>Inclusão opcional 1/2</td> <td>Inclusão opcional 1/2</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Mandatário</td> </tr> </table>	Mandatário		Inclusão opcional 1/2	Inclusão opcional 1/2	Mandatário		<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Sem VUR</td> </tr> <tr> <td>VUR 2)</td> <td>VUR 2)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">VUR 2)</td> </tr> </table>	Sem VUR		VUR 2)	VUR 2)	VUR 2)		<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Inclusão opcional</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Inclusão opcional</td> </tr> </table>	Inclusão opcional		Inclusão opcional																																			
		Mandatário																																																				
Inclusão opcional 1/2	Inclusão opcional 1/2																																																					
Mandatário																																																						
Sem VUR																																																						
VUR 2)	VUR 2)																																																					
VUR 2)																																																						
Inclusão opcional																																																						
Inclusão opcional																																																						
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">AL-3 ETAPA DE PRODUTO</th> </tr> <tr> <td>A1</td> <td>SUPRIMENTO DE MATERIA-PRIMA</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>TRANSPORTE</td> </tr> <tr> <td>A3</td> <td>FABRICAÇÃO</td> </tr> </table>	AL-3 ETAPA DE PRODUTO		A1	SUPRIMENTO DE MATERIA-PRIMA	A2	TRANSPORTE	A3	FABRICAÇÃO	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">AA-5 ETAPA-PROCESSO DE CONSTRUÇÃO</th> </tr> <tr> <td>AA</td> <td>TRANSPORTE</td> </tr> <tr> <td>AA5</td> <td>PROCESSO DE INSTALAÇÃO - CONSTRUÇÃO</td> </tr> </table>	AA-5 ETAPA-PROCESSO DE CONSTRUÇÃO		AA	TRANSPORTE	AA5	PROCESSO DE INSTALAÇÃO - CONSTRUÇÃO	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">B1-7 ETAPA DE USO</th> </tr> <tr> <td>B1</td> <td>USO</td> </tr> <tr> <td>B2</td> <td>MANUTENÇÃO</td> </tr> <tr> <td>B3</td> <td>REPARO</td> </tr> <tr> <td>B4</td> <td>SUBSTITUIÇÃO</td> </tr> <tr> <td>B5</td> <td>REFORMA</td> </tr> <tr> <td>B6</td> <td>USO OPERACIONAL DE ENERGIA</td> </tr> <tr> <td>B7</td> <td>USO OPERACIONAL D'ÁGUA</td> </tr> </table>	B1-7 ETAPA DE USO		B1	USO	B2	MANUTENÇÃO	B3	REPARO	B4	SUBSTITUIÇÃO	B5	REFORMA	B6	USO OPERACIONAL DE ENERGIA	B7	USO OPERACIONAL D'ÁGUA	<table border="1"> <tr> <th colspan="4">C1-4 ETAPA DE FIM DE VIDA</th> </tr> <tr> <td>C1</td> <td>DECONSTRUÇÃO /DEMOLIÇÃO</td> <td>CENÁRIO</td> <td>CENÁRIO</td> </tr> <tr> <td>C2</td> <td>TRANSPORTE</td> <td>CENÁRIO</td> <td>CENÁRIO</td> </tr> <tr> <td>C3</td> <td>PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS</td> <td>CENÁRIO</td> <td>CENÁRIO</td> </tr> <tr> <td>C4</td> <td>DISPOSIÇÃO FINAL</td> <td>CENÁRIO</td> <td>CENÁRIO</td> </tr> </table>	C1-4 ETAPA DE FIM DE VIDA				C1	DECONSTRUÇÃO /DEMOLIÇÃO	CENÁRIO	CENÁRIO	C2	TRANSPORTE	CENÁRIO	CENÁRIO	C3	PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	CENÁRIO	CENÁRIO	C4	DISPOSIÇÃO FINAL	CENÁRIO	CENÁRIO	<p>D</p> <p>BENEFÍCIOS E CARGAS ALÉM DOS LIMITES DO SISTEMA</p> <p>POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO/RECUPERAÇÃO/RECICLAGEM</p>
AL-3 ETAPA DE PRODUTO																																																						
A1	SUPRIMENTO DE MATERIA-PRIMA																																																					
A2	TRANSPORTE																																																					
A3	FABRICAÇÃO																																																					
AA-5 ETAPA-PROCESSO DE CONSTRUÇÃO																																																						
AA	TRANSPORTE																																																					
AA5	PROCESSO DE INSTALAÇÃO - CONSTRUÇÃO																																																					
B1-7 ETAPA DE USO																																																						
B1	USO																																																					
B2	MANUTENÇÃO																																																					
B3	REPARO																																																					
B4	SUBSTITUIÇÃO																																																					
B5	REFORMA																																																					
B6	USO OPERACIONAL DE ENERGIA																																																					
B7	USO OPERACIONAL D'ÁGUA																																																					
C1-4 ETAPA DE FIM DE VIDA																																																						
C1	DECONSTRUÇÃO /DEMOLIÇÃO	CENÁRIO	CENÁRIO																																																			
C2	TRANSPORTE	CENÁRIO	CENÁRIO																																																			
C3	PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	CENÁRIO	CENÁRIO																																																			
C4	DISPOSIÇÃO FINAL	CENÁRIO	CENÁRIO																																																			

1) Inclusão para cenário declarado
2) Se todos os cenários são fornecidos
VUR = Vida Útil de Referência

Figura 6 – Tipos de EPD com respeito às etapas do ciclo de vida compreendidas e as etapas e módulos do ciclo de vida para a avaliação de edificações.

Fonte: Autor (Adaptado da EN 15804)

Segundo a Norma EN 15804, os indicadores de impactos ambientais a serem avaliados durante o ciclo de vida de um produto da construção civil são os seguintes:

- a) Potencial de aquecimento global (GWP);
- b) Potencial de depleção da camada de ozônio estratosférico (ODP);
- c) Potencial de acidificação de solo e água (AP);
- d) Potencial de eutrofização (EP);
- e) Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos de ozônio troposférico (POCP);
- f) Potencial de depleção de recursos abióticos para elementos;
- g) Potencial de depleção de recursos abióticos para combustíveis fósseis.

Ainda segundo a EN 15804, outros indicadores possíveis de serem avaliados no ciclo de vida de uma edificação referem-se ao uso de recursos, categorias de resíduos e fluxos de saída que partem do sistema.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações iniciais

O estudo de caso deste trabalho de pesquisa refere-se à estrutura metálica de um pavilhão industrial executada a partir de sucata ferrosa reciclada, localizado no município de Sapucaia do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Assume-se, portanto, que o aço utilizado na fabricação da estrutura metálica é constituído integralmente de sucata ferrosa reciclada, sendo que, esta hipótese foi confirmada pela própria fábrica.

Este pavilhão destina-se à guarda de equipamentos e ferramentas no mesmo sítio da aciaria responsável pelo fornecimento do aço empregado na fabricação e montagem dessa estrutura.

Os dados desse pavilhão constam na Tabela 1.

DADOS PAVILHÃO INDUSTRIAL	
TIPO DE EDIFICAÇÃO	PAVILHÃO INDUSTRIAL
LOCAL DA EDIFICAÇÃO	SAPUCAIA DO SUL/RS
ANO DA CONSTRUÇÃO	2012
PESO TOTAL DA ESTRUTURA (ton.)	143,9

Tabela 1 - Dados pavilhão industrial

Fonte: Autor

4.2 Objetivo e escopo da Avaliação do Ciclo de Vida

A abordagem utilizada no presente estudo de caso da ACV proposta segue as recomendações previstas na norma que trata da avaliação do ciclo de vida de

produtos da construção civil definidos na EN 15804 como sendo as Declarações Ambientais de Produtos, pois se trata de uma ACV de uma componente de uma edificação constituída de um único produto que é a sucata ferrosa reciclada.

A unidade declarada é o Kg de aço da estrutura metálica fabricada, pois, não foi possível se definir claramente a unidade funcional e nem se avaliar os impactos ambientais das etapas de processo de construção e de uso, pelo fato de não haver dados e estudos que possibilitem esta avaliação. Portanto, trata-se de uma ACV de ciclo incompleto a qual demanda a utilização de uma unidade declarada, ao invés de uma unidade funcional, conforme prescrito na EN 15804.

O grid energético adotado foi referente ao ano de 2015 para a região sul do Brasil. A escolha do ano deste grid energético se deve ao fato de que não se trata de um estudo de caso específico em que a variável temporal seja importante, pois, os processos tecnológicos utilizados não se alteraram desde o ano de 2012, em que foi fabricada e montada esta estrutura, até os dias atuais. Além disso, era o único ano de matriz energética brasileira disponível nas bases de dados do ECOINVENT, dentro do software SimaPro usado na modelagem da ACV deste trabalho.

A avaliação é desenvolvida “*cradle-to-gate with options*” (do berço ao portão com opções). A ACV proposta é do tipo atribucional, pois avalia os impactos ambientais ocorridos no ciclo de vida, método de alocação cut-off by classification, pelo fato de não gerar coprodutos. O método de avaliação dos impactos ambientais adotado foi o CML-IA, pois possui todas as categorias de impacto ambiental recomendadas pela EN 15804.

Os módulos que compõem essa avaliação (com “x” os módulos que estão sendo considerados na ACV proposta, com “-“os módulos que não estão sendo considerados na ACV proposta) estão indicados na Tabela 2.

A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
ACIARIA	TRANSPORTE	FABRICAÇÃO	TRANSPORTE	MONTAGEM	USO	MANUTENÇÃO	REPARO	SUBSTITUIÇÃO	REFORMA	USO OPERACIONAL DE ENERGIA	USO OPERACIONAL D'ÁGUA	DECONSTRUÇÃO/DEMOIÇÃO	TRANSPORTE	PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	DISPOSIÇÃO FINAL	RECICLAGEM
X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	X

Tabela 2 - Módulos da ACV proposta

Fonte: Autor

4.3 Etapas e Módulos para montagem do ICV da ACV proposta

Para a ACV proposta nesse trabalho, os pressupostos para montagem do ICV segundo os módulos que a compõem, conforme a EN 15804, em cada etapa, são os seguintes:

4.3.1 Etapa de produto (Módulos A1 – A3) e Etapa do processo de construção (Módulos A4 – A5)

O Módulo A1 refere-se à produção de produtos siderúrgicos na aciaria (bobinas, placas e chapas), a partir da reciclagem de sucata ferrosa, para fornecimento à fábrica de estruturas metálicas.

O Módulo A2 se constitui do transporte dos produtos siderúrgicos, da aciaria para a fábrica de estruturas metálicas. A distância média de transporte é de 18,4 km entre a aciaria e a fábrica, distância essa obtida através do aplicativo Google Maps.

O Módulo A3 constitui-se do processo de fabricação da estrutura metálica e das operações de transporte inter-relacionadas a saber:

- a) Produção das peças da estrutura metálica, a partir de dados primários fornecidos pela empresa responsável pelo projeto, fabricação e montagem da estrutura metálica.
- b) Transporte das rebarbas de aço resultantes do processo de fabricação da estrutura metálica, da fábrica para a aciaria para reprocessamento,

cujas distância média de transporte via rodoviária é de 18,4 km, conforme aplicativo Google Maps;

- c) Transporte de resíduos sólidos de granalha metálica e tinta para aterros controlados, distando 350 km da fábrica, conforme informação da própria fábrica.

Os processos de fabricação da estrutura metálica, mencionada no item “a”, são: corte com máquina oxicorte e dobra do aço, soldagem das peças metálicas, limpeza com jateamento de granalha de aço em câmara fechada e pintura com pistola de pressão, conforme visita técnica realizada à fábrica em 18/09/2014.

O caminhão adotado é o EURO3, capacidade de carga entre 16 e 32 ton., pois é o que melhor se adapta aos caminhões utilizados no item “b”; carretas de 12m e capacidade de carga de 20 ton., conforme informação da fábrica, além de ter o consumo de óleo diesel e emissões de CO₂ compatíveis com os caminhões brasileiros utilizados no transporte rodoviário de cargas, à época da construção da estrutura metálica objeto do estudo de caso deste trabalho científico.

Para o transporte de resíduos sólidos, descritos no item “c”, da fábrica para aterros controlados, adotou-se uma camionete de pequeno porte pelo fato da fábrica não ter disponibilizado informações sobre o tipo de veículo e por se tratar de um baixo volume de resíduos (15,18 kg de granalhas e 31,01 kg de tinta alquídica), o qual não justifica, por si só, a adoção de uma carreta para transporte destes resíduos.

Os módulos A4 e A5 não estão sendo considerados neste estudo, pois se trata de uma ACV de produto e não de edificações em uma avaliação “*cradle to gate with options*” (berço ao portão com opções) que, segundo a EN 15804, leva-se em conta apenas a Etapa de Produto (mandatório) e Cenário de fim de vida (opcional) podendo se incluir o módulo D, opcionalmente que, no caso específico da ACV proposta neste trabalho, tornou-se mandatório pelo elevado potencial de reciclagem da sucata ferrosa.

4.3.2 Etapa de Uso (Módulos B1 – B7)

No presente estudo de caso a Etapa de Uso não foi considerada pelo fato de ser opcional, segundo a EN 15804 em uma avaliação “*cradle to gate with options*” (berço ao portão com opções) e, pelo fato de se tratar de uma ACV de produto da construção civil e não de uma ACV de edificações, pois, por se tratar de uma componente de uma edificação constituída por um único produto (sucata ferrosa reciclada), não há como mensurar consumos operacionais d’água e energia, por exemplo.

4.3.3 Etapa do Fim de Vida (Módulos C1 – C4) e Módulo D

No módulo C1, para fins de estimação da energia consumida, foi adotado um coeficiente obtido a partir de um estudo do Athena Institut (1997) para desconstrução/demolição de estruturas de concreto armado, madeira e aço (fundações incluídas), conforme Tabela 3:

	ESTRUTURA P/RECICLAGEM (MJ/kg)	ESTRUTURA P/REUSO (MJ/kg)
ESTRUTURA AÇO	0,239	0,432
ESTRUTURA CONCRETO ARMADO	0,070	0,061
ESTRUTURA MADEIRA	0,323	0,176

Tabela 3 - Energia usada (em MJ/kg) para demolição/desconstrução de diferentes modelos estruturais em edificações

Fonte: Athena Institut (1997)

O coeficiente adotado foi 0,239 MJ/kg que corresponde à reciclagem, pois, o cenário proposto neste trabalho diz respeito à reciclagem, ou seja, após a desconstrução da estrutura, todo o material será enviado para reciclagem ou aterro.

Este coeficiente, que relaciona a energia consumida nos equipamentos utilizados na demolição da estrutura metálica pela massa de material originada a partir desta demolição, se constitui em uma compilação de dados empíricos obtidos através de uma análise estatística de um conjunto de edificações avaliadas e mensuradas na região de Ontário, no Canadá.

O módulo C2 diz respeito ao transporte dos resíduos inaproveitáveis resultantes após a desconstrução da estrutura. A distância média de transporte adotada foi de 100 km. O percentual adotado destes resíduos transportados para

aterro foi de 10%, conforme estudos de Kaziolas et al. (2015) e Zygomas et al. (2016) para cenários de reciclagem do aço.

O módulo C3, o qual trata de processos de tratamento de resíduos após a desconstrução/demolição, não está sendo considerado no presente trabalho, pois, conforme Gervásio, H. & Dimova, S. (2018), não ocorrem processos dessa natureza em relação à sucata ferrosa, antes do seu reprocessamento para a produção de aço.

O módulo C4, que trata da disposição final dos resíduos metálicos inaproveitáveis em aterro, constitui-se no volume de resíduos dispostos, após a desconstrução da estrutura metálica e transporte destes resíduos para o aterro.

Finalmente, o módulo D, embora segundo a EN 15804 seja opcional, considerando-se o elevado potencial de reciclagem da sucata ferrosa e os benefícios ambientais inerentes a essa condição, torna-se, todavia, mandatório na ACV proposta no presente trabalho. O cenário adotado foi de 90% de recicláveis e 10% de inaproveitáveis, enviados para aterro, conforme estudos de Kaziolas et al. (2015) e Zygomas et al. (2016) para cenários de reciclagem do aço.

A Figura 7 mostra o fluxograma das etapas e dos módulos que compõem a ACV deste trabalho de pesquisa. Os módulos em cor vermelha correspondem àqueles para os quais não se realiza a avaliação dos impactos ambientais embora constem no fluxograma, por uma questão de coesão e continuidade deste.

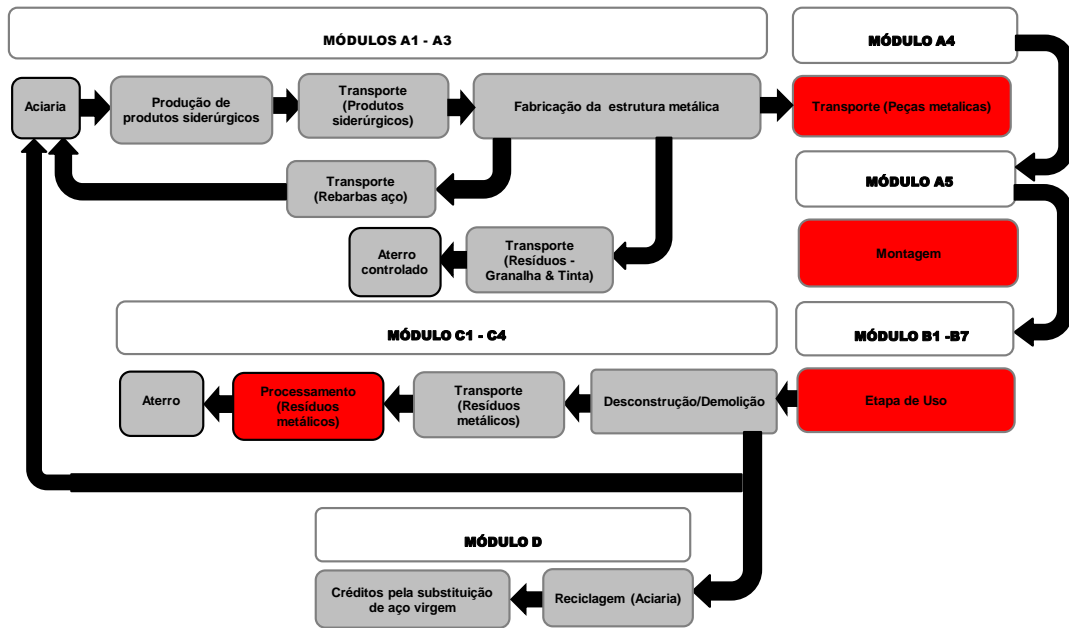


Figura 7 - Fluxograma da ACV da Estrutura Metálica

Fonte: Autor

A Tabela 4 mostra alguns dos parâmetros básicos adotados em termos de distâncias médias de transporte e taxa de reciclagem de aço do cenário de fim de vida apresentado no presente estudo.

Parâmetro	Valor Básico
Distância A2	18,4 km
Distância A3 (rebarbas metálicas)	18,4 km
Distância A3 (resíduos granalha e tinta)	350 km
Distância A4	18,4 km
Distância C2	100 km
Taxa de reciclagem sucata ferrosa	90%

Tabela 4 - Valores de referência para parâmetros básicos

Fonte: Autor

4.4 Natureza e qualidade dos dados obtidos

Para a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida, com o propósito de uma modelagem de Avaliação do Ciclo de Vida, com vistas à obtenção dos impactos ambientais, há duas fontes de dados principais:

- a) Primária, cujos dados são obtidos diretamente a partir do processo do produto ou serviço que se está avaliando; ou
- b) Secundária, cujos dados são obtidos a partir de bases de dados (p.ex. ECOINVENT) e achados na literatura científica internacional.

Neste trabalho de pesquisa científica, dados primários foram obtidos para o processo de fabricação da estrutura metálica e; para a aciaria, algumas operações de transportes, desconstrução/demolição e módulo D, foram utilizados bases de dados (notadamente ECOINVENT versão 3.6) e achados da literatura científica internacional.

Em função destes dados obtidos, o trabalho apresentou também algumas limitações e adequações, dentre as quais podem ser citadas:

- a) Uma vez que não há datasets brasileiros para o processo da aciaria, foi adotado um dataset de aciaria em termos globais;
- b) Como na fábrica de estruturas metálicas não há medidores específicos de energia elétrica para cada processo de produção e nem para a área administrativa, todo o consumo de energia elétrica foi apropriado para a linha de produção de forma global;

A Tabela 5 mostra os datasets adotados e a verificação da qualidade e abrangência dos dados utilizados na modelagem da ACV proposta no SimaPro, a partir do ECOINVENT versão 3.6 e achados da literatura científica internacional.

Processo	Dataset	Período de validade	Representatividade temporal	Representatividade Geográfica	Representatividade tecnológica/Completo	Fonte
Aciação (Módulo A1)	Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	2001 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa	Produção de aço secundário (à partir de sucata ferrosa). Começa com a chegada da sucata ferrosa no forno de arco elétrico. Processo de produção do aço e moldagem.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Transporte produtos siderúrgicos (Módulo A2)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U	2011 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa	Atividades de mercado contendo valores médios para transporte (entre produtores e consumidores), perdas de produtos e outros fluxos gerados durante transporte entre os produtores e consumidores.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Soldagem (Módulo A3)	Welding, arc, steel {RoW} processing Cut-off, U, 0,0536Kg/m = 70,078m	1997 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa.	Soldagem MAG de aço não ligado e os transportes das hastes de preenchimento e do gás de proteção para o local de uso.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Limpeza com granalha (Módulo A3)	Iron pellet {RoW} production Cut-off, U	1999 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa, Emissões são reportadas à partir do Canadá (Quebec).	Mistura e sinterização. Processo de fomo de grelha. As emissões são abatidas (Quebec - Canada)	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Pintura tinta alquídica (Módulo A3)	Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state {RoW} alkyd paint production, white, water-based, product in 60% solution state Cut-off, U	1995 - 2020	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa.	Inicia com a recepção das matérias-primas no portão da fábrica. Termina com a produção de tinta alquídica redutível em água.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Eletricidade Alta Tensão (Módulo A3)	Energia - Electricity country mix - high voltage - Market Electricity, high voltage (BR-Southern grid) market for electricity, high voltage Cut-off, U	2015		Região Sul do Brasil	As entradas de eletricidade produzidas no país e as importações. A rede de transmissão. Emissões diretas para o ar (ozônio e N ₂ O). Perdas de eletricidade durante a transmissão.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Transporte Rebarbas Metálicas (Módulo A3)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U	2011 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa	Atividades de mercado contendo valores médios para transporte (entre produtores e consumidores), perdas de produtos e outros fluxos gerados durante transporte entre os produtores e consumidores.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Fabricação Estrutura Metálica/Transporte resíduos granalha e tinta (Módulo A3)	Transport, freight, light commercial vehicle {RoW} market for transport, freight, light commercial vehicle Cut-off, U	2011 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa	Atividades de mercado contendo valores médios para transporte (entre produtores e consumidores), perdas de produtos e outros fluxos gerados durante transporte entre os produtores e consumidores.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Desconstrução Estrutura Metálica (Módulo C1)	Desconstrução de uma estrutura metálica	1997		Canadá	Somente a energia demandada é considerada.	Literatura
Transporte resíduos inaproveitáveis (Módulo C2)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U	2011 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa	Atividades de mercado contendo valores médios para transporte (entre produtores e consumidores), perdas de produtos e outros fluxos gerados durante transporte entre os produtores e consumidores.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Disposição resíduos inaproveitáveis em aterro (Módulo C4)	Scrap steel {RoW} treatment of, inert material landfill Cut-off, U	1995 - 2019	Média anual	Resto do Mundo incluindo Europa.	Nenhuma emissão direta do aterro de material inerte (lixiviado) é inventariada pois é considerada como insignificante. Contém apenas trocas para impactos específicos de processos (energia, uso da terra) e infraestrutura.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)
Benefícios e cargas ambientais decorrentes da reciclagem (Módulo D)	Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U	2000 - 2019	Média anual	Média do mix de produção mundial e europeu	Mix de diferentes aços produzidos e laminação à quente.	ECOINVENT 3.6 (SimaPro)

Tabela 5 - Verificação da qualidade e abrangência dos dados utilizados na modelagem da ACV proposta no SimaPro, a partir dos datasets adotados e literatura científica internacional.

Fonte: Autor

A Tabela 5 se estrutura em colunas, compreendendo todos os elementos que fazem parte dos requisitos de qualidade dos dados, conforme se descreve a seguir:

- Processo – Refere-se aos processos que estão incluídos na Avaliação do Ciclo de Vida;
- Dataset – Refere-se aos conjuntos de dados relacionados aos processos utilizados na modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida em um software para cálculo de impactos ambientais;

- c) Período de validade – Refere-se à abrangência do período de tempo para o qual os dados constantes dos datasets são considerados válidos;
- d) Representatividade temporal – Refere-se ao critério de cálculo para estimação dos valores dos dados constantes nos datasets, dentro do período de validade destes dados;
- e) Representatividade geográfica – Refere-se às áreas de abrangência geográfica que estão sendo consideradas para coleta dos valores constantes dos datasets;
- f) Representatividade tecnológica/Completeness – Refere-se às tecnologias específicas ou um mix tecnológico que constam dos datasets adotados na modelagem da ACV;
- g) Fonte – Refere-se à origem dos datasets ou achados da literatura científica internacional relacionados aos processos utilizados na modelagem da ACV.

4.5 Categorias de impacto ambiental adotados na ACV

As categorias de impacto ambiental adotados na ACV deste trabalho são aqueles recomendados na EN 15804, que são os seguintes:

- a) Potencial de aquecimento global;
- b) Potencial de depleção da camada de ozônio estratosférico;
- c) Potencial de acidificação de solo e água;
- d) Potencial de eutrofização;
- e) Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos de ozônio troposférico;
- f) Potencial de depleção de recursos abióticos para elementos;
- g) Potencial de depleção de recursos abióticos para combustíveis fósseis.

O Inventário do Ciclo de Vida que serviu de base para a modelagem da ACV objeto deste trabalho, no software SimaPro versão 9.1.1.1, assim como os resultados obtidos, decorrentes dessa modelagem, e a sua interpretação, são apresentados no próximo capítulo.

5. RESULTADOS OBTIDOS E SUA INTERPRETAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, conforme os objetivos pretendidos no presente trabalho científico, bem como a interpretação e discussão acerca destes resultados.

Inicialmente, é apresentado o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), por módulo da ACV proposta, elaborado e utilizado para a avaliação dos impactos ambientais e do cenário de fim de vida sugerido para fins de avaliação das cargas e benefícios ambientais, decorrentes da reciclagem da sucata ferrosa no estudo de caso proposto neste trabalho.

As Tabelas 6, 7, e 8 abaixo apresentam os dados relativos a este Inventário do Ciclo de Vida, por módulo da ACV proposta, conforme EN 15804, compreendendo os quantitativos de insumos e os processos do ECOINVENT utilizados para modelagem no SimaPro.

Módulo	Insumo	Quantidade	Unidade	Observação	Processo ECOINVENT
MÓDULO A1 ACIARIA	Aço (sucata ferrosa)	151.171	kg	Segue o ECOINVENT sobre reciclagem de sucata ferrosa, tanto em termos de inputs quanto de outputs.	Steel, low-alloyed(RoW) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U
MÓDULO A2 TRANSPORTE PRODUTOS SIDERÚRGICOS	Transporte produtos siderúrgicos	5.563	tkm	Carreta de 12 metros (conforme fábrica) com capacidade de carga de 20 toneladas. Em todo caso, já há a previsão no ECOINVENT (vide considerações). Distância Média de Transporte (DMT) de 18,4Km da Aciaria até a fábrica de estruturas metálicas. Distância rodoviária obtida do Google Maps, ida e volta (vide Materiais e Métodos - Etapas e módulos da ACV proposta).	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW) market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U
	Óleo diesel	vide observação		Segue o ECOINVENT do SIMAPRO	
	<i>Queima de óleo diesel</i>	vide observação		Emissões com base na queima de óleo diesel, a partir do ECOINVENT do SIMAPRO	

Tabela 6 – ICV, Módulos A1 e A2.

Fonte: Autor

Módulo	Insumo	Quantidade	Unidade	Observação	Processo ECOINVENT
MÓDULO A3 FABRICAÇÃO ESTRUTURA METÁLICA	Aço ASTM A36	151.171	kg	Perfis, chapas e bobinas usadas na dobra e corte dos elementos da estrutura metálica, a partir de aço reprocessado de sucata ferrosa.	
	Arame MIG ref. ER70S	3.756,18	kg	Solda consumida na fabricação da estrutura metálica. 26,10 Kg/ton.	Welding, arc, steel {RoW} processing Cut-off, U. 0,0536Kg/m = 70.078m
	Granalha de aço esférica tamanho 390	3.036,61	kg	utilizada na limpeza das peças estruturais antes da aplicação da tinta. 21,1 Kg/ton.	Iron pellet {RoW} production Cut-off, U
	Tinta alquídica	5.440,91	kg	Consumo de 25 litros por tonelada produzida. litros - Sherwin Williams/ Densidade de acordo com a FISPQ do produto. Densidade da tinta=1,512255.	Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state {RoW} alkyd paint production, white, water-based, product in 60% solution state Cut-off, U
	Energia Elétrica	41.154,79	KWh	Consumo de energia elétrica obtido com base no total de aço que ingressou na fábrica (151,171 ton.), pois o processo de corte se dá sobre o volume que entra e não sobre o volume que sai (143,915 ton.). 272,24KWh/ton. Apropriada diretamente na linha de produção pois não há um medidor específico para cada processo de fabricação e nem para a área administrativa da fábrica. Segue o Grid Energético Brasileiro de 2015.	Energia - Electricity country mix - high voltage - Market Electricity, high voltage {BR-Southern grid} market for electricity, high voltage Cut-off, U
	Estrutura produzida	143.915	kg	Aço ASTM A36	
	Rebarbas metais	7.256	kg	Resíduo de cortes, retorna para reciclagem na usina. Segundo dados da empresa 4,8% de resíduos da fase de corte.	
	Resíduos granalhas	15,18	kg	0,5% de resíduos descartados em aterro controlado segundo informação da empresa	
	Resíduos tinta alquídica	21,41	kg	0,57% de resíduos descartados em aterro controlado segundo informação da empresa	
	Transporte rebarbas metais para aciaria	267,02	tkm	Transporte de rebarbas da fábrica para reprocessamento na aciaria. Distância de 18,4 km ida e volta	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U
	Transporte resíduos granalha e tinta alquídica	32,3	tkm	Aterro controlado dista 350 km da fábrica segundo informação da empresa (dado primário), ida e volta	Transport, freight, light commercial vehicle {RoW} market for transport, freight, light commercial vehicle Cut-off, U
Óleo diesel	vide observação		Consumo de óleo diesel conforme especificação do fabricante. Quantidade de óleo diesel depende de duas variáveis: Consumo de combustível em Km/litro e da distância de transporte entre a fábrica e os locais de destinação dos resíduos sólidos gerados durante os processos de fabricação da estrutura metálica.		
Queima de óleo diesel	vide observação		Emissões com base na queima de óleo diesel, a partir do ECOINVENT do SIMAPRO		

Tabela 7 - ICV, Módulo A3.

Fonte: Autor

Módulo	Insumo	Quantidade	Unidade	Observação	Processo ECOINVENT
MÓDULO C1 DECONSTRUÇÃO ESTRUTURA METÁLICA	Desconstrução /demolição	34.396	MJ	Coefficiente de demolição para reciclagem de estrutura metálica = 0,239 MJ/Kg (143.915Kg x 0,239MJ/Kg), obtido de um estudo do Athena Institute.	Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U
	emissões	vide observação		Conforme o ECOINVENT para demolição de estrutura metálica (energia consumida)	
MÓDULO C2 TRANSPORTE RESÍDUOS ESTRUTURA METÁLICA	Transporte resíduos estrutura metálica demolida/desconstruída	2.878	tkm	Carreta de 12 metros (conforme fabrica) com capacidade de carga de 20 toneladas. Em todo caso, já há a previsão no ECOINVENT (vide considerações). Distância Média de Transporte adotada de 100Km, considerado percurso de ida e volta conforme report do ECOINVENT Taxa de resíduos metálicos transportados de 10% (14.392kg)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U
	Óleo diesel	vide observação		Consumo de óleo diesel conforme especificação do fabricante. Quantidade de óleo diesel depende de duas variáveis: Consumo de combustível em Km/litro e da distância de transporte entre a aciaria (sítio do pavilhão industrial) e o aterro para onde serão enviados os resíduos.	
	Queima de óleo diesel	vide observação		Emissões com base na queima de óleo diesel, a partir do ECOINVENT do SIMAPRO	
MÓDULO C4 DISPOSIÇÃO RESÍDUOS METÁLICOS EM ATERRO	Disposição resíduos estrutura metálica demolida/desconstruída em aterro	14.392	kg	Disposição final de resíduos, conforme cenário de fim de vida proposto com 90% reciclado e 10% inaproveitáveis, enviados para aterro.	Scrap steel {RoW} treatment of, inert material landfill Cut-off, U
	Emissões	vide observação		Conforme ECOINVENT	
MÓDULO D BENEFÍCIOS E CARGAS AMBIENTAIS DA RECICLAGEM/REUTILIZAÇÃO	Aço (minério de ferro)	136.780	Kg	Volume de produção de aço evitada pela rota primária (a partir do minério de ferro), sendo constituído de 90% de aço reciclado no momento de desconstrução da estrutura metálica mais as rebarbas de aço resultantes da fabricação desta estrutura metálica.	Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U
	Emissões	vide observação		Conforme ECOINVENT	

Tabela 8 - ICV, Módulos C1 a C4 e D.

Fonte: Autor

Os resultados dos impactos ambientais avaliados e da Energia Primária Demandada (EPD) totais e por Unidade Declarada adotada neste trabalho, conforme preconizado pela EN 15804, por modulo da ACV, são apresentados nas Tabelas 9, 10, 11 e 12.

Categoria de impacto	Unidade	A1	A2	A3	C1	C2	C4	D
Depleção abiótica	kg Sb eq	1,10E+00	2,42E-02	1,77E+00	4,83E-03	1,31E-02	6,94E-04	-1,39E+00
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ	1,23E+06	1,35E+04	5,35E+05	4,31E+04	7,33E+03	2,10E+03	-1,70E+06
Potencial de Aquecimento Global (100a)	kg CO ₂ eq	9,52E+04	9,09E+02	5,27E+04	3,11E+03	4,94E+02	7,42E+01	-1,81E+05
Depleção camada de ozônio	kg CFC-11 eq	7,49E-03	1,60E-04	3,31E-03	5,40E-04	8,71E-05	2,48E-05	-9,33E-03
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	2,85E+01	1,42E-01	2,51E+01	5,22E-01	7,72E-02	2,28E-02	-1,42E+02
Acidificação	kg SO ₂ eq	4,13E+02	4,62E+00	2,76E+02	2,35E+01	2,51E+00	5,44E-01	-6,92E+02
Eutrofização	kg PO ₄ eq	2,28E+02	1,12E+00	1,01E+02	5,48E+00	6,07E-01	1,19E-01	-3,83E+02

Tabela 9 - Resultados do ciclo de vida da estrutura metálica por categoria de impacto ambiental e por módulo da ACV proposta

Fonte: Autor

Categoria de impacto	Unidade	A1	A2	A3	C1	C2	C4	D
Depleção abiótica	kg Sb eq/kg	7,62E-06	1,68E-07	1,23E-05	3,36E-08	9,13E-08	4,82E-09	-9,68E-06
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ/kg	8,53E+00	9,36E-02	3,72E+00	2,99E-01	5,09E-02	1,46E-02	-1,18E+01
Potencial de Aquecimento Global (100a)	kg CO ₂ eq/kg	6,61E-01	6,32E-03	3,66E-01	2,16E-02	3,43E-03	5,15E-04	-1,26E+00
Depleção camada de ozônio	kg CFC-11 eq/kg	5,20E-08	1,11E-09	2,30E-08	3,75E-09	6,05E-10	1,72E-10	-6,48E-08
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq/kg	1,98E-04	9,87E-07	1,75E-04	3,63E-06	5,36E-07	1,58E-07	-9,90E-04
Acidificação	kg SO ₂ eq/kg	2,87E-03	3,21E-05	1,92E-03	1,63E-04	1,74E-05	3,78E-06	-4,81E-03
Eutrofização	kg PO ₄ eq/kg	1,59E-03	7,76E-06	7,03E-04	3,81E-05	4,22E-06	8,24E-07	-2,66E-03

Tabela 10 - Resultados do ciclo de vida da unidade declarada (kg da estrutura metálica) por categoria de impacto ambiental e por módulo da ACV proposta.

Fonte: Autor

Energia	Unidade	A1	A2	A3	C1	C2	C4	D
EPD total	MJ	1,59E+06	1,54E+04	8,86E+05	4,69E+04	7,96E+03	2,27E+03	-1,76E+06
EPD não renovável	MJ	1,46E+06	1,52E+04	6,23E+05	4,66E+04	7,88E+03	2,25E+03	-1,72E+06
EPD renovável	MJ	1,31E+05	1,59E+02	2,63E+05	2,38E+02	8,23E+01	1,71E+01	-3,76E+04

Tabela 11 - Resultados do ciclo de vida da estrutura metálica por tipo de energia primária demandada e por módulo da ACV proposta

Fonte: Autor

Energia	Unidade	A1	A2	A3	C1	C2	C4	D
EPD total	MJ/kg	1,11E+01	1,07E-01	6,16E+00	3,26E-01	5,53E-02	1,58E-02	-1,22E+01
EPD não renovável	MJ/kg	1,02E+01	1,06E-01	4,33E+00	3,24E-01	5,48E-02	1,56E-02	-1,19E+01
EPD renovável	MJ/kg	9,07E-01	1,11E-03	1,83E+00	1,65E-03	5,72E-04	1,19E-04	-2,61E-01

Tabela 12 - Resultados do ciclo de vida da unidade declarada (kg da estrutura metálica) por tipo de energia primária demandada e por módulo da ACV proposta.

Fonte: Autor

5.1 – Análise dos resultados obtidos

Os resultados que descrevem os impactos ambientais estão representados na Figura 8, mostrando o desempenho ambiental do ciclo de vida da estrutura metálica avaliada. Com base nesse gráfico, pode-se concluir que os módulos A1 (aciaria) e A3 (fábrica de estruturas metálicas) são preponderantes em todas as categorias de impacto ambiental avaliadas, uma vez que o uso de materiais, energia consumida e emissões geradas é intensivo nestes módulos, constituindo-se na fonte principal dos supramencionados recursos ao longo do ciclo de vida da estrutura metálica avaliada, tendo os demais módulos uma contribuição pouco expressiva, no cômputo geral.

Pelo fato do gráfico apresentado na Figura 8 ser expresso em valores relativos, ou seja, em percentuais, este gráfico é válido tanto para os resultados apresentados na Tabela 9 como para os resultados apresentados na Tabela 10.

Entretanto, devido ao enorme potencial de reciclagem do aço, reconhecido pela comunidade científica internacional, o módulo D apresenta uma contribuição para a mitigação dos impactos ambientais bem expressiva, pelo fato de evitar a necessidade de extração de matérias-primas virgens, beneficiamento e logística de transporte (jazidas de Carajás localizam-se na região Norte do Brasil enquanto as principais siderúrgicas localizam-se nas regiões Sul e Sudeste do Brasil) (IBRAM, 2014) e também pela energia consumida e emissões de CO₂, na produção de aço na usina siderúrgica, aproximadamente três vezes maior pela rota primária (minério de ferro) do que pela rota secundária (sucata ferrosa reciclada), conforme já mencionado na revisão bibliográfica deste trabalho.

Esta importância se traduz pelo fato de todas as categorias de impacto ambiental avaliadas neste trabalho, terem seus impactos mitigados de forma expressiva pelos benefícios ambientais líquidos decorrentes do elevado potencial de reciclagem da sucata ferrosa.

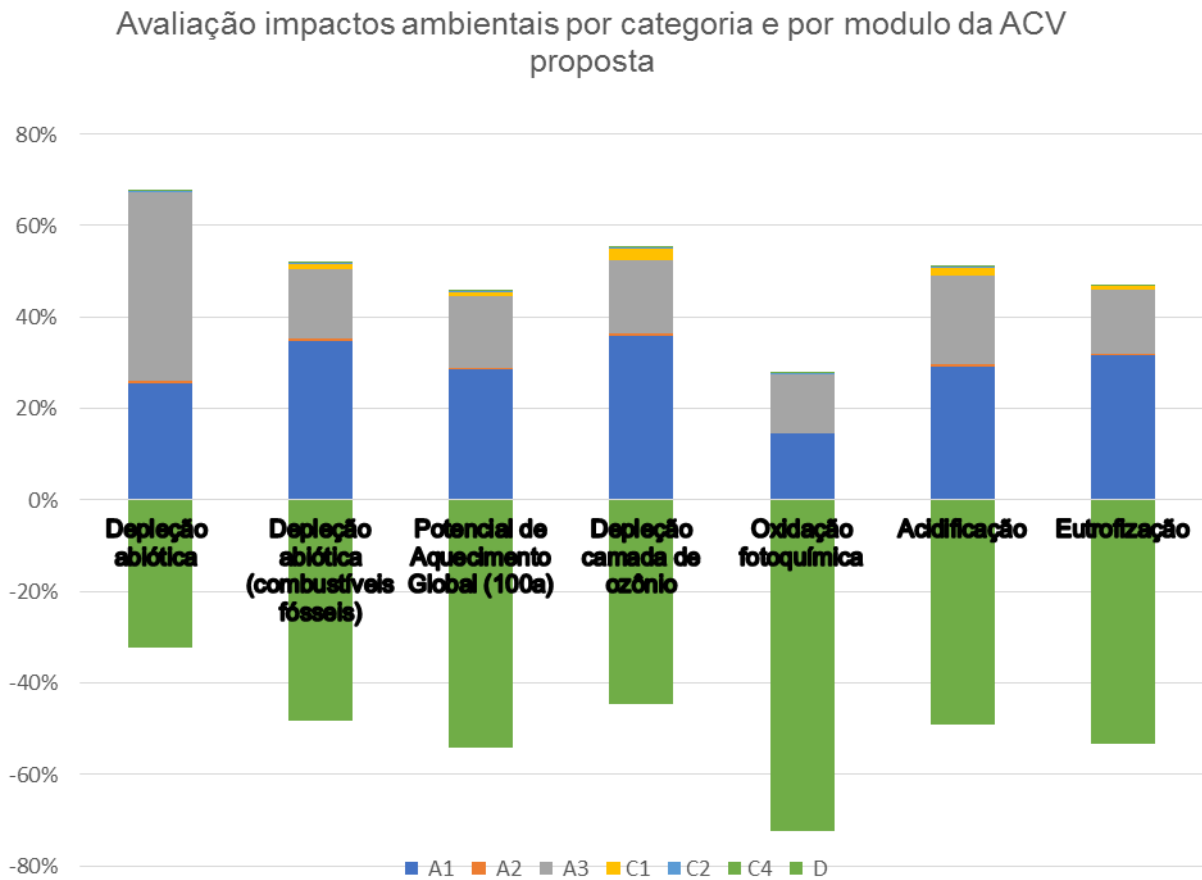


Figura 8 - Contribuição dos módulos nas categorias de impactos ambientais da ACV proposta

Fonte: Autor

As Figuras 9 e 10 mostram a contribuição de cada módulo da ACV proposta, respectivamente, no Potencial de Aquecimento Global e na Energia Primária Demandada Total.

Cumprе destacar que o módulo A1 refere-se à rota secundária de produção do aço e o módulo D refere-se ao benefício ambiental líquido causado pela reciclagem da sucata, o qual será abordado e discutido no item 5.1.1 deste capítulo.

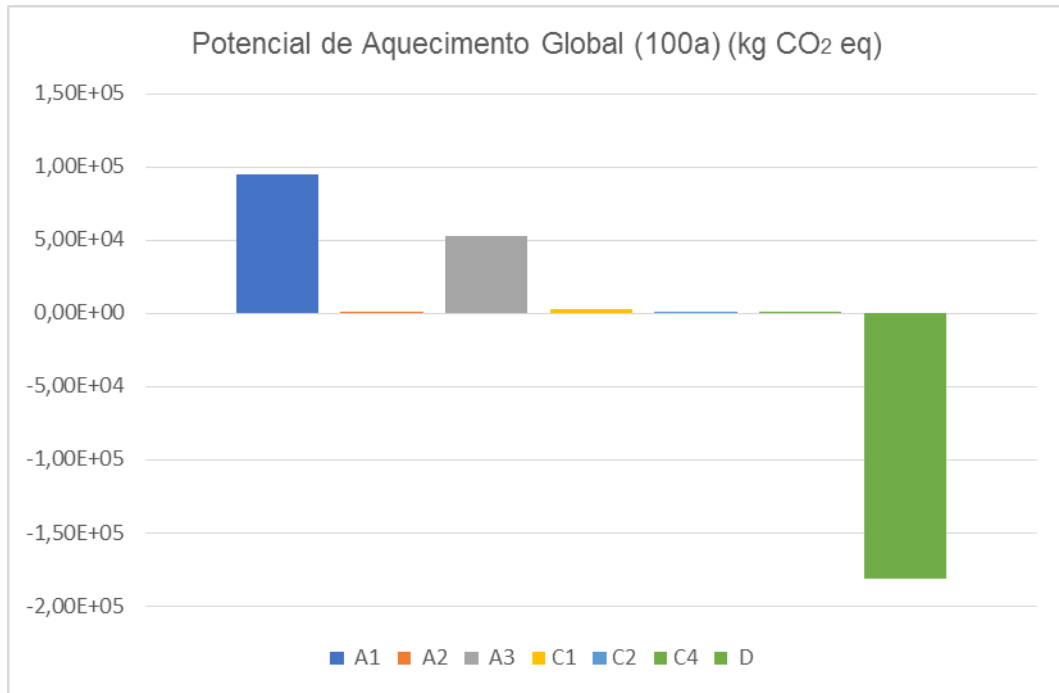


Figura 9 - Contribuição dos módulos da ACV proposta no Potencial de Aquecimento Global
Fonte: Autor

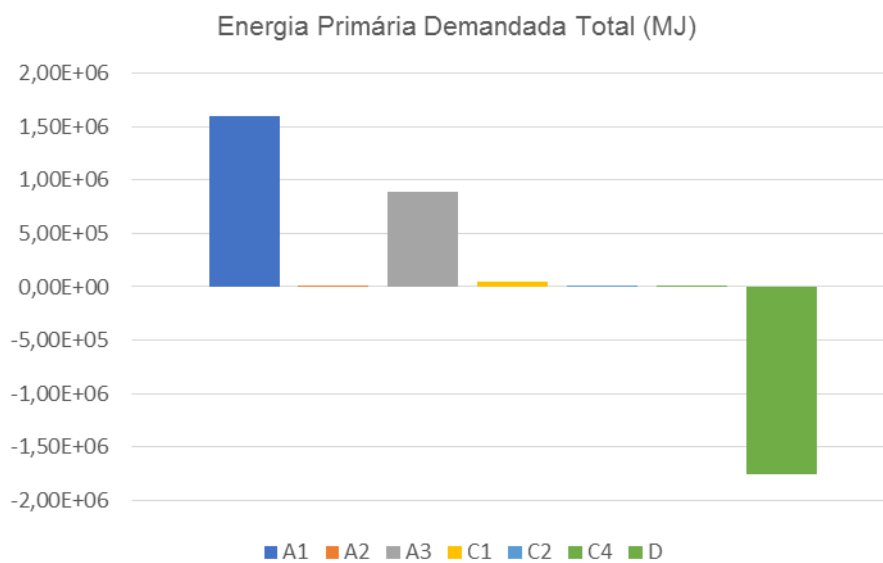


Figura 10 - Contribuição dos módulos da ACV proposta na Energia Primária Demandada Total
Fonte: Autor

A Figura 9 evidencia o grande benefício ambiental da reciclagem da sucata ferrosa ao mitigar de forma expressiva o impacto ambiental decorrentes das emissões de CO₂, devidas principalmente aos módulos A1 (aciaria) e A3 (fábrica de

estruturas metálicas), sendo que todos os demais módulos têm uma participação inexpressiva nestas emissões.

A Figura 10 demonstra a expressiva redução no consumo de energia ao ser utilizada a rota secundária (reciclagem de sucata ferrosa) em comparação com a rota primária (minério de ferro), além de confirmar a relevância dos módulos A1 e A3 da Etapa de Produto em relação a todos os demais módulos, os quais tem uma participação inexpressiva na energia primária demandada total da ACV proposta.

5.1.1. Determinação do Benefício Ambiental Líquido (Módulo D), segundo a EN 15804.

Conforme prescrito pela EN 15804, em relação ao cálculo dos benefícios e cargas ambientais causadas pela utilização de materiais e combustíveis secundários, evitando dessa maneira a utilização de materiais e combustíveis primários no ciclo de vida de um produto da construção civil, este cálculo leva em conta os impactos ambientais devido às duas alternativas de produção.

No caso deste trabalho de pesquisa científica, consoante o objetivo específico nele contido, ao ser adotada a produção pela rota secundária (reciclagem da sucata ferrosa), foi evitada a produção pela rota primária (minério de ferro).

Levando-se em conta as cargas ambientais relacionadas a cada uma dessas rotas de produção do aço, o procedimento de cálculo consiste em, atribuindo-se a carga ambiental à rota de produção adotada, subtrai-se desta a carga ambiental da produção evitada, resultando no benefício ambiental líquido (Módulo D).

A Tabela 13 faz a demonstração do cálculo do benefício ambiental líquido para as emissões de CO₂, conforme o que está prescrito na norma EN 15804.

Categoria de Impacto	Unidade	Rota Secundária	Rota Primária	Benefício Ambiental Líquido (Módulo D)
Potencial de Aquecimento Global (100a)	kg CO ₂ eq	9,52E+04	2,76E+05	-1,81E+05

Tabela 13 - Demonstração do Benefício Ambiental Líquido das emissões de CO₂ (Modulo D)

Fonte: Autor

O sinal negativo no valor do Benefício Ambiental Líquido indica o volume de emissões de CO₂ que foi evitado de ser lançado à atmosfera, ao ser adotada a rota secundária de produção do aço (reciclagem da sucata ferrosa), ao invés da adoção da rota primária (a partir do minério de ferro), demonstrando que a reciclagem da sucata ferrosa mitiga de forma expressiva as emissões de CO₂ quando comparada com a produção de aço a partir de minério de ferro.

Analogamente, para a energia primária demandada total, o procedimento de cálculo é o mesmo pela subtração entre a energia primária demandada total da rota de produção adotada e a energia primária demandada total da rota de produção evitada, resultando, deste modo na quantidade de energia poupada pelo sistema produtivo.

A Tabela 14 faz a demonstração do cálculo do benefício ambiental líquido para a Energia Primária Demandada total, conforme o que está prescrito na norma EN 15804.

Energia	Unidade	Rota Secundária	Rota Primária	Benefício Ambiental Líquido (Módulo D)
EPD total	MJ	1,59E+06	3,35E+06	-1,76E+06

Tabela 14 - Demonstração do Benefício Ambiental Líquido da EPD total (Módulo D)

Fonte: Autor

O sinal negativo no valor do Benefício Ambiental Líquido indica a quantidade de energia primária demandada total que foi poupada ao ser adotada a rota secundária de produção do aço (reciclagem da sucata ferrosa), ao invés da adoção da rota primária (a partir do minério de ferro), demonstrando que a reciclagem da

sucata ferrosa é mais econômica em termos de consumo de energia quando comparada com a produção de aço a partir de minério de ferro.

5.1.2. Análise comparativa da modelagem no SimaPro com achados da literatura científica internacional

A Tabela 15 abaixo faz um comparativo das emissões de CO₂ (ton. CO₂-eq por ton. de aço produzida), seja pela rota primária (minério de ferro), seja pela rota secundária (sucata ferrosa) de produção de aço em usina siderúrgica, a partir dos resultados obtidos na modelagem da ACV no SimaPro e achados da literatura científica internacional.

	Rota de Produção	
Categoria	Secundária	Primária
Resultados Trabalho	0,6295	2,0200
Literatura	0,6000	2,1000

Tabela 15 - Comparativo Emissões CO₂ (ton. CO₂-eq/TCS).

Fonte: Autor

A partir da análise desta tabela, pode-se concluir que os resultados obtidos da modelagem da ACV no SimaPro, assim como os achados da literatura científica internacional (Ramadan e Sash, 2015; Yellishetty et al., 2011; Andrade et al., 2016) convergem para a mesma ordem de grandeza de valores, o que confirma a adequação dos resultados obtidos da modelagem realizada no SimaPro da ACV proposta neste trabalho científico.

A Tabela 16 apresenta valores da Energia Primária Demandada Total, em GJ/TCS, seja pela rota primária (minério de ferro), seja pela rota secundária (sucata ferrosa) de produção de aço em usina siderúrgica, a partir dos resultados obtidos na modelagem da ACV no SimaPro, para fins de comparação com achados da literatura científica internacional.

Categoria	Rota de Produção	
	Secundária	Primária
Resultados Trabalho	10,5	24,5
Literatura	9 - 12,5	28 - 31

Tabela 16 – Valores Energia Primária Demandada Total (GJ/TCS)

Fonte: Autor

Segundo Taha et al., (2016), a produção de aço pela rota primária (minério de ferro) consome cerca de 2,5 vezes mais energia do que a produção de aço pela rota secundária (sucata ferrosa), além das faixas de valores constantes do mesmo estudo. A divergência entre os resultados do trabalho e da literatura na rota primária ocorre porque, nos resultados do trabalho, a produção de aço que é evitada através da rota primária não corresponde à mesma produção que ocorre na rota secundária, pois, uma parte do aço não é reciclada, sendo enviada para aterro.

Com base nos resultados obtidos e sua interpretação mostrados neste capítulo, são apresentados no próximo capítulo um sumário de conclusões e recomendações, assim como a proposição de trabalhos futuros referentes à Avaliação do Ciclo de Vida de estruturas metálicas.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho de pesquisa científica constituiu-se na aplicação da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida baseado em um estudo de caso da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada com sucata ferrosa reciclada, tendo como objetivo específico fazer uma análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica.

Os principais resultados obtidos, baseados no estudo de caso proposto neste trabalho, dizem respeito aos seguintes indicadores de desempenho ambiental em termos de benefício ambiental líquido (modulo D):

- a) Potencial de Aquecimento Global, no valor total de $-1,81 \times 10^5$ kg CO₂ eq, cujo sinal negativo indica que este montante corresponde ao total de emissões que foram evitadas de serem lançadas à atmosfera pela adoção da rota secundária (reciclagem da sucata ferrosa) ao invés da rota primária (minério de ferro), na produção de aço em uma usina siderúrgica;
- b) Energia Primária Demandada Total, no valor global de $-1,76 \times 10^6$ MJ, cujo sinal negativo indica que este montante corresponde ao total da energia que foi poupada pela adoção da rota secundária (reciclagem da sucata ferrosa) ao invés da rota primária (minério de ferro), na produção de aço em uma usina siderúrgica.

Por outro lado, a partir de dados primários fornecidos pela empresa responsável pelo projeto, fabricação e montagem da estrutura metálica objeto do estudo de caso deste trabalho, foi possível a elaboração de um dataset que pudesse

refletir a fabricação de uma tonelada de peças estruturais metálicas, conforme o que está descrito e caracterizado no Modulo A3, constante da Tabela 7 deste trabalho.

Como principal limitação deste trabalho, a ausência de datasets brasileiros para produção de aço em uma usina siderúrgica pelas rotas primária e secundária, obrigou à adoção de datasets globais, os quais refletem uma média mundial, a qual não condiz com a realidade brasileira, em termos de matriz energética, por exemplo, o que pode ter acarretado distorções nos resultados obtidos.

Por esta razão, no Capítulo 7 – Proposição de trabalhos futuros sugere-se a realização de estudos com vistas à elaboração de datasets para a produção de aço pelas rotas primária e secundária em uma usina siderúrgica, que reflitam a realidade brasileira.

Finalmente, com base na revisão bibliográfica, metodologia aplicada e resultados obtidos apresentados neste trabalho, pode-se concluir que, ao se comparar os impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica, os benefícios ambientais pela adoção da rota secundária (reciclagem da sucata ferrosa), além de evitar novas extrações de minério de ferro e o beneficiamento deste, com o consequente exaurimento de recursos naturais e os impactos ambientais associados a esta cadeia produtiva (extração e beneficiamento do minério de ferro), mitiga consideravelmente os impactos ambientais, quando comparada esta rota com a rota primária da produção de aço em uma usina siderúrgica, principalmente os indicadores ambientais de Potencial de Aquecimento Global e Energia Primária Demandada Total, cujos benefícios ambientais líquidos foram avaliados neste trabalho.

7. PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Em função das limitações ocorridas neste trabalho, sugere-se a realização de estudos e pesquisas, com vistas à elaboração de datasets que reflitam a realidade brasileira no que concerne à produção siderúrgica, seja pela rota primária (minério de ferro), seja pela rota secundária (reciclagem de sucata ferrosa).

Como proposição de trabalhos futuros sobre ACV de estruturas metálicas, sugere-se a realização de estudos sobre a análise de sensibilidade do sistema em relação ao grau de incorporação de aço produzido pela rota primária (minério de ferro), na estrutura metálica e a análise de incerteza dos diferentes cenários propostos da composição de aço (sucata ferrosa/minério de ferro) para a mesma estrutura metálica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AbouHamad, M., Abu-Hamd, M., 2019. "Framework for construction system selection based on life cycle cost and sustainability assessment." *Journal of Cleaner Production* 241 (2019) 118397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118397>.
2. Andrade, J. B., Bragança, L. and Camões, A. Steel sustainability assessment – Do BSA tools really assess steel properties? *JCSR*, vol. 120, pp. 106-116, 2016.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
4. Athena Sustainable Materials Institute, Demolition Energy Analysis of Office Building Systems, Ontario, 1997.
5. Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammapi, R. and Mendis, P. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 159-168, 2012.
6. Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M. and Fischer, M. 2013. "Application of Life-Cycle Assessment to Early Stage Building Design for Reduced Embodied Environmental Impacts." *Building and Environment* 60: 81-92. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>.
7. Baumann, H.: Introduction and organization of LCA activities in industry. *Int. J. Life Cycle Assess.* 5, 363–368 (2000). doi:10.1007/BF02978673.
8. Bjorn, A., Owsianiak, M., Molin, C. and Laurent, A. Main Characteristics of LCA, Chapter 2. *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, Stig Irving Olsen. Springer, 2018.

9. Blengini, G. A. 2009. "Life Cycle of Buildings, Demolition and Recycling Potential: A Case Study in Turin, Italy." *Building and Environment* 44 (2): 319-330. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.007>.
10. Bragança, I., Mateus, R. and Koukkari, H. 2007. "Perspectives of Building Sustainability Assessment." In *Portugal SB07 – Sustainable Construction, Materials and Practices*, edited by L. Bragança, M. D. Pinheiro, S. Jalali, R. Mateus, R. Amôeda, and M. C. Guedes, 356-365. Amsterdam: IOS Press.
11. Broadbent, C. Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. 2016. *Int J Life Cycle Assess* (2016) 21: 1658-1665. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1081-1>.
12. Brundtland GH. Our common future. *Earth Us* 1991: 29-31. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-1049-0.50009-5>.
13. Bültmann, A.: Produktökobilanzen und ihre Anwendung in Deutschen Unternehmen. Schriftenreihe des IÖW. 112, 97 (1997).
14. Burgan, B. A. and Sansom, M. R. Sustainable steel construction, vol. 62, pp. 1178-1183, 2006.
15. CEN (European Committee for Standardization). 2012b. European Standard EN 15804: Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
16. CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA). Benite, Anderson; Taniguti, Eliana; Gonzalez, Pedro Manual da sustentabilidade da construção em aço / Anderson Benite, Eliana Taniguti, Pedro Gonzalez, Silvia Scalzo Cardoso [revisora]. - 1.Ed. - Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil: CBCA, 2019. 84 p.
17. CHEHEBE, José R. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. 2ª [Rio de Janeiro]: Qualitymark Ed., CNI, 2002. 120 p.
18. Cho, Y. S., Kim, J. H., Hong, S. U., Kim, Y. 2012. "LCA application in the optimum design of high-rise steel structures." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012): 3146-3153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.076>.
19. Chubbs, S. T., and Steiner, B. A. 1998. "Life Cycle Assessment in the Steel Industry." *Environmental Progress* 17 (2): 92-95. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/ep670170215>.

20. Cooper, J. S., Fava, J.: Life cycle assessment practitioner survey: Summary of results. *J. Ind. Ecol.* (2006).
21. Crosthwaite D. The global construction market: a cross-sectional analysis. *Construct Manag Econ* 2000; 18:619-27. <https://doi.org/10.1080/014461900407428>.
22. Ekvall, T.: Life cycle assessment. In: Ahmed K (ed) *Getting to green: a sourcebook of pollution management policy tools for growth and competitiveness.* World Bank, Washington, DC. <http://documents.worldbank.org/curated/en/560021468330349857/Getting-to-green-a-sourcebook-of-pollution-management-policy-tools-for-growth-and-competitiveness> (2012)
23. Ellen MacArthur Foundation, 2013. *Towards the Circular Economy*, vol.1. Ellen MacArthur Foundation. Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf?>
24. Frankl, P., Rubik, F.: Life cycle assessment in industry and business. Adoption patterns, applications and implications. In: *IGARSS 2014* (2000). doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
25. Gervasio, H. and Dimova, S., *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*, EUR 29123 EN, Publications Office of the European Union, 2018, ISBN 978-92-79-79973-0, doi: 10.2760/10016, JRC110082.
26. Goedkoop M., De Schryver, A., Oele, M., Durksz, S.: *Introduction to LCA with SimaPro 7. Product ecology consultants.* [http://www.pre.nl/content/manuals\(2010\)](http://www.pre.nl/content/manuals(2010)).
27. Grant, A. and Ries, R. 2013. "Impact of Building Service Life Models on Life Cycle Assessment." *Building Research & Information* 41 (2): 168-186. <http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2012.730735>.
28. Haapio A. 2010. "The Role of Environmental Assessment of Buildings." *Proceedings of the International Symposium 'Sustainable Construction – A Life Cycle Approach in Engineering' of the COST Action C25 Sustainability of Constructions Integrated Approach to Life-time Structural Engineering*, Malta, July 23-25, 17-24.
29. Hanssen, O.J.: Status of life cycle assessment (LCA) activities in the nordic region. *Int. J. Life Cycle Assess.* 4, 262–262 (1999). doi:10.1007/BF02979177

30. Hauschild, M.Z.; Introduction to LCA Methodology, Chapter 6. Life Cycle Assessment. Theory and Practice. Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, Stig Irving Olsen. Springer, 2018.
31. Heiskanen, E.: Managers' interpretations of LCA: enlightenment and responsibility or confusion and denial? *Bus. Strateg. Environ.* 9, 239–254(2000). doi:10.1002/1099-0836(200007/08)9: 43.0.CO;2-6
32. Hites, B. E. 2020. The Growth of EAF Steelmaking-Recycling Today. <https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking/>.
33. Hoxha, E., Habert, G., Chevalier, J., Bazzana, M. and Le Roy, R. 2014. "Method to Analyze the Contribution of Material's Sensitivity in Buildings Environmental Impact" *Journal of Cleaner Production* 66 (1): 54-64. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.056>.
34. Huang, E., Hunkeler, D.: Life cycle analysis: summary of a fortune 500 survey and a Japanese comparison. In: Vanderbilt Univ. US–Japan Cent (1995).
35. Hunt, R.G., Sellers, J.D., Franklin, W.E.: Resource and environmental profile analysis: a life cycle environmental assessment for products and procedures. *Environ. Impact Assess. Rev.* 12(12), 245–269 (1992).
36. Instituto Aço Brasil. Sucata e a Indústria Brasileira do Aço. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/amp/340838/>
37. Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). II Inventário de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral. Brasília. 2014. 110 p. Disponível em www.ibram.org.br.
38. Intini, F. and Kühtz, S. 2011. "Recycling in Buildings: An LCA Case Study of a Thermal Insulation Panel Made of Polyester Fiber, Recycled from Post-Consumer PET Bottles." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (4): 306-315. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0267-9>.
39. JOHN, V.M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ed. ISAIA, G. Materiais de construção civil e princípios de ciência aplicada e engenharia de materiais. Ibracon, 2017. Cap. 4. Disponível em: <<http://ppgec.poli.usp.br/wp-content/uploads/sites/277/2017/05/VMJOHN-Materiais-e-o-meio-ambiente-2017-09-30-1.pdf>>
40. Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K. and Bruno, F. 2014. "Minimising the Life Cycle Energy of Buildings: Review and Analysis." *Building and Environment* 73: 106-114. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.019>.

41. Kaziolas, D. N., Zygomalas, I., Stavroulakis, G. E., Baniotopoulos, C. C. 2015. "Aspects of a steel-framed building's life cycle that influence its environmental sustainability." *Lifecycle of Structural Systems*.
42. Kim, R.-H., Tae, S.-H., Yang, K.-H., Kim, T.-H. and Roh, S.-J. 2014. "Analysis of Lifecycle CO2 Reduction Performance for Long-Life Apartment House." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 34 (2): 555-566. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/ep.12032>.
43. Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127 (December), 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
44. König, H., and De Cristofaro, M. L. 2012. "Benchmarks for Life Cycle Costs and Life Cycle Assessment of Residential Buildings." *Building Research & Information* 40 (5): 558-580. <http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2012.70.2017>.
45. Love, P. E. D., D., Edwards, J. and Smith, J. 2013. "Systemic Life Cycle Design Error Reduction Model for Construction and Engineering Projects." *Structure and Infrastructure Engineering* 9 (7): 689-701. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2011.606276>.
46. Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S. and Dotelli, G. 2014. "Environmental Impacts of Natural and Conventional Building Materials: A Case Study on Earth Plasters." *Journal of Cleaner Production* 80 (1): 179-186. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>.
47. Johanson, N., Krook, J., Eklund, M. and Berglund, B. An integrated review of concepts and initiatives for mining the technosphere: towards a new taxonomy, 2013, *Journal of Cleaner Production*, (55), 35-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.007>.
48. Ochoa, J. J. 2014. "Reducing Plan Variations in Delivering Sustainable Building Projects." *Journal of Cleaner Production* 85 (15): 276-288. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.024>.
49. OMETTO, A. R. Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia. 2005. 209 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo [São Carlos], 2005.

50. Passer, A., Wall, J., Kreiner, H., Maydl, P. and Höfler, K. 2015. "Sustainable Buildings, Construction, Products and Technologies: Linking Research and Construction Practice." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (1): 1-8. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-014-0820-4>.
51. Pinheiro, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos – São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
52. Ramadan, A; Shash, A. Y. Effect of Tempcore Processing on Mitigating Problems of Tramp Elements in Low C steel produced Recycled Material, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(7).
53. Ramesh, T., Prakash R., Shukla, K.K. <Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.* 42, 1592-1600 (2010).
54. Rios, F. C., Grau, D., Chong, W. K., 2019. "Reusing exterior wall framing systems: A cradle-to-cradle comparative life cycle assessment. *Waste Management* 94 (2019): 120-135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.0400956-053X/>
55. Rosado, L. P., Vitale, P., Penteado, C. S. G., Arena, U. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. 2019. *Waste Management* 85 (2019), 477-489. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011>.
56. Rossi, B., 2014. "Discussion on the use of stainless steel in construction in view of sustainability." *Thin-Walled Structures* 83 (2014), 182-189. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.021>.
57. Sameer, H. and Bringezu, S. Life cycle input indicators of material resource use for enhancing sustainability assessment schemes of buildings. 2019. *Journal of Building Engineering*, Volume 21, January 2019, Pages 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.010>.
58. Sarkisian, M. P. 2014. "Design of Environmentally Responsible Structures in Regions of High Seismic Risk." *Structure and Infrastructure Engineering* 10 (7): 849-864. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.761249>.
59. SCI, 2012. Steel Construction Info. https://www.steelconstruction.info/The_recycling_and_reuse_survey.
60. Sörlin S. and Warde P. (2009). Making the environment historical-An introduction. In: Sörlin, S and Warde P (eds) *Nature's End: History and the Environment*. London: Palgrave MacMillan, pp. 1-19.

61. STEEL CONSTRUCTION (Reino Unido). Steel and the circular economy. 2018. Disponível em: https://www.steelconstruction.info/Steel_and_the_circular_economy
62. Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig, C (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. The Anthropocene Review 2015, Vol 2 (1) 81-98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>.
63. Steffen W, Sanderson A, Tyson PD et al. (2004) Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure. The IGBP Book Series. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 336 pp.
64. Taha, S. H., Ibrahim, M. G. & Ahmed AbdelMonteleb M. Ali. 2016. "Steel as a sustainable choice towards the green building concept." WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 210. www.witpress.com, ISSN 1743-3541 (on-line). doi:10.2495/SDP160111.
65. Tatari O, Kucukvar M. Eco-efficiency of construction materials: data envelopment analysis. J. Construct Eng Manag 2012a; 138: 733-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000484](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000484).
66. Tatari O, Kucukvar M. Sustainability assessment of U.S. Construction sectors: ecosystems perspective. J Construct Eng Manag 2012b; 138: 918-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000509).
67. Torres de Souza, J. F., Pacca, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. 2021. Resources, Conservation & Recycling 169 (2021) 105517. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>.
68. Tour Eiffel. Disponível em: www.wikipedia.fr
69. United Nations 2015. Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>.
70. Zygomalas, I., Kaziolas, D., Stavroulakis, G. & Baniotopoulos, C. (2016). Quantification of the influence of life cycle parameters on the total environmental impact of steel-framed buildings. Journal of Sustainable Engineering, 9:5, 329-337. <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1178354>.

71. WSA (World Steel Association), 2018. Fact sheet-Steel and raw materials. https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449f-b42c-b220952767bf/fact_raw+materials_2018.pdf.
72. WSA (World Steel Association), 2019. Fact sheet-Steel and raw materials. https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449f-b42c-b220952767bf/fact_raw%2520materials_2019.pdf.
73. Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P. G. and Tharumarajah, A. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects, Environ. Sci. Policy, vol. 14, no. 6, pp. 650-663, 2011.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br