



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA
UTILIZAÇÃO DE SUCATA METÁLICA EM INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Gabriella Gontijo Lopes Ferreira

Belo Horizonte

2021

Gabriella Gontijo Lopes Ferreira

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA
UTILIZAÇÃO DE SUCATA METÁLICA EM INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dsc. Daniel Brianezi

Belo Horizonte

2021

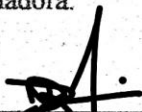
GABRIELLA GONTIJO LOPES FERREIRA

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA
UTILIZAÇÃO DE SUCATA METÁLICA NA SIDERURGIA**

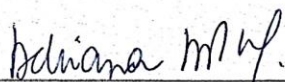
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 03 de setembro de 2021

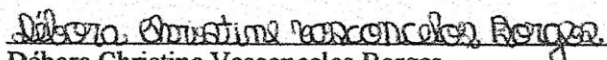
Banca examinadora:



Daniel Brianezi – Presidente da Banca Examinadora
Prof. DSc. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador(a)



Adriana Alves Pereira Wilken
Prof. DSc. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Débora Christine Vasconcelos Borges
Eng. Ambiental e Sanitarista

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que me permitiu e me deu forças para chegar até aqui.

Agradeço a minha mãe por sempre me incentivar, acreditar no meu potencial, me apoiar e ser um exemplo para mim, com toda certeza foi essencial nessa conquista. Agradeço ao meu pai e a minha avó pelo apoio fornecido durante essa jornada.

Ao meu orientador Prof. Dsc. Daniel Brianezi, por toda a paciência, atenção e disponibilidade para me ajudar nesse trabalho.

Agradeço aos amigos que conquistei ao longo do curso, que colaboraram para que essa jornada fosse mais leve, cheia de aprendizados e diversão, em especial a Luciana, Rafa, Kênia e Giulia.

Agradeço a Débora por todo o apoio no desenvolvimento do trabalho e disponibilidade para me ajudar com as dúvidas, e também por ter aceito o convite de fazer parte da minha banca avaliadora. Agradeço também a Profa. Adriana pela orientação durante meu estágio supervisionado obrigatório e também por ter aceito o convite de participação da minha banca.

Agradeço por fim a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com esse caminho, seja oferecendo oportunidades de crescimento, compartilhando conhecimento, apoiando em momentos difíceis ou se fazendo presente.

RESUMO

FERREIRA, Gabriella Gontijo Lopes. **Avaliação dos benefícios econômicos e ambientais da utilização de sucata metálica em indústria siderúrgica**. 2021. 85f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

A economia circular é um modelo econômico de extrema relevância para o desenvolvimento das atividades econômicas em harmonia com o meio ambiente. O setor siderúrgico implementa esse modelo em suas rotas produtivas, na qual a rota integrada, que realiza os três principais processos siderúrgicos: redução, refino e laminação, e a rota semi-integrada que opera a partir do refino, utilizam a sucata de ferro e aço como um de seus principais insumos para o processo, embora os utilizem em proporções diferentes. Diante disso, o presente trabalho possui como objetivo geral avaliar os benefícios ambientais e econômicos da utilização da sucata metálica em indústrias siderúrgicas integrada e semi-integrada da região Sudeste. A metodologia utilizada consistiu na obtenção de dados primários junto à duas plantas e de dados secundários disponíveis na literatura referentes aos insumos utilizados na produção do ferro gusa e do aço bruto com enfoque na utilização de sucata metálica. Os benefícios ambientais e econômicos foram estimados com base em técnicas de valoração econômica ambiental e de análise de ciclo de vida para diferentes cenários para as duas usinas avaliadas. Foram propostos 8 cenários (6 para a usina integrada e 2 para a semi-integrada) variando os percentuais de sucata metálica. O uso da sucata trouxe vantagens econômicas e ambientais para ambas as usinas avaliadas (integrada e semi-integrada), sendo que foi observado que os benefícios foram maiores nos cenários que apresentaram maior porcentagem de sucata. O cenário mais favorável, que utiliza 100% de sucata, foi o que apresentou maiores ganhos econômicos e menores impactos ambientais, haja vista que não possui demanda de ferro gusa e, conseqüentemente, reduz o consumo de insumos primários e a geração de impactos ambientais devido a não utilização de ferro gusa. Além disso, a produção de minério de ferro é a principal fonte de impacto ambiental na produção do ferro gusa dentre os insumos avaliados para ambas as plantas. Conclui-se, portanto, que a utilização da sucata na carga metálica no refino primário deve ser incentivada.

Palavras-Chave: Resíduo metálico. Economia Circular. Valoração Econômica Ambiental. Impacto. Gases de Efeito Estufa.

ABSTRACT

FERREIRA, Gabriella Gontijo Lopes. **Evaluation of the economic and environmental benefits of using scrap metal in the steel industry**. 2021. 85f. Monograph (Graduate in Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

The circular economy is an economic model of extreme generation for the development of activities, protection in harmony with the environment. The steel industry implements this model in its production routes, in which the integrated route, which performs the three main steel processes: reduction, refining and rolling, and the semi-integrated route that operates from refining, uses iron and steel scrap as one of their main inputs to the process, although they use them in different proportions. Therefore, the present work has as general objective to evaluate the environmental benefits and economy of the use of metallic scrap in integrated and semi-integrated steel industries in the Southeast region. The methodology used consists of obtaining primary data from the two plants and secondary data available in the literature regarding the inputs used in the production of pig iron and crude steel with a focus on the use of metallic scrap. The environmental and economic benefits were estimated based on environmental economic valuation techniques and life cycle analysis for different scenarios for the two evaluated plants. Eight scenarios were proposed (6 for an integrated plant and 2 for a semi-integrated) varying the percentages of metallic scrap. The use of scrap brought environmental and benefits to both evaluated plants (integrated and semi-integrated), and it was observed that the benefits were greater in places with a lower percentage of scrap. The most favorable scenario, which uses 100% success, was the one that provided greater gains and less environmental impacts, given that it has no demand for pig iron and, consequently, reduces the consumption of primary inputs and the generation of environmental impacts due to no use of pig iron. In addition, the production of iron ore is the main source of environmental impact in the production of pig iron among the inputs obtained for both plants. Therefore, it is concluded that the use of scrap in the metallic load in primary refining should be encouraged.

Keywords: Metal residue. Circular Economy. Environmental Economic Valuation. Impact. Greenhouse gases.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Aço	16
3.2	Processo siderúrgico	17
<i>3.2.1</i>	<i>Processos exclusivos da Usina Integrada</i>	19
<i>3.2.1.1</i>	<i>Preparação das Matérias-Primas</i>	19
<i>3.2.1.2</i>	<i>Redução</i>	22
<i>3.2.1.3</i>	<i>Refino – Aciaria LD</i>	23
<i>3.2.2</i>	<i>Processos Exclusivos da Usina Semi-integrada</i>	25
<i>3.2.2.1</i>	<i>Preparação da sucata</i>	25
<i>3.2.2.2</i>	<i>Refino – Aciaria Elétrica</i>	26
<i>3.2.3</i>	<i>Lingotamento e Laminação</i>	27
3.3	Sucata de Ferro e Aço	27
<i>3.3.1</i>	<i>Utilização da sucata no processo siderúrgico</i>	27
<i>3.3.2</i>	<i>Tipos de sucata</i>	28
3.4	Economia Circular do Aço	30
3.5	Análise de Ciclo de Vida	33
3.6	Valoração Econômica Ambiental	34
4	METODOLOGIA	37
4.1	Delimitação do Estudo	37
4.2	Obtenção dos Dados Primários e Caracterização das Plantas	37
4.3	Estudos de Avaliação de Ciclo de Vida do Aço e Matérias-Primas	39
4.4	Avaliação da Utilização de Sucata nas Usinas	40
<i>4.4.1</i>	<i>Avaliação da utilização de sucata e cenários propostos para Usina A</i>	40
<i>4.4.2</i>	<i>Avaliação da utilização de sucata e cenários propostos para Usina B</i>	42
4.5	Valoração Econômica Ambiental	42

4.5.1	<i>Escolha do Método</i>	42
4.5.2	<i>Impactos Econômicos</i>	42
4.5.3	<i>Valoração econômica ambiental do carbono emitido</i>	43
4.6	Obtenção dos Insumos Primários Dispensados	45
4.7	Impactos Ambientais	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	Avaliação dos Dados das Usinas Estudadas	50
5.2	Avaliação da Utilização de Sucata nas Usinas e Cenários Propostos	51
5.2.1	<i>Avaliação da carga metálica utilizada na Usina A e cenários propostos</i>	51
5.2.2	<i>Avaliação da carga metálica utilizada na Usina B e cenários propostos</i>	53
5.3	Benefícios Gerados pelo Uso da Sucata	54
5.3.1	<i>Ganhos econômicos</i>	54
5.3.2	<i>Emissões evitadas de GEE</i>	57
5.3.3	<i>Redução na dependência dos insumos primários</i>	60
5.3.4	<i>Avaliação dos impactos ambientais dos insumos primários</i>	69
6	CONCLUSÕES	77
7	RECOMENDAÇÕES	79
8	REFERÊNCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.	18
Figura 3.2 - Fluxograma do processo de sinterização.	20
Figura 3.3 - Emissões diretas de CO ₂ de um Forno Elétrico a Arco.	26
Figura 3.4 - Sucata industrial: Cavaco de aço.	29
Figura 3.5 - Sucata de obsolescência: mista.	29
Figura 3.6 - Economia Linear e Circular.	31
Figura 3.7 - Produção mundial de aço e disponibilidade de sucata.	33
Figura 3.8 - Etapas de uma ACV.	34
Figura 3.9 - Fontes de valor do meio ambiente.	35
Figura 4.1 - Fluxograma dos processos da Usina A até a entrada da sucata.	38
Figura 4.2 - Fluxograma dos processos da Usina B até a entrada da sucata.	38
Figura 4.3 - Estudos de ACV de Aço da literatura utilizados.	40
Figura 4.4 - Principais processos ligados diretamente e indiretamente a etapa de redução da Usina A.	47
Figura 4.5 - Principais processos ligados diretamente e indiretamente a etapa de redução da Usina B.	48
Figura 5.1 - Custo evitado com a utilização de sucata em cada cenário avaliado em substituição ao ferro gusa, em R\$/t aço bruto.	56
Figura 5.2 - Avaliação do ICO ₂ da carga metálica total dos cenários avaliados e do custo evitado devido a utilização de sucata, em R\$/t aço bruto.	59
Figura 5.3 - Insumos primários necessários para a produção de ferro gusa para cada cenário avaliado.	64
Figura 5.4 - Consumo de insumos primários para a produção de ferro gusa em cada cenário avaliado.	66
Figura 5.5 - Insumos primários poupados nos cenários que fazem utilização de sucata em comparação aos cenários que fazem utilização de ferro gusa.	67
Figura 5.6 - Representatividade da obtenção dos insumos com relação aos impactos avaliados para os cenários da Usina A.	72
Figura 5.7 - Representatividade dos insumos com relação aos impactos avaliados para o cenário 4B.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Consumo per capita e produção de aço bruto no Brasil, América do Sul e no mundo.	16
Tabela 3.2 - Produção de aço bruto nos três estados com maior representatividade na produção de aço bruto, no ano de 2019.	17
Tabela 3.3 - Entradas e saídas do Alto-Forno na indústria siderúrgica integrada.	23
Tabela 3.4 - Fluxo de matéria da produção de uma tonelada de aço bruto em conversor LD.	25
Tabela 4.1 - Fator de emissão de GEE do ferro gusa e da sucata.	44
Tabela 5.1 - Consumo médio de insumos para a produção de 1 t de aço bruto nas plantas A e B.	50
Tabela 5.2 - Avaliação da carga metálica do conversor LD.	51
Tabela 5.3 - Quantidade de insumos referentes aos cenários avaliados para Usina A.	52
Tabela 5.4 - Abastecimento do FEA da Usina B e do Artigo 3.	53
Tabela 5.5 - Composição da carga metálica do FEA na Usina B e Artigo 3.	54
Tabela 5.6 - Quantidade de insumos referentes aos cenários avaliados para a Usina B.	54
Tabela 5.7 - Impacto econômico da carga metálica total em cada cenário avaliado.	55
Tabela 5.8 – Emissão de GEE da carga metálica para cada cenário.	57
Tabela 5.9 - Emissão de GEE da parcela da carga metálica que diferencia cada cenário. ...	60
Tabela 5.10 - Principais insumos necessários para a produção de ferro gusa na etapa de redução em cada cenário avaliado.	61
Tabela 5.11 - Principais insumos necessários para a produção de sinter demandada em cada cenário.	62
Tabela 5.12 - Principais insumos necessários para a produção de coque demandado em cada cenário.	63
Tabela 5.13 - Principais insumos necessários para a produção de cal demandada em cada cenário.	63
Tabela 5.14 - Impactos ambientais estimados para cada cenário considerando a obtenção de energia elétrica, carvão mineral e minério de ferro.	70
Tabela 5.15 - Impactos obtidos em cada cenário considerando a obtenção de calcário.	74
Tabela 5.16 - Impactos obtidos no cenário 4B considerando a obtenção de carvão vegetal.	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV	Análise de ciclo de vida
Bq	Becquerel
C-14 _{eq}	Carbono-14 equivalente
CFC-11	Tricloromonofluormetano equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
CTUe	Ecotoxicidade de unidades tóxicas comparativas
FEA	Forno elétrico a arco
GEE	Gases de Efeito Estufa
LD	Linz-Donawitz
PIB	Produto Interno Bruto
pt	Ponto
RG	Rendimento Gravimétrico
Sb _{eq}	Antimônio equivalente
SO _{2eq}	Dióxido de enxofre equivalente
U-235 _{eq}	Urânio-235 equivalente
UE	União Europeia
UF	Unidade Funcional
VE	Valor de existência
VERA	Valor econômico do recurso ambiental
VO	Valor de opção
VUD	Valor de uso direto
VUI	Valor de uso indireto

1 INTRODUÇÃO

O aço é um dos principais materiais de engenharia e construções, podendo ser utilizado em automóveis, equipamentos domésticos (geladeira, televisão, dentre outros), navios e bisturis cirúrgicos. Além disso, possui grande variedade, pois há mais de 3500 tipos de aço com propriedades físicas, químicas e ambientais diferentes (WORLD STEEL ASSOCIATION, [2020?]).

O Brasil é o principal produtor de aço bruto da América Latina (53,7% do total) e o 9º maior produtor no mundo, em ranking liderado pela China. A região Sudeste brasileira é a que possui maior expressividade, com uma participação de 86,1% na produção de aço bruto do país. Além disso, o setor siderúrgico brasileiro conta com mais de 110 mil colaboradores, somando efetivos próprios e terceiros (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Para a fabricação do aço é necessária a realização de três processos principais: redução, refino e laminação. As indústrias siderúrgicas são divididas em dois tipos, de acordo com a obtenção do aço, são elas: usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas realizam os três processos e possuem como matéria-prima o minério de ferro, enquanto as usinas semi-integradas operam a partir do refino e produzem o aço a partir da sucata metálica (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018; MOURÃO et al., 2011).

Além da utilização de sucata metálica para a produção do aço, as usinas semi-integradas realizam a fusão de ferro gusa e/ou ferro esponja junto à sucata na etapa de refino na aciaria elétrica (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

Um conceito que se agregou à indústria siderúrgica e começou a aparecer em discursos estratégicos de liderança é o de economia circular. O aço apresenta vantagens para o ciclo deste modelo econômico, como a possibilidade de ser reciclado inúmeras vezes sem que suas características sejam afetadas, fazendo com que ele seja o material mais reciclado no mundo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

A reciclagem do aço possui diversos benefícios ambientais, como redução nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e na energia total consumida, quando comparada com a produção de aço primária (COSTA, 2017).

O modelo econômico da economia circular vem tornando-se mais visado, devido a seus potenciais benefícios. Essa economia tem como objetivo manter produtos, materiais e afins em níveis de utilidade, indo em direção oposta ao desenvolvimento linear. Os avanços tecnológicos permitem a criação de negócios baseados na economia circular que antes não eram possíveis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

As organizações criaram formas de reduzir os impactos de seus produtos no meio ambiente, e estão se adaptando às novas exigências do mercado acerca da reciclagem e reutilização dos resíduos. A reciclagem é uma ótima ferramenta de preservação do meio ambiente, pois proporciona uma redução na utilização de recursos naturais e gera empregos (BRAGA JUNIOR; PINHEIRO, 2013). Isto, corrobora com Instituto Aço Brasil (2018), que enuncia que a reciclagem na siderurgia proporciona a conservação de recursos naturais e a geração de empregos na coleta e processamento da sucata.

Por muito tempo as atividades econômicas se desenvolveram com poucas preocupações com fatores externos. Entretanto, a intensa degradação do patrimônio natural impulsionou a sociedade a demandar por atuações responsáveis, alterando de uma visão apenas econômica para uma visão que agrega a responsabilidade ambiental. A valoração dos recursos ambientais revela questões socioeconômicas, pois dimensionam os impactos internalizando-os à economia e evidenciando o custo-benefício da expansão da atividade humana (MALDONADO; EDUARDO; RIBEIRO, 2017).

A utilização do resíduo como matéria-prima de outro processo baseia-se no conceito de economia circular, tendo em vista que a aplicabilidade do material está sendo mantida. A reciclagem da sucata pela indústria siderúrgica promove a economia circular do aço, que em seu ciclo de vida possui fases como produto, resíduo e matéria-prima.

Alguns autores (Burchat-Korol (2013), Broadbent (2016), Renzulli et al. (2016)), realizaram análises de ciclo de vida do aço nas duas rotas siderúrgicas e avaliação dos benefícios da reciclagem da sucata com base na comparação entre as rotas. No entanto, ainda não foram reportados os benefícios econômicos e ambientais da utilização da sucata em ambas as rotas de forma independente.

Existe uma diferença entre as rotas de produção do aço, uma perspectiva de crescimento da representatividade da economia circular a longo prazo no ramo, e ausência de estudos sobre os benefícios da sucata nas duas rotas siderúrgicas. Isto faz com que seja relevante uma análise partindo dos dois trajetos principais - rota integrada e semi-integrada - para avaliar os benefícios da reciclagem da sucata em ambas as rotas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os benefícios ambientais e econômicos da utilização da sucata metálica em indústrias siderúrgicas integrada e semi-integrada da região Sudeste.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o consumo evitado das principais matérias-primas devido à utilização da sucata e não obtenção de ferro gusa;
- Avaliar os principais impactos ambientais associados à obtenção das matérias-primas necessárias para a produção de ferro gusa;
- Avaliar os ganhos econômicos do uso da sucata metálica para as indústrias siderúrgicas integrada e semi-integrada, sob diferentes cenários; e
- Avaliar os ganhos ambientais gerados devido às emissões de GEE com o uso da sucata metálica para as indústrias siderúrgicas integrada e semi-integrada, sob diferentes cenários.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço

O aço consiste em uma liga metálica que possui, em geral, entre 0,002% a 2,0% do peso em carbono, e é constituído por elementos de liga em quantidades variadas (MOURÃO et al., 2011). Segundo a World Steel Association (2012), por séculos, a produção do aço consistia em um processo lento e oneroso. Entretanto, a mudança ocorreu entre os anos de 1850 a 1860, em que surgiram técnicas que permitiram a produção em massa, de forma rápida e barata. Tal mudança está relacionada ao trabalho do inventor britânico, Henry Bessemer.

Em 2019, a produção mundial de aço bruto foi igual a 1,8 bilhão de toneladas, correspondendo a um consumo per capita mundial de aço bruto de 245 kg/hab. Por outro lado, na América do Sul, a produção de aço bruto total foi de 41,7 milhões de toneladas e o consumo per capita de aço bruto igual a 100 kg/hab (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020). No Brasil, o consumo per capita de aço bruto no Brasil foi ligeiramente superior ao da América do Sul (110,4 kg/hab) e a produção de aço bruto representou 78,1% da produção total da América do Sul em 2019 (Tabela 3.1), fazendo com o que país ocupasse a 9ª posição no ranking mundial de produção de aço bruto (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Tabela 3.1 - Consumo per capita e produção de aço bruto no Brasil, América do Sul e no mundo, no ano de 2019.

Local	Consumo per capita (kg/hab) de aço bruto no ano de 2019	Produção de aço bruto (milhões de toneladas) no ano de 2019
Brasil	110,4	32,6
América do Sul	100	41,7
Mundo	245	1.875

Fonte – Adaptado de Instituto Aço Brasil (2020); World Steel Association (2020).

A região Sudeste do Brasil é a localidade que possui maior representatividade na produção brasileira de aço bruto, sendo responsável por 86,1% da produção do país no ano de 2019. O estado de Minas Gerais liderou a produção de aço bruto no Brasil, no mesmo ano, com uma participação em 32% da produção do país, seguido pelo estado do Rio de Janeiro e Espírito Santo, com participação em 26,9% e 20,3% da produção, respectivamente (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020). A Tabela 3.2 apresenta as quantidades produzidas de aço bruto pelos

principais estados produtores de aço no Brasil, no ano de 2019, bem como as porcentagens de suas respectivas representatividades.

Tabela 3.2 - Produção de aço bruto nos três estados do Brasil com maior representatividade na produção de aço bruto e no restante do país, no ano de 2019.

Estado	Produção de Aço Bruto (milhões de toneladas)	%
Minas Gerais	10,41	31,96%
Rio de Janeiro	8,75	26,87%
Espírito Santo	6,60	20,26%
Outros	6,81	20,91%
Brasil	32,57	100%

Fonte – Adaptado de Instituto Aço Brasil (2020).

No ano de 2012, em que o Brasil produziu cerca de 34,5 milhões de toneladas de aço, o setor siderúrgico foi responsável por 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (PWC, 2013).

Os dados mais atuais mostram que em 2018 a metalurgia era o 4º setor com maior participação (7,5%) no PIB da Indústria de Transformação. No ano de 2020, a Indústria de Transformação, que é a parte da indústria que realiza transformação física, química e biológica de materiais a fim de obter produtos novos, teve uma participação de 11,3% no PIB (CNI, 2021).

A atividade siderúrgica conquistou ao longo do tempo tamanha relevância que passou a ser utilizada como índice de desenvolvimento das nações (MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003). Segundo Viana (2019), a indústria siderúrgica tem um papel relevante na indústria de transformação, na participação no PIB e na oferta de empregos.

3.2 Processo siderúrgico

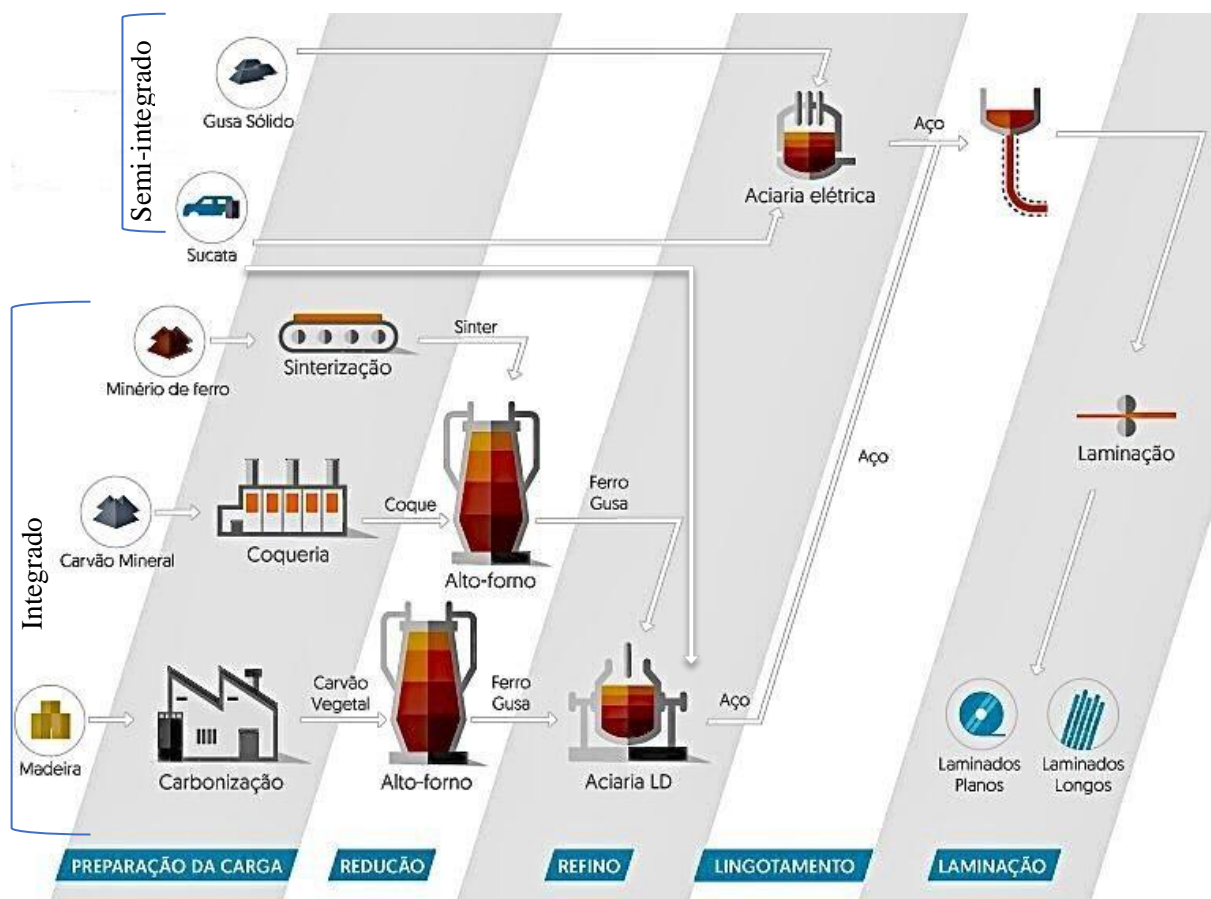
As usinas siderúrgicas são divididas em integradas e semi-integradas, de acordo com a forma que o aço é obtido. As usinas integradas produzem aço a partir de minério de ferro, enquanto as usinas semi-integradas obtêm o aço a partir de sucata de aço (MOURÃO et al., 2011).

Além disso, o equipamento utilizado para a obtenção do aço nas siderúrgicas integradas e semi-integradas é diferente, podendo o produto ser fabricado principalmente no forno a

oxigênio ou forno elétrico, respectivamente (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). De acordo com a World Steel Association (2020), no ano de 2019, a produção mundial de aço bruto por meio de conversor a oxigênio representou 71,6% do total produzido, seguido pela produção via forno elétrico com um percentual de 27,9%. No Brasil, em 2019, 76% da produção de aço bruto se deu via conversor a oxigênio, enquanto 22,3% ocorreu por meio do forno elétrico.

Segundo o Instituto Aço Brasil (2018), o processo siderúrgico pode ser desmembrado de forma sucinta nas etapas de preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma simplificado do processo siderúrgico integrado e semi-integrado.

Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.



Fonte – Adaptado de Instituto Aço Brasil (2018).

Existem autores que incluem ainda como uma terceira divisão da siderurgia, as indústrias não integradas. De acordo com Teixeira e Rodrigues (2018), essas indústrias produzem exclusivamente o ferro gusa e são denominadas também como indústrias independentes ou guseiras.

Embora não apareça no fluxograma, segundo Huppés (2014), devido à complexidade de retirar impurezas no equipamento de fabricação do aço bruto, muitas siderúrgicas fazem uso da etapa de metalurgia de panela, que consiste no refino secundário. Os principais processos incluídos nessa etapa são dessulfuração, desoxidação e desgaseificação, além do reparo na composição química e temperatura do aço.

3.2.1 Processos exclusivos da Usina Integrada

Para a produção de aço por meio da rota integrada, são utilizados recursos como água, energia elétrica e oxigênio. Além disso, o processo necessita das seguintes matérias-primas: minérios, redutores, combustíveis, fundentes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários (MOURÃO et al., 2011).

Os processos de uma usina integrada são: Preparação das matérias primas (Sinterização e Coqueria), Redução em Alto-Forno, Refino (Pré-tratamento do Gusa e Conversão), Lingotamento e Laminação. Existem outros processos existentes para a redução, embora o alto-forno seja o mais clássico (MOURÃO et al., 2011).

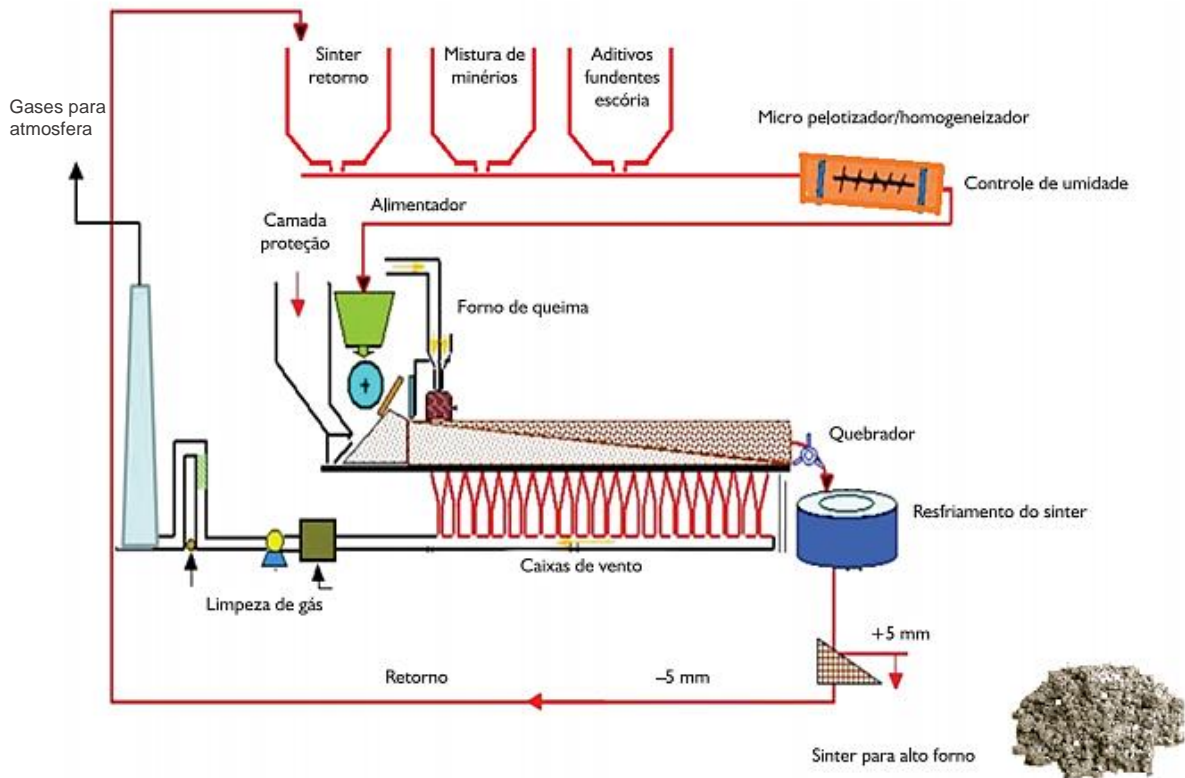
3.2.1.1 Preparação das Matérias-Primas

A preparação das matérias-primas na usina integrada se divide em duas fases principais, são elas: a produção do sinter por meio da aglomeração de minério de ferro, cal e finos de coque; e a produção do coque pela transformação do carvão na etapa de coqueria (INSTITUTO AÇO BRASIL, [2021?]).

O processo de sinterização consiste na aglomeração de minério de ferro com granulometria de 0,1 a 9,5 mm, a fim de viabilizar sua utilização nos processos metalúrgicos. A sinterização ocorre sob uma esteira rolante, na qual é depositado o minério de ferro e finos de coque ou carvão formando uma camada (MOURÃO et al., 2011).

A combustão dos combustíveis (finos de coque ou carvão) se inicia na camada superior, devido ao forno de ignição e com o movimento da esteira, formando assim uma frente de combustão (CASTRO et al., 2013). Dessa forma, o calor necessário para o processo é fornecido pela combustão de coque ou carvão presente na camada, com o oxigênio do ar, esse calor promove o colamento entre os grãos de minério, produzindo o sinter. É necessário que durante o processo seja adicionada água para controlar a permeabilidade da carga e garantir que as partículas mais finas fiquem aderidas às grossas (MOURÃO et al., 2011). A Figura 3.2 apresenta fluxograma do processo de sinterização.

Figura 3.2 - Fluxograma do processo de sinterização.



Fonte – Adaptado de Castro et al. (2013).

Além da sinterização, outro conhecido processo de aglomeração do minério de ferro é a pelotização, que aglomera as partículas em forma esférica. Nessa operação são utilizados, em sua maioria, minérios com tamanho inferior a 0,15 mm. No entanto, devido ao tamanho dos finos que torna o transporte complexo, as unidades de pelotização são instaladas com mais proximidade das minas (MORAIS, 2008).

O carvão é uma matéria-prima utilizada na produção do ferro gusa em etapas posteriores, por possuir alto teor de carbono e ser uma fonte de energia para os altos fornos (TEIXEIRA; RODRIGUES, 2018). Segundo Morais (2008), o carvão mineral, assim como o carvão vegetal, são fontes de carbono que fornecem combustível e agente redutor, itens fundamentais para a produção do ferro gusa no alto-forno.

Diante disso, podem ser utilizados carvão vegetal ou mineral, sendo o último uma fonte de energia não renovável que emite elevados volumes de Gases de Efeito Estufa (GEE) em sua combustão (TEIXEIRA; RODRIGUES, 2018). Segundo o SINDIFER (2020), no ano de 2019, a produção de ferro gusa no Brasil foi de 30,9 milhões de toneladas, sendo 77,5% dessa quantidade produzida a partir do coque e 22,5% provenientes do carvão vegetal.

Um diferencial da produção brasileira de aço é a substituição do coque pelo carvão vegetal, que tem como uma de suas vantagens o plantio de florestas. Apesar de apresentar tal vantagem, a rota integrada a carvão vegetal possui restrições técnicas e econômicas que limitam a produção de aço em larga escala, como a utilização do carvão vegetal apenas em altos fornos de menor porte e a disponibilidade de áreas para plantio próximas às usinas para abastecer as indústrias (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

O processo pelo qual o carvão mineral é submetido para a preparação da matéria-prima nas siderúrgicas é chamado de coqueificação. Nessa etapa, o carvão é sujeito a elevadas temperaturas na ausência de oxigênio em uma bateria de fornos e emite gases presentes em sua estrutura, resultando no coque (DORILEO et al., 2010).

Em geral, para produzir uma tonelada de coque são necessários de 1,25 a 1,65 t de carvão mineral e há a geração de 300 a 600 m³ de gás de coqueria, um combustível utilizado como insumo energético (DORILEO et al., 2010).

O carvão vegetal produzido no Brasil é destinado em quase sua totalidade para o consumo interno, incentivado pela atividade siderúrgica. Para que ocorra a produção do carvão vegetal é realizada uma aplicação de calor sobre a madeira a fim de que haja degradação parcial do material (DUBOC et al., 2007).

A madeira, quando é submetida ao calor, passa por processos de secagem e carbonização de seus componentes como hemicelulose, celulose e lignina. Ao longo do tempo em que a madeira vai sendo decomposta e emitindo gases e vapores, o carvão vai se formando pela concentração do carbono e atinge a concentração de 75% para suprir a necessidade do alto-forno (CGEE, 2015).

O rendimento gravimétrico (RG) representa a relação da eficiência de conversão da madeira em carvão vegetal (kg de carvão/kg de madeira - base seca). Entre os anos de 2005 e 2012, a produção de carvão vegetal apresentou um rendimento gravimétrico igual a 26%, para o ano de 2020 era esperado um RG igual a 32% (CGEE, 2015).

3.2.1.2 Redução

A etapa de redução ocorre nos altos-fornos e resulta na produção do ferro gusa. Este material é gerado pela reação dos óxidos de ferro com carbono e ar. O alto-forno é carregado com minério de ferro, carvão vegetal ou coque (redutores que podem ser utilizados) e fundentes (quartzo, calcário, dolomita), resultando no ferro gusa líquido, escória e gás de alto-forno (MORAIS, 2008). Segundo Mourão et al. (2011), podem ocorrer durante o processo injeções auxiliares de gás natural, carvão pulverizado, óleo combustível, alcatrão e plásticos picotados.

Os fundentes, fluxantes ou escorificantes são materiais adicionados ao alto-forno com o objetivo de (MOURÃO et al., 2011):

- formar escórias e reter as impurezas com atividade baixa;
- aumentar a fluidez e facilitar as reações e a separação do metal e da escória;
- permitir que o processo seja realizado a temperaturas mais baixas.

O processo de redução consiste nas etapas de pesagem da carga, abastecimento do alto-forno com a carga, redução da carga metálica, produção do ferro gusa líquido, geração de escória, coleta e limpeza do gás gerado. O ferro gusa produzido é direcionado à aciaria por meio de carros-torpedos (PASSOS, 2009).

A escória de alto-forno é gerada devido à fusão das impurezas do minério com a adição de fundentes e cinzas do coque ou carvão vegetal (SILVA et al., 2019). Segundo Mourão et al. (2011), a escória gerada é drenada em potes ou transformada em granulado por meio de jato de água e disponibilizada para a venda.

As proporções das cargas utilizadas variam conforme a operação. A Tabela 3.3 apresenta um exemplo de proporções de materiais carregados e obtidos no alto-forno, conforme Silva (2011).

Tabela 3.3 - Entradas e saídas do Alto-Forno na indústria siderúrgica integrada.

Materiais carregados	Materiais obtidos
1,5 t de minério	1 t de ferro gusa
0, 65 t de coque ou carvão vegetal	0,2 a 0,4 t de escória
0,25 t de calcário	2,5 a 3,5 t de gás de alto-forno
1,8 a 2,0 t de ar	

Fonte – Adaptado de Silva (2011).

A cal é um insumo importante para a remoção do enxofre em altos-fornos a coque. No entanto, em operações com utilização de carvão vegetal, a relevância da cal é reduzida, pois o combustível utilizado possui baixo teor de enxofre (SILVA, 2011).

3.2.1.3 Refino – Aciaria LD

Entre a etapa de redução no alto-forno e o refino primário na aciaria, ocorre um pré-tratamento do ferro gusa, visando melhorar a produtividade e a qualidade dos produtos. Esse pré-tratamento consiste em uma dessiliciação, desfosforação e dessulfuração para reduzir a quantidade de silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S), respectivamente (MOURÃO et al., 2011).

Segundo Maia (2007), o conversor Linz-Donawitz (LD), utilizado na etapa de refino em siderúrgicas integradas, começou a ser introduzido na siderurgia em meados de 1949, em que as tentativas para oxidar o gusa líquido por meio de sopro com oxigênio puro foram concluídas. A primeira usina siderúrgica via conversor LD iniciou operação nas cidades de

Linz e Donawitz, em 1952 e 1953, respectivamente. Dessa forma, o conversor é conhecido pela sigla “LD”, que faz referência às cidades localizadas na Áustria onde o processo se iniciou.

Na aciaria ocorre a alteração do ferro gusa produzido nos altos-fornos, juntamente com as sucatas e outras matérias-primas, que são transformados em aço líquido por meio de um conversor LD. A transformação acontece devido às reações químicas ocasionadas pelo sopro de oxigênio na carga dos conversores (BORGES, 2016).

O refino consiste no ajuste do teor de carbono e remoção de impurezas do ferro gusa para a obtenção do aço por meio do conversor LD (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). Segundo Mourão et al. (2011), na etapa de refino, no conversor LD, a sucata é adicionada à carga em uma porcentagem de até 20% dessa, para controlar a temperatura final do aço. Em contrapartida, de acordo com Noldin Junior (2002) e Broadbent (2016), a porcentagem de utilização de sucata no conversor pode chegar a 30%.

A Tabela 3.4 apresenta o fluxo de matéria para a produção de uma tonelada de aço bruto por meio do conversor LD, conforme trabalho realizado por Li et al. (2017) em uma siderúrgica integrada.

Tabela 3.4 - Fluxo de matéria da produção de uma tonelada de aço bruto em conversor LD.

Entradas		Saídas
Energia	Material	
Eletricidade - 26,65 kWh	Ferro Gusa - 908,11 kg	Escória de aciaria - 135,29 kg
Gás de coqueria - 3,69 m ³	Sucata - 283,36 kg	Pó - 79,50 g
Gás de alto-forno - 8,10	Dolomite - 5,12 kg	CO ₂ - 28,28 kg
Gás natural - 0,39 m ³	Cal - 58,88 kg	SO ₂ - 5,75 g
	Refratário - 60,58 kg	NO ₂ - 3,84 g
	Água - 86,86 m ³	CO - 4,60 kg
		Efluente - 1,07 m ³
		Lixo refratário - 5,53 kg
		Metais pesados (incluídos no pó) - 72,65 g

Fonte – Adaptado de Li et al. (2017).

3.2.2 Processos Exclusivos da Usina Semi-integrada

A produção do aço na usina semi-integrada necessita de sucata, fundentes, refratários e ferros-liga. Além disso, utiliza água, energia elétrica e oxigênio, como a usina integrada (MOURÃO et al., 2011).

3.2.2.1 Preparação da sucata

As fontes de resíduos de sucata são variadas, assim como o próprio material. Dessa forma, existem diferentes tipos de coleta, classificação e preparação dessa matéria-prima. Essas etapas são fundamentais para que ocorra a redução das impurezas agregadas à sucata de ferro, anteriormente à sua utilização no forno elétrico (YELLISHETTY et al., 2011).

A operação do forno elétrico é precedida de uma preparação da carga, desse modo, a sucata é estocada em um pátio e separada conforme sua composição. Pelo fato da sucata poder apresentar densidade aparente baixa, é importante que seja realizado o balanceamento da carga, evitando a necessidade de carregamento excessivos que podem trazer malefícios para a produtividade (SILVA, 2011).

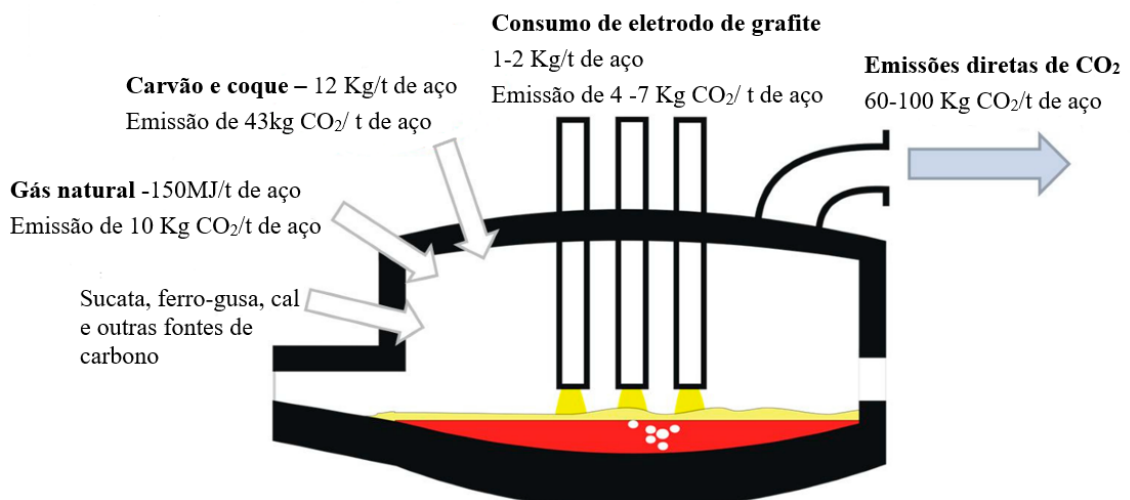
3.2.2.2 Refino – Aciaria Elétrica

O Forno Elétrico a Arco (FEA) converte a sucata em aço por meio da refundição do aço, também é possível a produção de aço primário por meio da rota semi-integrada, quando da utilização do ferro pré-reduzido como matéria-prima (BROADBENT, 2016).

O forno elétrico é carregado com fontes de ferro sólidas, como sucata e ferro gusa, juntamente com elementos de liga, formadores de escória como a cal, e fonte de carbonos. Diante disso, ocorre a fundição do material carregado por meio de energia elétrica e química, sendo a primeira proveniente dos eletrodos e transmitida pelos arcos elétricos entre os eletrodos e o material carregado. A energia química é oriunda de queimadores de oxicorte, carbono, e hidrocarbonetos contaminantes presentes na sucata como óleo, graxa e tinta (ECHTERHOF, 2021).

A fundição dos materiais no forno elétrico a arco resulta em aço líquido, escória de aciaria elétrica e emissões atmosféricas. No ano de 2018, 520 milhões de toneladas de aço foram produzidas por meio da rota com forno elétrico no mundo, correspondendo a um consumo de 6 milhões de toneladas de carvão. Este uso de carvão é responsável pela emissão de aproximadamente 43 kg de CO₂/t de aço. A utilização de carvão fóssil é responsável por 40 a 70% das emissões diretas que ocorrem no forno elétrico a arco, além do uso de gás natural e carvão (ECHTERHOF, 2021). A Figura 3.3 apresenta um esquema com as emissões diretas do FEA, conforme Demus et al. (2012).

Figura 3.3 - Emissões diretas de CO₂ de um Forno Elétrico a Arco.



Fonte – Adaptado de Demus et al. (2012).

A rota semi-integrada de produção do aço requer cerca de 1,6 GJ de eletricidade por tonelada de aço produzida (MARCHIORI et al., 2017).

Após as etapas de extração do ferro em altos-fornos e conversão do ferro gusa nas siderúrgicas integradas e posterior fusão da sucata de aço em forno elétrico a arco, ambas seguem substancialmente o mesmo processo (MOURÃO et al., 2011), seguindo para as etapas de lingotamento e laminação.

3.2.3 Lingotamento e Laminação

O lingotamento contínuo do aço é a última etapa que faz utilização do aço ainda em estado líquido. Esse processo tem como objetivo solidificar o aço, em uma forma determinada, fazendo o uso de uma máquina de lingotamento contínuo. A etapa tem início com o vazamento do aço líquido da panela em direção ao molde em que ocorre a solidificação do aço devido ao contato com a peça. (MOURÃO et al., 2011).

É realizado o resfriamento por meio de um conjunto de chuveiros, quando o aço deixa o molde. Após a completa solidificação, forma-se uma grande placa por toda a extensão da máquina, que é cortada em comprimentos determinados (MOURÃO et al., 2011).

Na laminação, ocorre a deformação mecânica dos lingotes de aço a fim de reduzir a espessura e torná-los produtos siderúrgicos que serão utilizados pelas indústrias de transformação (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). O processo de laminação consiste na passagem do aço entre dois cilindros que giram em mesma velocidade e sentidos opostos, esse processo pode ocorrer a frio ou a quente, a depender as especificações da peça a ser obtida (MOURÃO et al., 2011).

3.3 Sucata de Ferro e Aço

3.3.1 Utilização da sucata no processo siderúrgico

A sucata de ferro em usinas integradas é utilizada na aciaria LD, e além de ser uma fonte de ferro para o processo siderúrgico, possui a função de controlar a temperatura do aço, atuando como material refrigerante contribuindo com a conclusão do balanço térmico (GONÇALVES, 2005; TRINDADE JUNIOR, 2013). De acordo com Andrade et al. (2000),

as taxas de utilização de sucata em conversor LD na aciaria variam entre 100 e 400 kg de sucata/t de aço.

No processo por meio de forno elétrico, em usinas semi-integradas, a carga metálica consiste majoritariamente por sucata. Em contrapartida, na aciaria LD, o ferro gusa líquido representa aproximadamente 80% da carga, sendo o restante de sucata (GONÇALVES, 2005). A carga que abastece a aciaria LD consiste em sua maioria de gusa líquido, e complementada com cerca de 10 a 30% por uma carga sólida, composta por gusa sólido ou sucata (NOLDIN JUNIOR, 2002). Segundo Broadbent (2016), é uma prática comum a utilização de sucata dentro da faixa de 10 a 30% na rota integrada.

O FEA, utilizado em semi-integradas, permite a fusão de sucatas sem limites de proporção, e muitas vezes tais fornos são totalmente abastecidos por sucata (CAMPOS, 1985 apud SILVA, 2012). No processo avaliado por Aguiar (2016), a sucata compreendia 65% da carga do forno elétrico a arco para produção de aços inoxidáveis, sendo o restante da carga metálica formada por ferro gusa.

Segundo Rossi (2014), no Brasil, é comum a utilização de gusa-sólido devido à escassez de sucata no mercado brasileiro.

3.3.2 Tipos de sucata

Segundo Yellishetty et. al, (2011), as principais fontes de sucata são geradas pela produção do aço, outras atividades industriais que envolvam a manufatura de produtos siderúrgicos e sucatas de obsolescência. De maneira similar, segundo o Ministério de Minas e Energia (2009), a sucata ferrosa pode ser classificada de acordo com a fonte de geração:

- **Sucata interna:** gerada na usina siderúrgica;
- **Sucata industrial:** gerada em indústrias de fundições, automobilísticas e metalurgia;
- **Sucata de obsolescência:** material após fim da vida-útil, como veículos automotivos, embalagens, eletrodomésticos, entre outros.

Conforme Andrade et al. (2000), existe um quarto tipo de fonte de sucata, que são as de bens de capital sucateado. Esse material é obtido devido a demolição de unidades industriais.

A sucata industrial, incluindo a sucata interna, pode ser subdividida em estamparia, pacote de estamparia, sucata forjada, cavaco de aço (Figura 3.4), e oxicorte. As sucatas de obsolescência são representadas por sucata triturada, mista (Figura 3.5), pacote misto e oxicortada (MIRANDA, 2019).

Figura 3.4 - Sucata industrial: Cavaco de aço.



Fonte – Miranda (2019).

Figura 3.5 - Sucata de obsolescência: mista.



Fonte - Miranda (2019).

A sucata gerada na produção do aço possui alta qualidade, enquanto a sucata de obsolescência pode conter concentrações médias a altas de elementos residuais (YELLISHETTY et al., 2011).

O tamanho da sucata e sua classificação são fatores determinantes para a produtividade dos fornos, diante disso, a preparação da sucata é realizada para aumentar a densidade, reduzir impurezas e adequar a concentração de contaminantes (BATISTA, 2014). O processamento da sucata é realizado utilizando equipamentos como maçaricos de oxicorte, prensa pacote, prensa tesoura e triturador *shredder* (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009). Além desses processos, segundo Guimarães et al. (2014), a sucata também passa por medições de radioatividade.

A reciclagem da sucata de aço otimiza todo o processo de produção na siderurgia. Na medida que a reciclagem nas indústrias siderúrgicas se eleva, são fabricados mais produtos siderúrgicos saudáveis ambientalmente (PEREZ, 2008).

3.4 Economia Circular do Aço

A economia global se desenvolveu por muitos anos baseada no modelo linear de produção. Neste modelo, os produtos são fabricados a partir de matérias-primas virgens extraídas de recursos naturais, vendidas, utilizadas e descartadas (COSTA, 2017).

Em contrapartida, a economia circular tem como objetivo viabilizar o aproveitamento e reaproveitamento de produtos, bens duráveis e não duráveis, a contar da conceituação do projeto e após a reutilização (ABDALLA; SAMPAIO, 2018). Ou seja, visa manter esses materiais em utilidade e valor, não associando o desenvolvimento com o consumo de recursos finitos, caracterizando-se como uma economia restaurativa e regenerativa (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

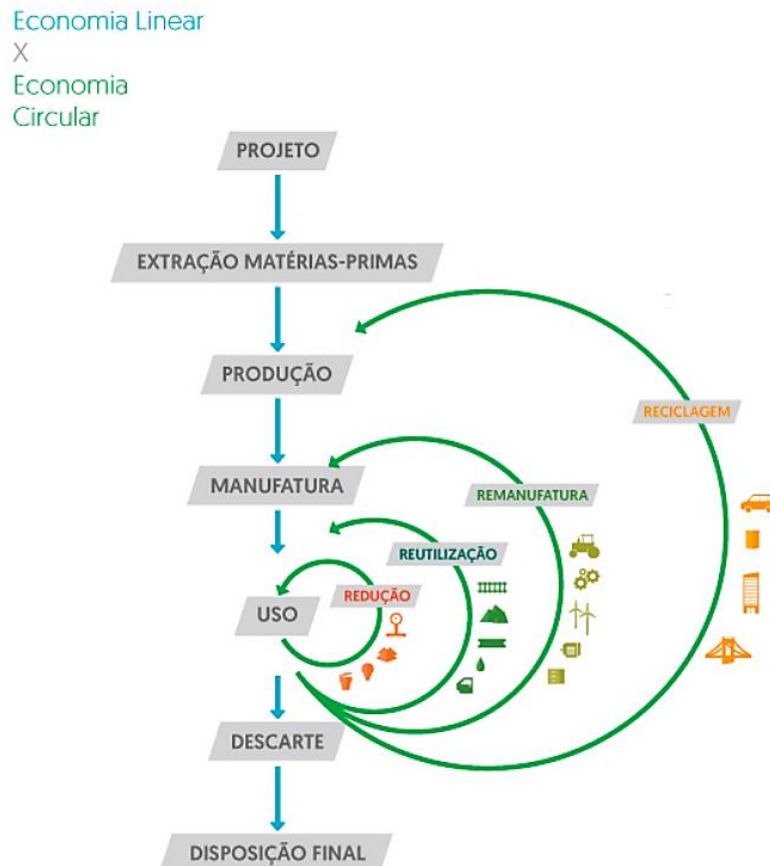
A elevação dos preços, o aumento na volatilidade e pressão nos recursos serviram como alerta para a necessidade de reconsiderar o uso dos materiais e da energia, e usufruir dos benefícios possíveis da economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Uma economia mais circular pode contribuir com uma redução de 56% nas emissões de CO₂ de indústrias de aço, plástico, alumínio e cimento até 2050 na União Europeia (UE). A economia circular é necessária para que seja possível atender às necessidades globais de materiais, de modo que não ultrapasse a quantidade de emissões de carbono que pode ser emitida até 2100, que possui cerca de 800 Gt de CO₂ remanescente até 2100, mantendo o

aquecimento do planeta abaixo de 2°C como definido pelo Acordo de Paris (ENERGY TRANSITIONS COMMISSION, 2018).

A Figura 3.6 apresenta um esquema comparativo entre a economia linear e circular, conforme Instituto Aço Brasil (2018).

Figura 3.6 - Economia Linear e Circular.



Fonte – Instituto Aço Brasil (2018).

O modelo circular tem conceitos que se manifestam no ciclo de vida do aço, como redução, reutilização, remanufatura e reciclagem. A definição de cada um dos conceitos sob a ótica do setor siderúrgico, conforme Instituto Aço Brasil (2018) e World Steel Association (2016) são:

- **Redução:** diminuir a quantidade de recursos, como matéria-prima e energia, utilizados para a produção do aço. Por exemplo, desenvolvendo aços mais finos e resistentes.

- **Reutilização:** utilizar novamente um bem, seja com seu objetivo inicial ou para um novo propósito similar, de modo que não ocorra significativa modificação. Essa etapa consiste na checagem e limpeza, os bens como água, carro e trilhos são exemplos de bens que podem passar pelo uso e reuso.
- **Remanufatura:** consiste em restaurar produtos usados ou com defeitos, retornando os produtos a condição de novos. Esse processo usufrui da durabilidade do aço e preserva a energia usada para criá-lo. Os produtos comumente remanufaturados são: motores, turbinas e peças de máquinas.
- **Reciclagem:** recuperação da matéria-prima alterando a forma física do objeto de aço, ocorre a fundição desse objeto quando no final de sua vida útil para obter novos produtos siderúrgicos.

O aço apresenta qualidades e vantagens para o modelo econômico circular, por ser um produto que possui capacidade de ser reciclado inúmeras vezes mantendo suas características, bem como ser reutilizado e remanufaturado (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

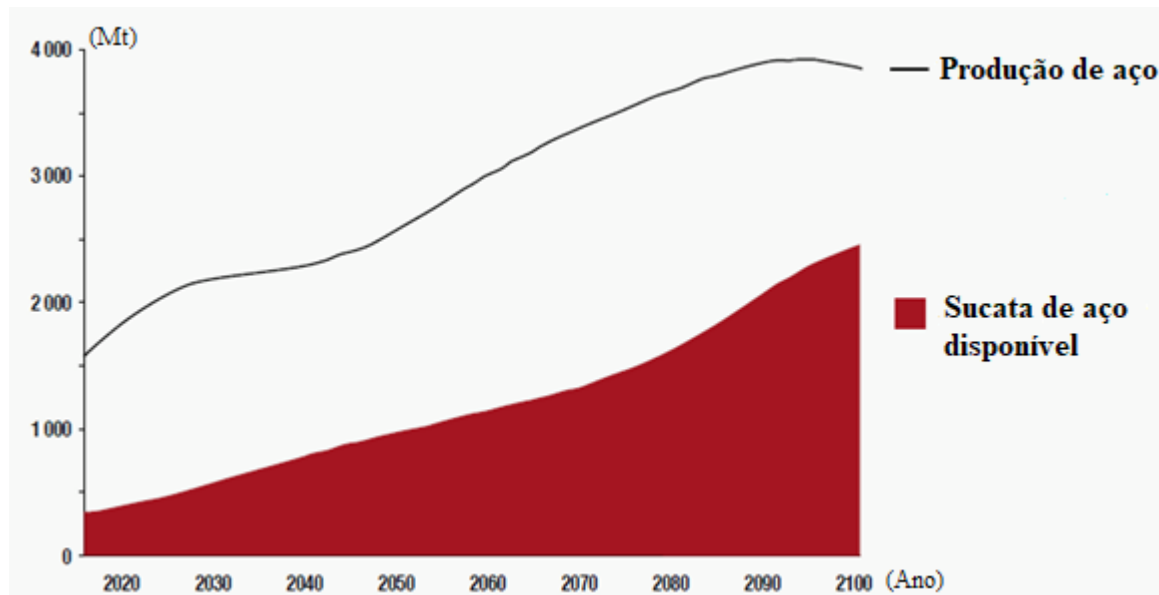
As características do aço fazem com que ele seja o bem industrial mais reciclado no mundo, ofertando produtos duráveis, gerando empregos na coleta e processamento da sucata, reduzindo a emissão de poluentes e contribuindo para conservação dos recursos naturais (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). No ano de 2019, 8 milhões de toneladas de sucata de aço foram recicladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Embora a economia circular esteja em foco na indústria siderúrgica, existe um fator limitante para essa implementação no setor. Segundo Instituto Aço Brasil (2018), a maior parcela do aço produzido atualmente não estará disponível em curto prazo. Dessa forma, a necessidade atual por sucata excede o volume gerado mundialmente. O desenvolvimento da economia circular é dependente da complementaridade dos processos, para que ocorra de modo gradativo e a longo prazo, uma produção de 100% do aço a partir da reciclagem.

Segundo Energy Transitions Commission (2018), no ano de 2018, um terço do aço utilizado era proveniente da reciclagem. Nas próximas cinco décadas estima-se que o aço produzido por meio da reciclagem possa atender a quase 50% da demanda mundial. O nível de

reciclagem proporcionado pelo atendimento de metade da demanda mundial de aço por meio de aço secundário, ou seja, aço produzido a partir da sucata, reduziria as emissões médias de CO₂ por tonelada de aço em 60% e as emissões gerais em 4 bilhões de toneladas de CO₂ por ano até o final do século, proporcionando benefícios climáticos. A Figura 3.7 apresenta uma modelagem da produção mundial de aço e da disponibilidade de sucata até 2100.

Figura 3.7 - Produção mundial de aço e disponibilidade de sucata.



Fonte – Adaptado de Energy Transitions Commission (2018).

A União Europeia (UE) possui grande estoque de aço. Prevê-se, que até 2050 a produção de aço secundário consiga atender até 85% das demandas da UE se a redução da qualidade da sucata for evitada (ENERGY TRANSITIONS COMMISSION, 2018).

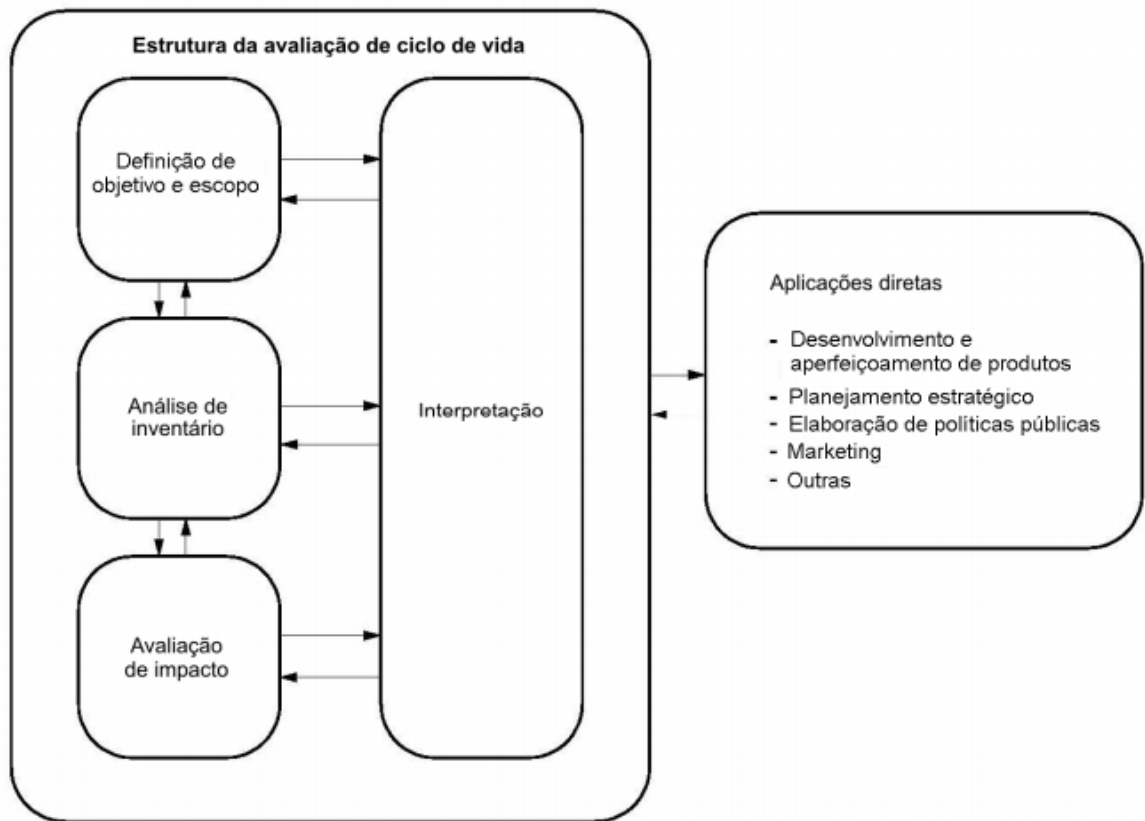
3.5 Análise de Ciclo de Vida

A Avaliação ou Análise de Ciclo de Vida (ACV) é um instrumento relacionado à análise dos impactos ambientais de determinada atividade ou produto, que pode se dar a partir da obtenção da matéria-prima no ambiente até o retorno dos resíduos (“berço ao túmulo”). A ferramenta de ACV colabora na produção de conhecimento, na avaliação dos impactos e auxilia na comparação dos desempenhos ambientais do produto que está sendo avaliado (CARVALHO, 2010).

Conforme a NBR ISO 14040:2009, versão revisada 2014 (ABNT, 2014), que trata sobre avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura, uma das características da metodologia adotada pela ACV é avaliar os aspectos e impactos ambientais, de forma sistemática, da aquisição da matéria-prima até a destinação final, conforme objetivo e escopo definidos.

A ACV é composta por quatro etapas, são elas: 1) Definição de objetivo e escopo, 2) Análise de inventário, 3) Avaliação de impactos e 4) Interpretação (Figura 3.8). A ACV, em geral, não considera aspectos e impactos econômicos, diante disso, outras ferramentas podem ser combinadas quando da necessidade de avaliação desses fatores (ABNT, 2014).

Figura 3.8 - Etapas de uma ACV.



Fonte – ABNT (2014).

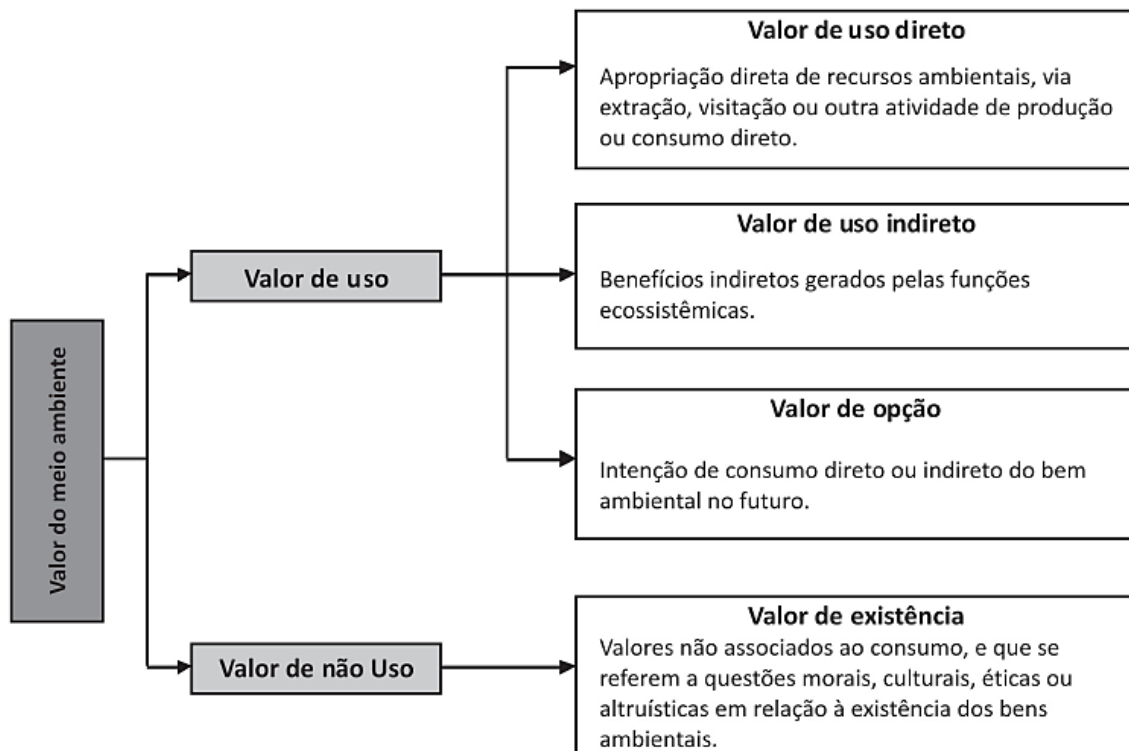
3.6 Valoração Econômica Ambiental

A atividade de valoração econômica de um recurso ambiental busca determinar a mudança, seja ela para melhor ou pior, no bem-estar das pessoas devido à alterações na quantidade de bens e serviços ambientais, tanto na apropriação por uso ou não. A escolha do método de

valoração depende do objetivo da valoração, das hipóteses assumidas, disponibilidade de dados e conhecimento da dinâmica ecológica do objeto a ser valorado (MOTTA, 2011).

O recurso ambiental pode possuir valor econômico devido ao seu valor de uso, ou seja, da utilidade que oferece, ou valor de não uso, mas que há disposição a pagar por eles, pelo valor de existência, conforme apresenta fluxograma da Figura 3.9 (ROMEIRO; MAIA, 2011).

Figura 3.9 - Fontes de valor do meio ambiente.



Fonte – Romeiro e Maia (2011).

O valor econômico de um recurso ambiental, assim como os demais bens e serviços do mercado, provém de seus atributos, podendo estes estarem ou não vinculados a um uso. O valor econômico do recurso ambiental pode ser representado por meio da equação 3.1 (MOTTA, 2011).

$$VERA = (VUD + VUI + VO) + VE \quad (3.1)$$

na qual:

VERA = valor econômico do recurso ambiental

VUD = valor de uso direto

VUI = valor de uso indireto

VO = valor de opção

VE = valor de não uso, passivo ou valor de existência

Os métodos de valoração atingem tal objetivo ao passo que conseguem obter as frações do VERA (MOTTA, 2011).

Dentre os métodos de valoração ambiental destacam: método de função de produção (método da produtividade marginal e método de mercado de bens substitutos), método de função de demanda, método de mercados de bens complementares, método de preços hedônicos, método do custo de viagem e método da valoração contingente (MOTTA, 1997).

A ascensão da valoração econômica ambiental é decorrente principalmente do fato de que os processos produtivos tradicionais geram externalidades negativas, principalmente no âmbito do meio ambiente, pois consistem em extrair, transformar e descartar os bens, desconsiderando a reciclagem e/ou reutilização (LINO, 2019; PORTUGAL JÚNIOR; PORTUGAL; ABREU, 2012;). Segundo Motta (1997), as externalidades são os custos da degradação do meio ambiente que não são pagos pelos geradores dessa ação. Esses custos atingem terceiros com a ausência de correta compensação.

4 METODOLOGIA

4.1 Delimitação do Estudo

O estudo foi conduzido com base nos processos de produção de aço de duas usinas de uma empresa siderúrgica localizada na região Sudeste. Para isso, foi avaliado os benefícios econômicos e ambientais gerados pela utilização da sucata no processo siderúrgico de cada usina (integrada e semi-integrada), considerando como escopo deste trabalho a obtenção e entrada dos principais insumos para produção do aço até a etapa de refino primário.

Além disso, optou-se por considerar os seguintes insumos: minério de ferro, coque, sinter, sucata, ferro gusa, carvão (mineral e vegetal), energia elétrica, cal e calcário. A unidade funcional (UF) definida para o estudo foi de uma tonelada de aço bruto.

Apesar da água ser um insumo relevante no processo, optou-se por não incluir na análise, devido à insuficiência de dados discriminados por processo siderúrgico.

Para fins de simplificação, foi considerada a produção de aço em geral das usinas, sem especificações de variação na qualidade do mesmo, haja vista que existem mais de 3500 tipos de aço. Da mesma forma, embora exista diferentes qualidades de sucata, para a obtenção dos resultados foi considerado o valor total utilizado de sucata nas plantas, sem diferenciá-las.

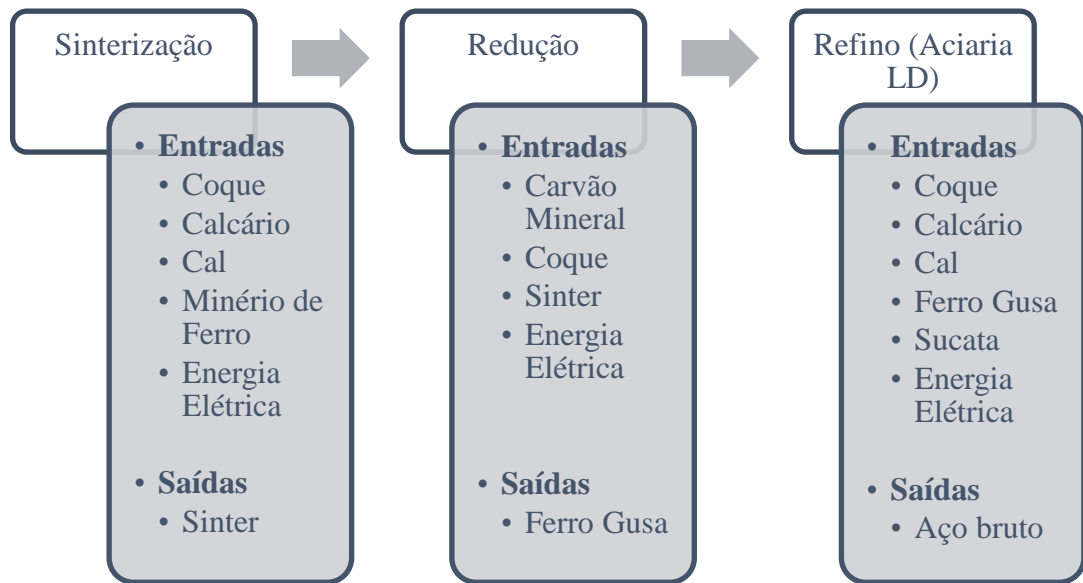
4.2 Obtenção dos Dados Primários e Caracterização das Plantas

Os dados primários foram obtidos junto a grande empresa do setor siderúrgico da região Sudeste do Brasil. Os dados são referentes ao consumo por tonelada de aço bruto, das respectivas matérias-primas e insumos supracitados no ano de 2020.

As informações fornecidas são provenientes de duas plantas siderúrgicas, que foram denominadas no presente estudo como Usina A (integrada) e B (semi-integrada).

- **Usina A:** O processo dessa planta se enquadra na tipologia siderurgia integrada, portanto, a produção do aço bruto ocorre por meio das etapas de sinterização, redução em alto-forno a coque e refino primário em aciaria Linz-Donawitz (LD). Não há nessa planta a etapa de produção de coque, todo o coque utilizado é proveniente de terceiros (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Fluxograma dos processos da Usina A até a entrada da sucata.



Fonte – A autora (2021).

- **Usina B:** A rota dessa planta até a produção de aço bruto consiste nas etapas de redução em alto-forno e refino primário no forno elétrico a arco (Figura 4.2). Para fins de comparação com a literatura, a planta foi considerada como semi-integrada por ter a sucata como um de seus principais insumos e utilizar o forno elétrico a arco, embora produza ferro gusa para utilização no refino.

Figura 4.2 - Fluxograma dos processos da Usina B até a entrada da sucata.



Fonte – A autora (2021).

4.3 Estudos de Avaliação de Ciclo de Vida do Aço e Matérias-Primas

Foi realizada a busca por estudos de avaliação de ciclo de vida do aço e de algumas matérias-primas e insumos, como o minério de ferro, carvão mineral, calcário e outros, a fim de levantar os aspectos e impactos necessários para avaliar a influência da utilização de sucata no processo siderúrgico. Para a coleta dos dados de ACV foi realizada uma busca e seleção de artigos nas plataformas Periódico Capes, Scielo, Science Direct e Google Acadêmico. A pesquisa foi realizada no ano de 2021 utilizando palavras-chaves em inglês e português, tendo como as principais combinações de termos utilizados para a busca dos estudos:

- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Aço;
- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Minério de Ferro;
- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Carvão Mineral;
- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Carvão Vegetal;
- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Calcário.
- Análise de Ciclo de Vida (ACV); Sucata.

Para cada matéria-prima pesquisada nessa etapa, foi feita uma análise dos estudos selecionados, e realizada adaptações e padronizações nos aspectos ambientais relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, quando necessário. Após as alterações necessárias, todos os aspectos avaliados foram mensurados para uma tonelada do produto analisado (seja ele aço, minério de ferro, carvão mineral, carvão vegetal ou calcário) para que fosse utilizado no desenvolvimento do trabalho, caso pertinente.

Os dados primários de carga metálica utilizada no abastecimento das usinas foram comparados aos dados secundários encontrados na literatura, de acordo com a rota avaliada, a fim de observar as diferentes porcentagens de utilização de sucata.

Os estudos de ACV de aço selecionados para utilização como dados secundários, bem como para comparação com os dados obtidos com a siderúrgica são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Estudos de ACV de Aço da literatura utilizados.

Artigo	Autores	Ano	Rota	Limites
1	Burchat-Korol	2013	Integrada	Sinterização, Alto-forno, Planta de Produção de Cal, Conversor LD
2	Renzulli et al.	2016	Integrada	Coqueria, Sinterização, Alto-forno, Conversor LD
3	Burchat-Korol	2013	Semi-integrada	Forno Elétrico a Arco

Fonte – A autora (2021).

4.4 Avaliação da Utilização de Sucata nas Usinas

4.4.1 Avaliação da utilização de sucata e cenários propostos para Usina A

A Usina A, por se tratar de uma usina integrada, teve seus dados comparados com estudos de Análise de Ciclo de Vida referentes à produção de aço bruto por meio da rota integrada. Tendo em vista que a sucata abastece a etapa de refino, ou seja, o conversor LD, foi realizada uma avaliação da carga metálica e sua composição na Usina A e nos artigos selecionados.

Para a Usina A, foram avaliados três cenários, subdivididos em A e B:

Cenário 1: Utilização de 10% de carga sólida no conversor LD

- **Cenário 1A:** 10% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por sucata metálica;
- **Cenário 1B:** 10% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por gusa sólido;

Cenário 2: Utilização de 20% de carga sólida no conversor LD

- **Cenário 2A:** 20% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por sucata metálica;
- **Cenário 2B:** 20% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por gusa sólido;

Cenário 3: Utilização de 30% de carga sólida no conversor LD

- **Cenário 3A:** 30% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por sucata metálica;

- **Cenário 3B:** 30% de carga sólida no conversor LD, composta totalmente por gusa sólido.

A quantidade de carga metálica, ou seja, do somatório da carga líquida e sólida, foi fixada em 1,117 t/t de aço bruto, para todos os cenários, tendo em vista que esse foi o valor médio obtido nos dados da Usina A. Além disso, todos os cenários foram avaliados considerando a produção de uma tonelada de aço bruto.

Devido a utilização da sucata, os cenários 1A, 2A e 3A, não possuem utilização de ferro gusa sólido, apenas ferro gusa líquido presente na carga líquida que abastece o conversor LD. Para obter a quantidade de sucata ou gusa sólido utilizado para produção de 1 t de aço bruto (Q_{si}), em toneladas, referente a cada cenário proposto para a Usina A, foi utilizada a Equação 4.1.

$$Q_{si} = 1,117 * \gamma_{si} \quad (4.1)$$

Em que:

Q_{si} = quantidade de carga sólida (gusa sólido ou sucata) utilizada para produção de 1 t de aço, em toneladas no Cenário i

γ_{si} = percentual de carga sólida no Cenário i

i = Cenário 1A, 1B, 2A, 2B, 3A ou 3B

Para a obter a carga metálica líquida, ou gusa líquido, foi realizada uma subtração, conforme Equação 4.2.

$$Q_{li} = 1,117 - Q_{si} \quad (4.2)$$

Em que:

Q_{li} = quantidade de carga metálica líquida (gusa líquido) utilizada para produção de 1 t de aço bruto no Cenário i , em toneladas

Q_{si} = quantidade de carga sólida (gusa ou sucata) utilizada para produção de 1 t de aço bruto no Cenário i , em toneladas

i = Cenário 1A, 1B, 2A, 2B, 3A ou 3B

Para definição dos cenários, utilizou-se como base o estudo de Noldin Junior (2002) e as informações obtidas junto à empresa.

A utilização de gusa sólido no conversor LD raramente acontece, no entanto, para fins de obtenção dos benefícios da sucata, foi realizada avaliação dos dois insumos, tendo em vista que embora seja um acontecimento raro, existe a possibilidade de produção do aço por meio dos cenários propostos. Diante disso, tal análise foi realizada baseada nesse conceito, considerando uma relação de 1:1 entre o ferro gusa sólido e a sucata.

4.4.2 Avaliação da utilização de sucata e cenários propostos para Usina B

Apesar de possuir a etapa de redução, a usina B possui em seu processo de refino a utilização do forno elétrico a arco, logo, seus resultados foram comparados ao estudo de uma usina semi-integrada, que também utiliza FEA.

Para a Usina B foi avaliado um cenário, subdividido em A e B:

- **Cenário 4A:** 100% de sucata abastecendo o FEA;
- **Cenário 4B:** 51,5% de sucata e 48,5% de gusa líquido abastecendo o FEA.

As porcentagens utilizadas nos cenários foram definidas com base no estudo de Burchart-Korol (2013) e nos dados obtidos junto a empresa. Todos os cenários foram avaliados considerando a produção de uma tonelada de aço bruto.

4.5 Valoração Econômica Ambiental

4.5.1 Escolha do Método

O método de valoração econômica ambiental escolhido é o baseado na função de produção. Ou seja, considera-se que o recurso ambiental é insumo ou um substituto (sucata) de um bem para estimar o valor econômico do recurso ambiental (MOTTA, 1997, ROMEIRO; MAIA, 2011). Assim, foi feita a análise considerando os benefícios econômicos e ambientais do uso da sucata para as usinas avaliadas, de acordo com os cenários propostos.

4.5.2 Impactos Econômicos

Os impactos econômicos gerados para cada cenário avaliado (Usina A e B) foram estimados conforme Equação 4.3.

$$I_{e j} = Q_s * P_s + Q_l * P_l \quad (4.3)$$

Em que:

$I_{e j}$ = impacto econômico do cenário j , em R\$/t de aço bruto

j = Cenários 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A ou 4B

P_s = preço médio da sucata metálica ou gusa sólido, em R\$/t

P_l = preço médio do ferro gusa líquido, em R\$/t

Q_s = quantidade de sucata ou gusa sólido utilizado para produção de 1 t de aço bruto, no cenário j , em toneladas

Q_l = quantidade de gusa líquido utilizado para produção de 1 t de aço bruto, no cenário j , em toneladas

Os preços médios de sucata metálica foram obtidos junto a fornecedores, comercializadores dos referidos materiais considerando o ano base 2020. Os valores para ferro gusa foram obtidos no anuário estatístico do Instituto Aço Brasil (2021). Em seguida, os valores foram extrapolados com base no volume necessário para a produção de uma tonelada de aço bruto produzido pelas usinas e contrastados.

O preço médio da sucata de ferro obtido consultando os valores de compra e venda em empresas do ramo variou de R\$ 0,15/kg a R\$ 1,20/kg, logo para o cálculo foi considerado o valor de R\$ 1.200,00/t.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2021), no ano de 2020 o Brasil exportou 3,738 milhões de t de ferro gusa, o equivalente a 1,130 bilhão de US\$, logo, um preço médio de 302,48 US\$/t de ferro gusa, resultando em R\$1.560,80/t de ferro gusa, considerando a cotação média do dólar em 2020.

4.5.3 Valoração econômica ambiental do carbono emitido

Além disso, a avaliação da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) foi estimada utilizando os fatores de emissão de GEE provenientes das emissões diretas referentes a sucata e ao ferro gusa obtidos no material da World Steel Association (2021) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Fator de emissão de GEE do ferro gusa e da sucata.

Insumo	Fator de emissão (tCO _{2eq} /t)
Gusa de alto-forno	0,172
Sucata	0,005

Fonte – Adaptado de World Steel Association (2021).

A valoração econômica associada à emissão de GEE para cada usina e cenário proposto foi estimada com base no preço médio da tonelada de carbono no mercado mundial, que é de US\$10/t CO_{2eq}. (WORLD BANK GROUP, 2020) (Equação 4.4).

$$I_{CO_2j} = FE_s * Q_s * P_{CO_2} + FE_f * Q_f * P_{CO_2} \quad (4.4)$$

Em que:

I_{CO_2j} = valoração econômica ambiental do carbono emitido no cenário j, em R\$/t aço bruto

j= Cenários 1A, 2A, 3A, 4A, 1B, 2B, 3B ou 4B

FE_s = fator de emissão de CO₂ relacionado a sucata

Q_s = quantidade de sucata utilizada no cenário j, para produção de 1 t de aço bruto

FE_f = fator de emissão de CO₂ relacionado ao ferro gusa (líquido e sólido)

Q_f = quantidade de ferro gusa (líquido e sólido) utilizado no cenário j, na produção de 1 t de aço bruto

P_{CO_2} = preço da tonelada de dióxido de carbono equivalente, em reais

Para obter o resultado da economia proporcionada pela utilização da sucata, foi realizada a subtração do ICO₂ obtido para os cenários A, que substituem o ferro gusa pela sucata, como o 1A, 2A, 3A, 4A, do ICO₂ obtido para os cenários B, que utilizam ferro gusa, conforme equação 4.5.

$$V_{jA} = I_{CO_2jB} - I_{CO_2jA} \quad (4.5)$$

Em que:

V_{jA} = valoração econômica ambiental do carbono que deixa de ser emitido devido a utilização de sucata no cenário JA, em R\$/t aço bruto

I_{CO_2jA} = valoração econômica ambiental do carbono emitido no cenário jA, em R\$/t aço bruto

I_{CO2jB} = valoração econômica ambiental do carbono emitido no cenário jB , em R\$/t aço bruto

j = cenário 1, 2, 3 ou 4.

Além disso, foi realizada uma avaliação da emissão de GEE da parcela da carga metálica que diferencia cada cenário, para obter as diferentes emissões de GEE para a mesma massa de sucata e ferro gusa.

4.6 Obtenção dos Insumos Primários Dispensados

Para obter os resultados dos benefícios econômicos e ambientais do uso da sucata avaliou-se a cadeia de produção do ferro gusa para cada usina: na Usina A no abastecimento do conversor LD em substituição ao ferro gusa sólido, e na Usina B no abastecimento do FEA, também em substituição ao ferro gusa, líquido.

Essa avaliação foi realizada considerando os principais processos necessários para a obtenção do ferro gusa. Primeiramente, foi obtido o total de insumos necessários em cada cenário para suprir a demanda total de ferro gusa. Posteriormente, estimou-se a redução na quantidade de consumo de insumos devido ao uso da sucata para a UF adotada, e conseqüentemente a não produção de determinada quantidade de ferro gusa, conforme equação 4.6.

$$\text{Economia } X_{\text{cenário } jA} = X_{\text{cenário } jB} - X_{\text{cenário } jA} \quad (4.6)$$

Em que:

$\text{Economia } X_{\text{cenário } jA}$ = quantidade de insumo x poupado no cenário jA por tonelada de aço bruto, em toneladas

$X_{\text{cenário } jB}$ = quantidade de insumo x necessário no cenário jB para produção de uma tonelada de aço bruto, em toneladas

$X_{\text{cenário } jA}$ = quantidade de insumo X necessário no cenário jA para produção de uma tonelada de aço bruto, em toneladas

X = carvão mineral, carvão vegetal, calcário, minério de ferro ou energia elétrica

j = 1, 2, 3 ou 4

Tendo em vista que tanto o Cenário 4A quanto o Cenário 4B usam sucata metálica, a avaliação para a usina B foi feita com base nas diferenças nos montantes de sucata utilizados.

É importante ressaltar que tais resultados são provenientes da economia do ferro gusa, e que embora a reciclagem da sucata seja benéfica, a mesma também possui impactos agregados a ela que não foram estimados no presente estudo, tendo em vista que não foram encontrados na revisão bibliográfica estudos que fornecessem informações suficientes para realizar o cálculo.

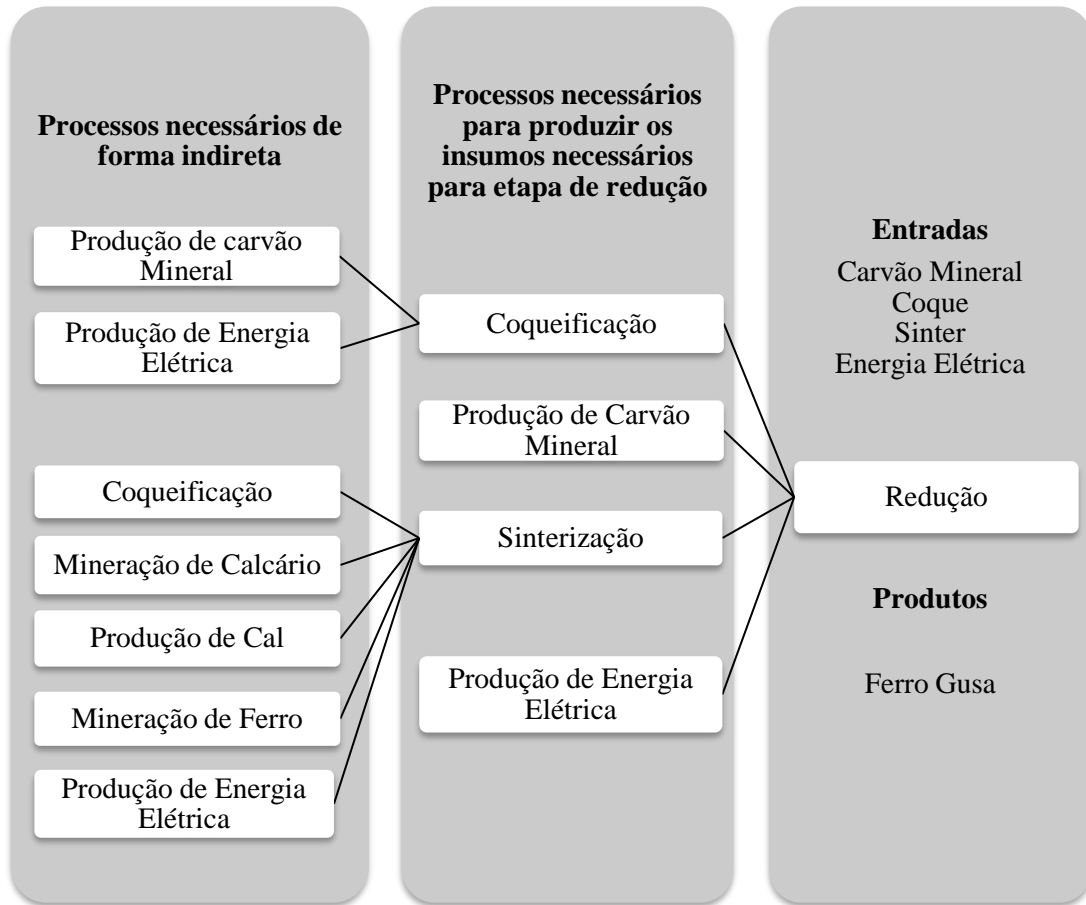
Apenas os principais insumos utilizados na produção do ferro gusa foram analisados, logo, além da análise do processo de redução, se fez necessária também a análise dos principais processos que a etapa de redução é dependente para obter a quantidade das matérias-primas relacionadas à produção do ferro gusa.

Os processos relacionados à cadeia do ferro gusa que foram usados para análise da utilização de sucata pela Usina A e B e obtenção das matérias-primas são: redução, sinterização, coqueificação e produção de cal. Quando da possibilidade de utilização dos dados primários para os processos avaliados supracitados, os mesmos foram priorizados. No entanto, para processos cujos dados da empresa não estavam disponíveis, utilizou-se dados oriundos da literatura.

Foram utilizados dados primários para avaliação do processo de redução e sinterização. Os processos de coqueificação e produção de cal foram avaliados com base em dados secundários.

O fluxograma simplificado de produção do ferro gusa da Usina A, incluindo os processos que foram avaliados são apresentados na Figura 4.4.

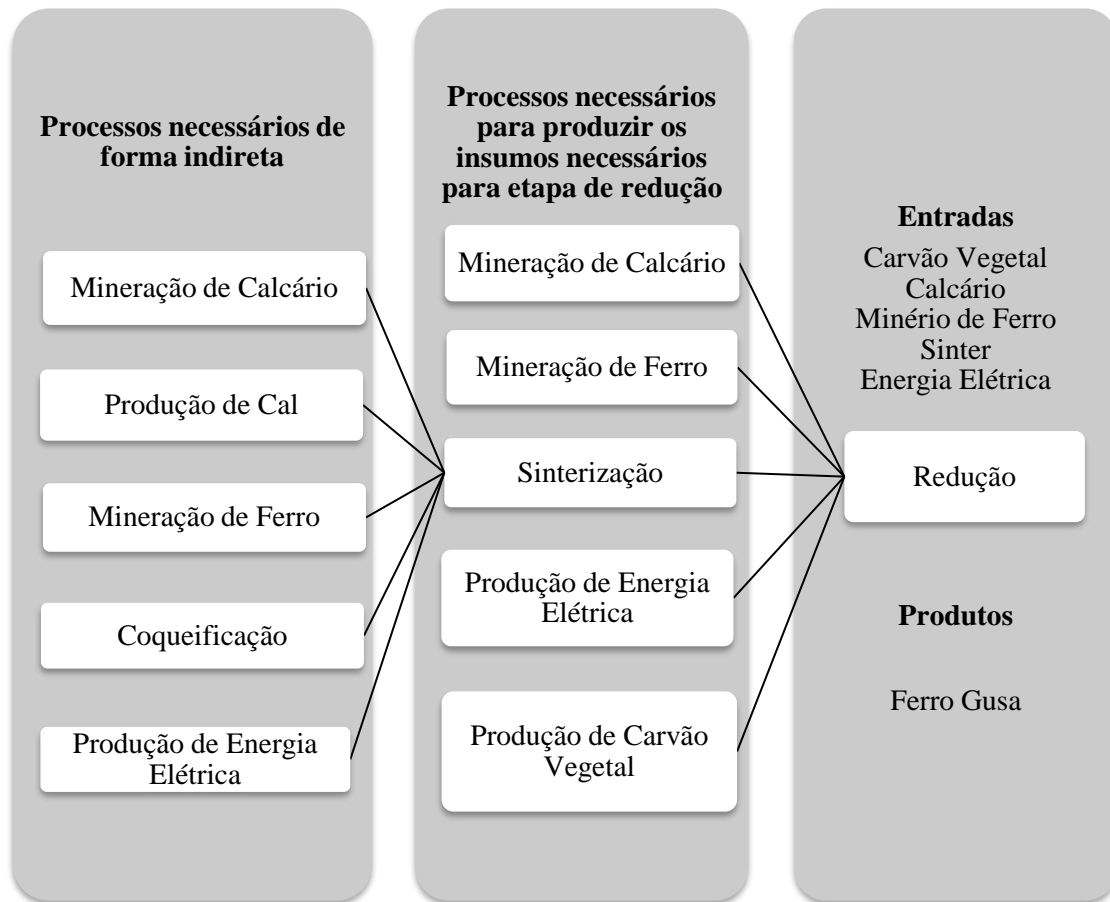
Figura 4.4 - Principais processos ligados diretamente e indiretamente à etapa de redução da Usina A.



Fonte – A autora (2021).

A Figura 4.5 apresenta o fluxograma simplificado de produção do ferro gusa que foi avaliado no estudo para obtenção dos resultados pretendidos para a Usina B.

Figura 4.5 - Principais processos ligados diretamente e indiretamente a etapa de redução da Usina B.



Fonte – A autora (2021).

4.7 Impactos Ambientais

Para o cálculo dos impactos referentes à obtenção das matérias-primas e insumos avaliados, como carvão mineral, minério de ferro e energia elétrica em ambas as usinas, foi utilizado o software livre *OpenLCA* 1.10.3 com a base de dados *Environmental Footprints* versão 3 presente na plataforma *openLCA Nexus* (2021). O método utilizado para a avaliação foi o *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*. Foram selecionados os impactos ambientais que o método possui capacidade de calcular para outras regiões além da Europa, conforme material de Recanati e Ciroth (2019).

Para a obtenção dos impactos referentes ao carvão vegetal, devido a não existência do mesmo na base de dados do *Environmental Footprints* e também de estudos de ACV que possuam dados compatíveis com o requerido por este estudo, foi utilizada a base de dados *Agribalyse*

versão 3, método IMPACT 2002+, também presente na plataforma openLCA Nexus (2021). É importante ressaltar que os impactos obtidos para esse insumo podem estar subestimados, tendo em vista que não foi possível encontrar o processo de carbonização da madeira, que produz o carvão vegetal, logo foi utilizado o processo de queima de madeira.

Devido a não existência do calcário nas bases de dados utilizada para os demais, os impactos da obtenção do calcário foram estimados com base no estudo de Kittipongvises (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação dos Dados das Usinas Estudadas

A Usina A utiliza como fonte de carbono o carvão mineral e o coque para a produção de aço bruto, enquanto a Usina B utiliza o carvão vegetal, essa diferença é consequência da tecnologia do equipamento utilizado no processo das plantas. Apesar dos outros insumos avaliados serem utilizados em ambas as plantas, ainda assim, foi observada diferença significativa entre o consumo médio de insumos para a obtenção uma tonelada de aço bruto (Tabela 5.1).

Tabela 5.1- Consumo médio de insumos para a produção de 1 t de aço bruto nas plantas A e B.

Insumos	Unidade	Usina A	Tipo de Insumo	Usina B	Tipo de Insumo
Carvão vegetal	t	-	-	0,224	¹
Carvão mineral	t	0,113	¹	-	-
Minério de ferro	t	1,257	¹	0,412	¹
Calcário	t	0,078	¹	0,038	¹
Cal	t	0,114	¹	0,016	¹
Eletricidade	MWh	0,136	¹	0,275	¹
Coque	t	0,316	¹	-	-
Sinter	t	1,462	²	0,010	¹
Ferro Gusa	t	0,912	²	0,547	¹ e ²
Sucata	t	0,205	¹	0,581	¹

¹ = insumo que foi obtido fora da usina

² = insumo produzido dentro da planta para obtenção do aço

Fonte – A autora (2021).

O processo realizado pela Usina A produz o próprio sinter e possui uma demanda maior desse insumo na planta. Logo, tendo em vista que no processo da Usina A o sinter é produzido,

consequentemente existe uma maior demanda dos insumos necessários à produção de sínter, como cal, calcário e minério em comparação a Usina B, que não produz sínter.

Além disso, também pode ser observada uma diferença significativa no consumo de sucata, eletricidade e ferro gusa entre as usinas. Isto ocorre principalmente devido à diferença de equipamento utilizado na etapa de refino primário. Na Usina B é utilizado o forno elétrico a arco, que permite a utilização de uma quantidade maior de sucata, no entanto, utiliza-se da eletricidade para realizar essa fusão, o que faz com que esses insumos sejam mais consumidos na planta B.

Em contrapartida, o conversor LD, que é utilizado na Usina A, permite o carregamento de uma menor quantidade de sucata e exige uma maior quantidade de ferro gusa, sendo assim, a Usina B tem um maior consumo de ferro gusa em comparação a Usina A. Tais pontuações acerca dos equipamentos foram baseadas na literatura consultada, logo, os resultados obtidos corroboram com Gonçalves (2005), Noldin Junior (2002) e Campos (1985 apud SILVA, 2012).

5.2 Avaliação da Utilização de Sucata nas Usinas e Cenários Propostos

5.2.1 Avaliação da carga metálica utilizada na Usina A e cenários propostos

A carga metálica que abastece o conversor LD na etapa de refino primário na Usina A para a produção de uma tonelada de aço bruto foi igual a 1,117 t, sendo que 18,4% corresponde a sucata metálica que foi fornecida para o equipamento. Além disso, não houve divergências relevantes em comparação aos artigos avaliados. Os referidos resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Avaliação da carga metálica do conversor Linz-Donawitz (LD).

Insumo	Unidade	Usina A	Artigo 1	Artigo 2
Ferro gusa	t/UF	0,912	0,908	0,991
Sucata	t/UF	0,205	0,284	0,129
Total Carga Metálica	t/UF	1,117	1,192	1,120
Sucata	%	18,4	23,8	11,5
Carga Metálica Sólida	%	18,4	23,8	11,5

Fonte – A autora (2021).

As porcentagens de sucata presentes na carga metálica do conversor LD (Tabela 5.2) corresponderam a uma variação de aproximadamente 12 a 24% da carga metálica total, corroborando com a faixa encontrada na literatura de 10 a 30%.

Diante disso, os resultados de porcentagem estão de acordo com o estudo de Noldin Junior (2002) e Broadbent (2016), isso porque as porcentagens de cargas sólidas utilizadas nos artigos avaliados e na Usina A se mantiveram dentro da faixa indicada pelos autores. Entretanto, observa-se que as porcentagens de carga sólida avaliadas se opõem ao trabalho de Mourão et al (2011), haja vista que a carga sólida utilizada no Artigo 1 ultrapassou os 20%.

Os Cenários 1B, 2B e 3B, embora utilizem uma diferente porcentagem de carga sólida, necessitam de uma produção de ferro gusa similar, tendo em vista que não utilizam sucata. Além disso, os cenários 1A, 2A e 3A, não possuem utilização de ferro gusa sólido, apenas ferro gusa líquido, haja vista que a carga sólida destes cenários é composta por sucata. As quantidades de carga sólida e líquida calculadas para cada um dos cenários propostos para a Usina A podem ser observadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Quantidade de insumos referentes aos cenários avaliados para Usina A.

Composição da carga metálica	Unidade	Cenário					
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
Carga metálica líquida							
Ferro gusa	t/UF	1,005	1,005	0,894	0,894	0,782	0,782
Carga metálica sólida							
Sucata	t/UF	0,112	-	0,223	-	0,335	-
Gusa sólido	t/UF	-	0,112	-	0,223	-	0,335
Total Carga Metálica	t/UF	1,117	1,117	1,117	1,117	1,117	1,117
Total Ferro gusa	t/UF	1,005	1,117	0,894	1,117	0,782	1,117

Fonte – A autora (2021).

O cenário 2A é o que mais se aproxima do atual cenário da Usina A, pois o cenário 2A faz a utilização de 20% do conversor LD carregado com carga sólida (sucata), e a Usina A faz a utilização de 18,4% do conversor carregado com carga sólida, também composta por sucata.

5.2.2 Avaliação da carga metálica utilizada na Usina B e cenários propostos

A Usina B, assim como a usina avaliada pelo Artigo 3 (Figura 4.3) da pesquisa bibliográfica, produz aço bruto por meio de forno elétrico a arco, no entanto, com diferentes quantidades de insumos abastecendo o FEA. A planta avaliada pelo Artigo 3 não faz a utilização de ferro gusa, diferentemente da Usina B, e possui uma demanda maior por cal e eletricidade, como pode ser observado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Insumos utilizados para abastecimento do Forno Elétrico a Arco da Usina B e do Artigo 3.

Insumos	Unidade	Usina B	Artigo 3
Cal	t/UF	0,016	0,043
Eletricidade	MWh/UF	0,234	0,400
Ferro Gusa	t/UF	0,547	-
Sucata	t/UF	0,581	1,152

Fonte – A autora (2021).

Não foi constatado na literatura, uma relação da porcentagem de utilização de sucata com o aumento desses insumos. Dessa forma, a avaliação realizada teve como foco apenas a carga metálica utilizada no FEA.

Na Usina B, 51,5% da carga metálica utilizada é composta por sucata, enquanto no Artigo 3, a carga metálica é composta totalmente por sucata. O valor total da carga metálica da usina do Artigo 3 e da Usina B apresentaram valores similares (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Composição da carga metálica do FEA na Usina B e Artigo 3.

Carga metálica	Unidade	Usina B	Artigo 3
Ferro Gusa	t/UF	0,547	-
Sucata	t/UF	0,581	1,152
Total	t/UF	1,128	1,152
% de sucata	-	51,5%	100%

Fonte – A autora (2021).

Para avaliação dos cenários propostos para análise da Usina B, foi mantido o total da carga metálica utilizada para a produção de uma tonelada de aço bruto na planta, ou seja, 1,128 t de carga metálica. As quantidades de insumos que compõem a carga metálica referentes aos cenários 4A e 4B são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Quantidade de insumos referentes aos cenários avaliados para a Usina B.

Composição da carga metálica	Unidade	Cenário	
		4A	4B
Carga metálica líquida			
Ferro gusa	t/UF	-	0,547
Carga metálica sólida			
Sucata	t/UF	1,128	0,581
Carga metálica total	t/UF	1,128	1,128

Fonte – A autora (2021).

O Cenário 4B corresponde à realidade da Usina B, tendo em vista que ocorreu a replicação dos dados da Usina B para a construção deste cenário.

5.3 Benefícios Gerados pelo Uso da Sucata

5.3.1 Ganhos econômicos

O impacto econômico devido à carga metálica total foi menor em todos os cenários que possuíam a substituição de uma parcela de ferro gusa por sucata em comparação aos cenários

que mantiveram a parcela de ferro gusa, ou seja, os cenários 1A, 2A, 3A e 4A apresentaram um impacto econômico menor comparado aos cenários 1B, 2B, 3B e 4B, respectivamente (Tabela 5.7). Esse comportamento era esperado, tendo em vista que o preço da sucata é menor que o do ferro gusa.

Pelo fato de não ter ocorrido alterações na quantidade e do tipo de insumos utilizados na composição da carga metálica dos cenários 1B, 2B e 3B para a Usina A, haja vista que não utilizam sucata, apenas ferro gusa (sólido e líquido) e levando em consideração o mesmo preço de mercado para o ferro gusa em ambos estados físicos, não houve diferenças no impacto econômico para os Cenários 1B, 2B e 3B (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 - Impacto econômico da carga metálica total em cada cenário avaliado.

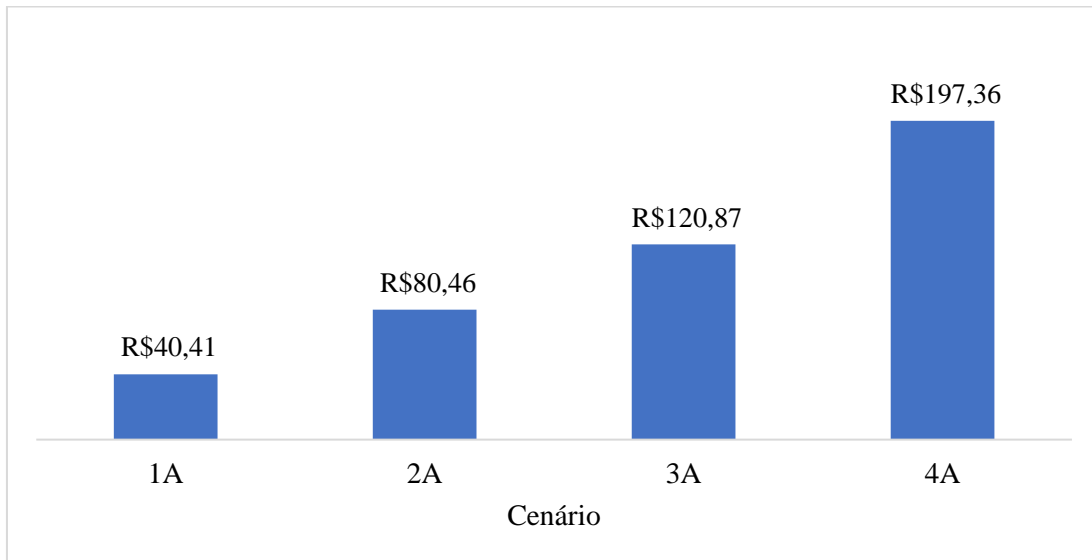
Impacto econômico (R\$/t de aço bruto)	1A	2A	3A	1B/2B/3B	4A	4B
	1.703,00	1.662,95	1.622,54	1.743,41	1.353,60	1.550,96

Fonte – A autora (2021).

O cenário 4B, embora não tenha a substituição da sua parcela de ferro gusa por sucata, apresentou um impacto econômico menor que todos os cenários da Usina A, até mesmo dos que fazem utilização de sucata na carga sólida. Esse resultado se deve ao fato do cenário 4B já possuir sucata em sua carga metálica. No entanto, é importante ressaltar que a carga metálica total dos cenários da Usina A não é igual à carga metálica dos cenários da Usina B, embora sejam próximas, devido às diferenças no sistema de produção.

O cenário 4A foi o cenário que apresentou maior ganho econômico com o uso da sucata metálica, sendo esse igual a R\$ 197,36/t de aço bruto, sendo seguido pelos cenários 3A, 2A e 1A, com economias de R\$ 120,87/t de aço bruto, R\$ 80,46/t de aço bruto e R\$ 40,41/t de aço bruto, respectivamente (Figura 5.1).

Figura 5.1 - Custo evitado com a utilização de sucata em cada cenário avaliado em substituição ao ferro gusa, em R\$/t aço bruto.



Fonte – A autora (2021).

Embora o preço da sucata seja menor que o do ferro gusa, a cotação da sucata foi realizada junto a pequenos sucateiros, anteriormente ao processamento, transporte, classificação e pré-tratamento realizado, logo, é possível que o valor tenha sido subestimado. Haja vista que o processo de tratamento da sucata, anterior à utilização desta na etapa de refino, tem um custo e agrega valor à mesma.

Caso todo o aço bruto produzido no Brasil utilizasse 100% de sucata para composição da carga metálica que abastece o forno elétrico a arco, em lugar de utilizar somente 51,5% de sucata, a sucata teria evitado um custo potencial de aproximadamente R\$ 6,2 bilhões, considerando o volume produzido no ano de 2020 (31,4 milhões de toneladas) de acordo com Instituto Aço Brasil (2021).

A utilização de 30% de sucata na rota integrada que é a rota que apresenta maior benefício dentre os cenários propostos para a usina integrada, em substituição ao ferro gusa, também considerando o volume de aço bruto produzido no Brasil em 2020, teria proporcionado uma economia de aproximadamente R\$ 3,8 bilhões.

Entretanto, conforme observado na revisão da literatura, segundo Instituto Aço Brasil (2018), é necessário a complementaridade entre as rotas existentes, haja vista que a demanda por sucata é maior que o volume gerado.

Além disso, a qualidade da sucata é um fator que também influencia na possibilidade de utilizar apenas a rota de produção de aço utilizando 100% de sucata, tendo em vista que não basta ter o volume de sucata, é necessário que a sucata possua qualidade adequada para suprir a necessidade da indústria. Isso pode ser observado no estudo de Energy Transitions Commission (2018), no qual é estimado que a produção de aço secundário tenha capacidade de atender até 85% da demanda da União Europeia até 2050, sendo essa estimativa condicionada à manutenção da qualidade da sucata.

Por outro lado, não foram encontrados na revisão da literatura estudos que tenham uma projeção similar à realizada para a União Europeia para o território brasileiro, bem como discuta sobre o estoque e a qualidade da sucata. Dessa forma, a discussão acima foi realizada com base no estudo de Energy Transitions Commission (2018).

5.3.2 Emissões evitadas de GEE

A utilização de sucata em substituição ao ferro gusa sólido no cenário 1A proporcionou uma redução nas emissões de GEE referente à carga metálica em 9,7% se comparado ao cenário 1B. Já nos Cenários 2A e 3A, a emissão foi ainda menor (19,4 e 29,1%) comparada aos Cenários 2B e 3B, respectivamente.

O Cenário 4A referente à Usina B foi o mais favorável em relação às reduções nas emissões de GEE quando comparado aos demais cenários. A emissão de GEE desse cenário apresenta percentuais de redução em comparação aos demais cenários que variam de 94,2% a 97,1% (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Emissão de GEE da carga metálica para cada cenário.

Unid.	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
(tCO ₂ eq/t de aço bruto)	0,173	0,192	0,155	0,192	0,136	0,192	0,006	0,097

Fonte – A autora (2021).

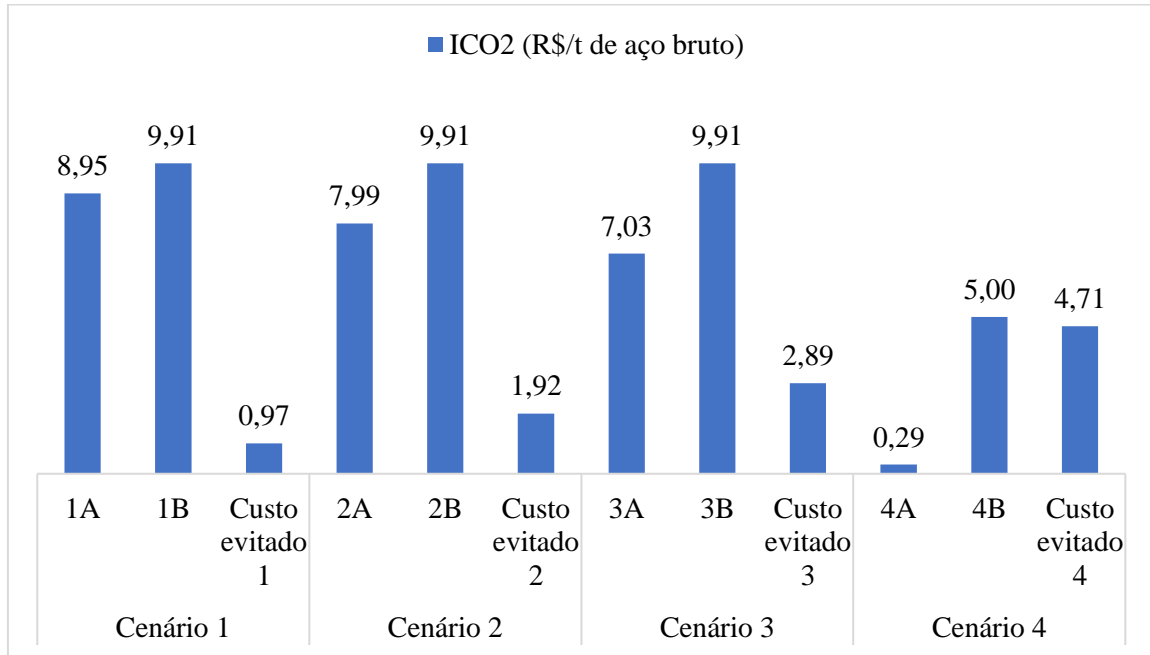
A redução dessas emissões de GEE representaram um custo evitado de R\$ 0,97, R\$ 1,92, R\$ 2,89 e R\$ 4,71 por tonelada de aço bruto, para os Cenários 1A, 2A, 3A e 4A nessa ordem, em comparação aos Cenários 1B, 2B, 3B e 4B, respectivamente (Figura 5.2).

O cenário 4A apresentou o maior custo evitado dentre os cenários avaliados, haja vista que também foi o cenário com a menor emissão de GEE. Isso se deve ao fato da tecnologia da Usina B permitir quantidades maiores de sucata, que possui um fator de emissão por tonelada de insumo inferior se comparado ao ferro gusa, o que faz com que uma grande quantidade de ferro gusa possa ser substituída pelo insumo secundário e resultar em uma menor emissão.

Dessa forma, tais resultados são consequência da diferença entre os fatores de emissão do ferro gusa e da sucata, e também da composição da carga metálica de cada cenário. Os cenários 1A, 2A e 3A possuem uma menor quantidade de ferro gusa devido à substituição de uma parcela pela sucata, em comparação aos cenários com porcentagem de carga sólida similar e composição diferente, como 1B, 2B e 3B, respectivamente. Em contrapartida, o cenário 4A não possui demanda de ferro gusa, sendo esse o principal motivo de possuir uma emissão de GEE abaixo dos demais cenários.

Desse modo, como a sucata possui um fator de emissão de carbono menor que o do ferro gusa, os cenários que utilizaram uma maior quantidade de sucata apresentaram redução na emissão de GEE e menor impacto econômico em comparação aos cenários que não utilizam sucata ou utilizam uma parcela menor desse insumo.

Figura 5.2 - Avaliação do ICO_2 da carga metálica total dos cenários avaliados e do custo evitado devido à utilização de sucata, em R\$/t aço bruto.



Fonte – A autora (2021).

Embora os cenários 1A e 1B, 2A e 2B, 3A e 3B utilizem a mesma porcentagem de carga sólida e a mesma massa total de carga metálica (1,117 t), a diferença no insumo que compõe a carga sólida resulta em uma emissão de GEE diferente e, conseqüentemente, variações no impacto econômico total. O mesmo acontece com relação à parcela do cenário 4 que foi composta por sucata no cenário 4A, e por ferro gusa no cenário 4B.

Tal fato pode ser observado avaliando separadamente a parcela da carga metálica que diferencia cada cenário, conforme Tabela 5.9. A emissão de GEE nos cenários 1A, 2A, 3A e 4A, apresentaram uma redução de 97,1% em comparação à emissão de GEE nos cenários 1B, 2B, 3B e 4B, respectivamente. Logo, podemos observar que a sucata tem a capacidade de reduzir as emissões de GEE em 97,1% em comparação ao ferro gusa para uma mesma quantidade de insumo.

Tabela 5.9 - Emissão de GEE da parcela da carga metálica que diferencia cada cenário.

Emissão GEE (tCO₂eq/t de aço bruto)								
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
Sucata	0,0006	-	0,001		0,002		0,003	
Gusa	-	0,019		0,038		0,058	-	0,094
Parcela que diferencia	0,0006	0,019	0,001	0,038	0,002	0,058	0,003	0,094
Parcela similar	0,173	0,173	0,154	0,154	0,135	0,135	0,003	0,003
Total carga metálica	0,173	0,192	0,155	0,192	0,136	0,192	0,006	0,097

Fonte – A autora (2021).

Embora a utilização de sucata reduza as emissões de GEE em 97,1% em comparação ao ferro gusa para uma mesma quantidade de insumo, a redução de GEE devido à utilização de sucata em toda a carga metálica foi menor. Isto porque ocorre a utilização de uma maior quantidade de insumos para completar a carga metálica, e não somente a essa parcela que diferencia os cenários.

A sucata apresenta uma grande vantagem com relação à emissão de GEE, tendo em vista que as emissões de carbono pela sucata foram menores que as emissões do ferro gusa, isto considerando uma mesma quantidade dos insumos. Consequentemente o impacto econômico observado devido às emissões de GEE também foi menor para a sucata.

5.3.3 Redução na dependência dos insumos primários

As quantidades de insumos primários necessários à produção da quantidade de ferro gusa em cada um dos cenários avaliados são resultantes da soma dos insumos primários necessários à etapa de redução e dos processos que originam os insumos para a etapa de redução, como sinterização, coqueificação e produção de cal.

Os cenários 1A, 2A, 3A não utilizam gusa-sólido, devido à substituição do insumo pela sucata nesses cenários. No entanto, é importante ressaltar que tais cenários consomem ferro gusa líquido.

Como os cenários 1B, 2B e 3B necessitam da mesma quantidade total de ferro gusa, os principais insumos utilizados na produção de ferro gusa, líquido e sólido, para esses cenários são apresentados em uma única coluna na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Principais insumos necessários para a produção de ferro gusa na etapa de redução em cada cenário avaliado.

Insumo	Unid.	Insumos necessários na etapa de redução para a produção de ferro gusa, por cenário							
		1A	2A	3A	1B 2B 3B	Dados utilizados	4A	4B	Dados utilizados
Carvão Vegetal	t	-	-	-	-	Usina A	-	0,360	Usina B
Carvão Mineral	t	0,117	0,104	0,091	0,130		-	-	
Calcário	t	-	-	-	-		-	0,061	
Coque	t	0,317	0,282	0,247	0,352		-	-	
Minério de Ferro		-	-	-	-		-	0,663	
Sinter	t	1,511	1,344	1,176	1,680		-	0,016	
Energia Elétrica	MWh	0,037	0,033	0,029	0,041		-	0,066	

Fonte – A autora (2021).

Não foi constatado consumo de cal na etapa de redução em alto-forno para as Usinas A e B, bem como para a etapa de redução avaliada no estudo de Burchat-Korol (2013). O estudo de Renzulli et al. (2016) apresentou um consumo de calcário abaixo do utilizado pela Usina B para a produção de uma tonelada de ferro gusa, discordando de Silva (2011), que enuncia que esse insumo tem maior relevância para alto-fornos a coque, embora o autor esclareça que as proporções de materiais variam em função da operação empregada.

Como o cenário 4A não consome ferro gusa e, conseqüentemente, não demanda a produção de ferro gusa, não há informações na Tabela 5.10 apresentada acima para a coluna do cenário 4A.

Desse modo, como não há consumo de ferro gusa no cenário 4A, a avaliação da cadeia de gusa não foi realizada para esse cenário. Assim, a Tabela 5.11 apresenta os principais insumos necessários à produção das quantidades de sinter demandadas para a produção de ferro gusa nos demais cenários.

Tabela 5.11 - Principais insumos necessários para a produção de sinter demandada em cada cenário.

Insumo	Unid.	Insumos necessários para a produção de sinter demandado para a produção de gusa por cenário					Dados utilizados
		1A	2A	3A	1B/2B/3B	4B	
Coque	t	0,010	0,009	0,007	0,011	1,043*10 ⁻⁴	Usina A
Calcário	t	0,072	0,064	0,056	0,081	7,847*10 ⁻⁴	Usina A
Cal	t	0,091	0,081	0,071	0,101	9,808*10 ⁻⁴	Usina A
Minério de Ferro	t	1,219	1,085	0,949	1,355	1,320*10 ⁻²	Usina A
Energia Elétrica	MWh	0,057	0,051	0,044	0,063	6,170*10 ⁻⁴	Usina A

Fonte – A autora (2021).

Como pode ser observado na Tabela 5.11, o coque é demandado na produção de sinter, logo, o total de coque necessário para a produção de ferro gusa, tendo em vista os insumos aqui avaliados, é igual ao somatório da quantidade demandada na etapa de redução e sinterização. A Tabela 5.12 apresenta os principais insumos necessários para a produção do coque demandado em cada cenário.

Tabela 5.12 - Principais insumos necessários para a produção de coque demandado em cada cenário.

Insumo	Unid.	Insumos necessários para a produção de coque demandado no cenário					Dados utilizados
		1A	2A	3A	1B 2B 3B	4B	
Carvão Mineral	t	0,432	0,385	0,336	0,481	$1,380 \cdot 10^{-4}$	Artigo 2
Energia Elétrica	MWh	0,016	0,015	0,013	0,018	$5,263 \cdot 10^{-6}$	Artigo 2

Fonte – A autora (2021).

Ademais, a produção do sinter também demanda cal, a Tabela 5.13 apresenta a quantidade dos principais insumos necessários para a produção de cal demandada em cada cenário.

Tabela 5.13 - Principais insumos necessários para a produção de cal demandada em cada cenário.

Insumo	Unid.	Quantidade de insumos necessários para a produção de cal demandado para a produção de sinter no cenário					Dados utilizados
		1A	2A	3A	1B/2B/3B	4B	
Calcário	t	0,134	0,119	0,104	0,149	$1,454 \cdot 10^{-3}$	Artigo 1
Energia Elétrica	MWh	$2,750 \cdot 10^{-3}$	$2,445 \cdot 10^{-3}$	$2,140 \cdot 10^{-3}$	$3,055 \cdot 10^{-3}$	$2,980 \cdot 10^{-5}$	Artigo 1

Fonte – A autora (2021).

Avaliada toda a cadeia de obtenção do ferro gusa considerando os processos analisados e definidos anteriormente, obteve-se as quantidades de insumos primários que são necessários para a obtenção da quantidade de ferro gusa em cada cenário avaliado.

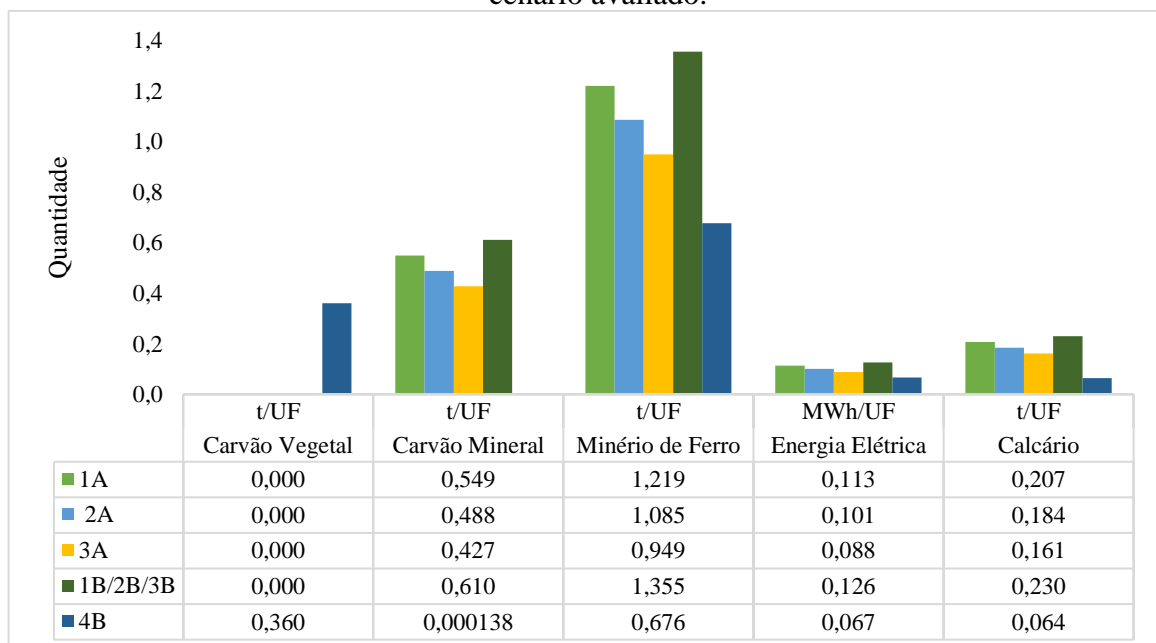
O cenário que apresentou um menor consumo de insumos primários dentre os cenários da Usina A, foi o cenário 3A. Tal resultado já era esperado, haja vista que é o cenário que utiliza uma maior porcentagem de sucata e, conseqüentemente, uma menor quantidade de ferro gusa.

O cenário 4B, que é o cenário que representa a realidade da Usina B, apresentou um consumo de insumos primários menor que os cenários da Usina A, com exceção do carvão vegetal. Esse menor consumo de insumos, excetuando-se o carvão vegetal, é consequência de uma menor necessidade de ferro gusa no cenário 4B, em comparação aos cenários da Usina A, que é resultante das diferentes tecnologias utilizadas em cada planta.

Dessa forma, particularmente, devido às diferentes tecnologias utilizadas na etapa de refino, a Usina B tem capacidade de utilizar uma maior quantidade de sucata em seu processo, dispensando uma maior quantidade de ferro gusa. O maior consumo de carvão vegetal pelo cenário 4B é resultado da fonte de carbono que é utilizada no processo, sendo essa, diferente da fonte utilizada nos cenários da Usina A.

O Cenário 2A, que é o cenário que mais se aproxima da realidade da Usina A, apresentou um consumo de insumos mediano dentre os cenários para a Usina A que tinham utilização de sucata, ou seja, apresentou um consumo maior que o cenário 3A e menor que o cenário 1A. Dessa forma, podemos observar na Figura 5.3 que, caso se opte por utilizar na Usina A uma maior porcentagem de sucata, similar ao cenário 3A, um menor consumo de insumos referente à produção de ferro gusa seria necessário.

Figura 5.3 - Insumos primários necessários para a produção de ferro gusa para cada cenário avaliado.



Fonte – A autora (2021).

O minério de ferro é o insumo primário com maior representatividade nos cenários avaliados para a Usina A e também para o cenário 4B da Usina B. Os insumos com a segunda maior representatividade de consumo foram o carvão mineral e o carvão vegetal, para os cenários da Usina A e para o cenário 4B da Usina B, respectivamente.

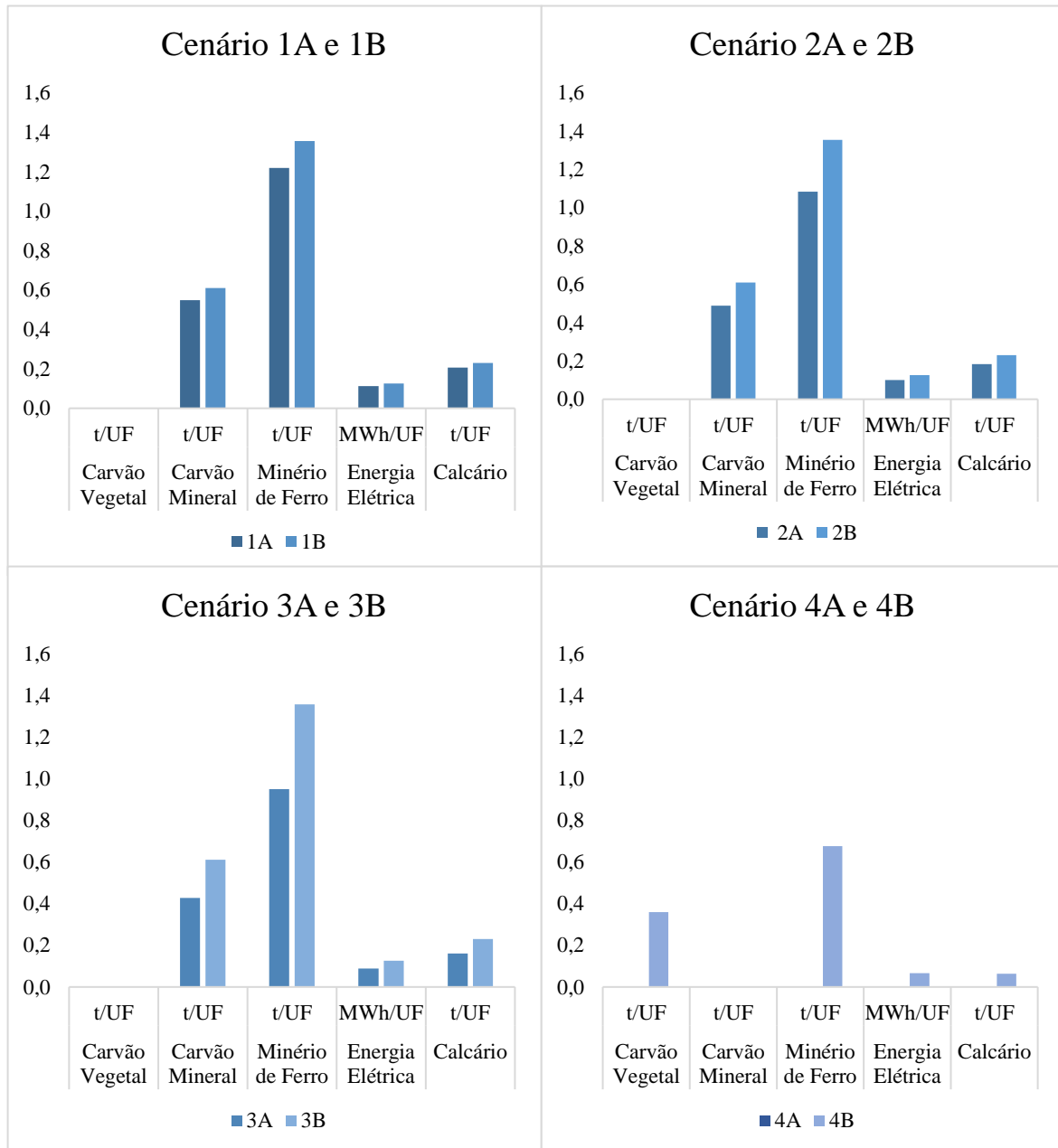
Todos os cenários que substituíram o ferro gusa pela sucata na Usina A (1A, 2A e 3A) apresentaram um menor consumo de insumos primários em comparação aos cenários cuja carga metálica era composta totalmente por ferro gusa (1B, 2B e 3B). Isso porque foi demandada uma quantidade menor de ferro gusa e, conseqüentemente, dispensou os insumos primários necessários à produção deste.

O maior benefício da utilização da sucata nos cenários da Usina A, ou seja, o menor consumo de insumos primários, foi observado no cenário 3A em comparação ao cenário 3B. Além disso, ocorreu um aumento desse benefício à medida que a carga de sucata aumentou nos cenários da Usina A, sendo esse aumento devido à maior porcentagem de carga sólida. Logo, o cenário 3A consumiu menos insumos primários, seguido pelo cenário 2A, e posteriormente pelo cenário 1A, que pode ser observado devido à diferença de consumo entre os cenários.

A diferença de consumo de insumos devido à produção de ferro gusa foi mais evidente na comparação entre os cenários 4A e 4B, haja vista que o cenário 4A não possui demanda de ferro gusa, portanto, não tem consumo de insumos primários associados a ele com essa finalidade.

A Figura 5.4 apresenta o consumo de insumos primários devido à produção de ferro gusa agrupados por cenários que usam a mesma porcentagem de carga sólida, no caso da Usina A, e agrupado também os dois cenários da Usina B.

Figura 5.4 - Consumo de insumos primários para a produção de ferro gusa em cada cenário avaliado.



Fonte – A autora (2021).

Ao avaliar de maneira conjunta os cenários propostos para ambas as Usinas, observa-se que ocorreu uma redução mais expressiva na demanda de insumos (exceto carvão vegetal e calcário), devido à utilização de sucata no cenário 4A em comparação ao 4B, do que nos demais cenários propostos para a Usina A que possuíam utilização de sucata (Figura 5.5). Isso porque a quantidade de ferro gusa que foi substituída pela sucata no cenário 4A é maior

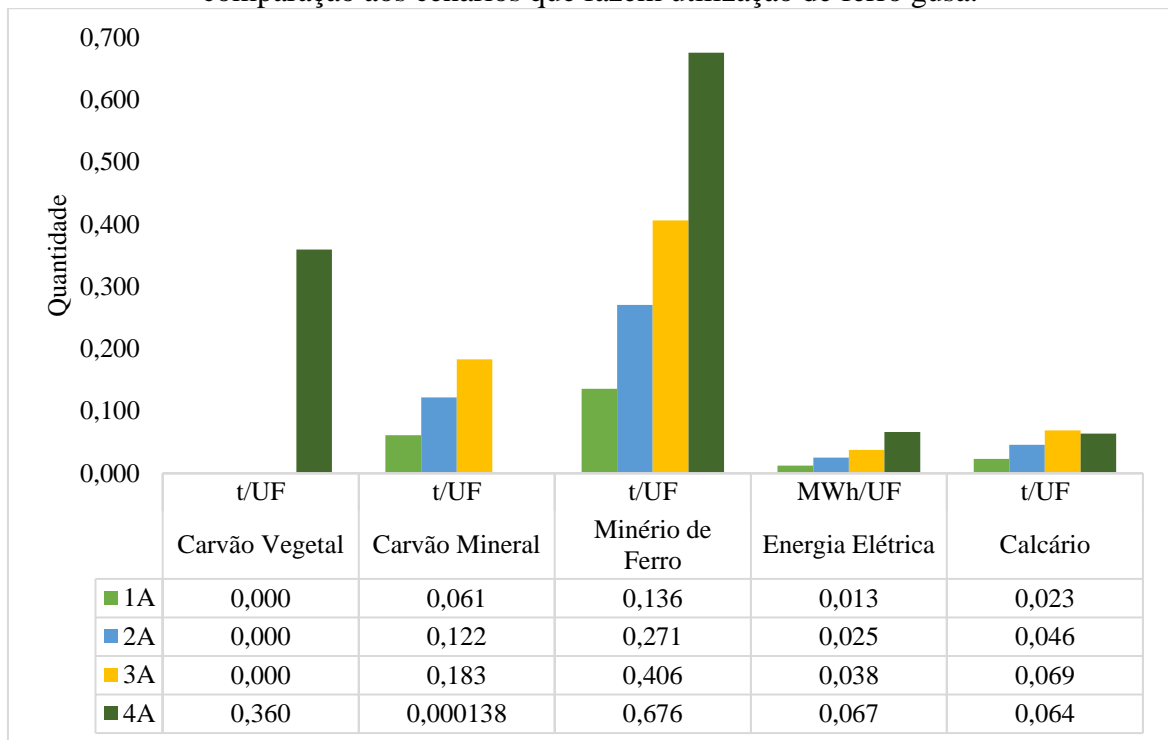
que nos cenários 1A, 2A e 3A da Usina A, devido à utilização de Forno Elétrico a Arco na Usina B, o que permite uma maior utilização de sucata.

Ressalta-se que o cenário 4B, diferentemente dos cenários 1B, 2B e 3B, utiliza sucata metálica. Além disso, a avaliação dos insumos primários poupados no cenário 4A, tratou apenas do que seria dispensado devido à substituição da parcela de ferro gusa utilizada por sucata.

Dessa forma, não foi possível estimar o benefício gerado por toda a carga de sucata presente no cenário 4A, apenas da parcela que substitui o ferro gusa, tendo em vista que a Usina B possui capacidade de utilizar 100% de sucata no abastecimento do FEA, conforme literatura consultada.

A Figura 5.5 apresenta os insumos primários que foram poupados nos cenários 1A, 2A, 3A e 4A, devido à utilização de sucata, em comparação aos cenários 1B, 2B, 3B e 4B, respectivamente.

Figura 5.5 - Insumos primários poupados nos cenários que fazem utilização de sucata em comparação aos cenários que fazem utilização de ferro gusa.



Fonte – A autora (2021).

Os benefícios foram estimados com base na redução do consumo de ferro gusa para cada cenário. Não foram calculados no estudo os benefícios referentes aos insumos poupados considerando a carga ambiental que a sucata possui. No entanto, é importante ressaltar que a mesma não é isenta de aspectos e impactos.

Dentre os cenários da Usina A, o cenário 3A foi o que apresentou maior economia de insumos devido à utilização de sucata ao ser comparado com o cenário 3B, ou seja, a utilização de 30% de carga sólida composta por sucata se mostrou mais vantajosa. Isso confirma o que era esperado, tendo em vista que o cenário 3A possui uma menor demanda de ferro gusa que os demais cenários da Usina A.

O cenário 2A, que representa a realidade da Usina A, devido à utilização de sucata em seu processo, reduziu a utilização de carvão mineral, minério de ferro, energia elétrica e calcário em 20%, sendo essa exatamente a porcentagem de carga sólida composta por sucata utilizada, e conseqüentemente a porcentagem de ferro gusa que não foi produzida. Entretanto, caso a Usina A adotasse uma carga sólida de 30% de sucata, teria maiores economias, conforme cenário 3A.

Embora não seja possível a utilização de apenas uma das rotas na atualidade, o aumento da porcentagem da carga de sucata utilizada pelas plantas pode ser considerado. A Usina A utiliza aproximadamente 20% de sua carga metálica composta por sucata, logo, o aumento nessa porcentagem, utilizando até 30%, proporcionaria ainda mais ganhos ambientais e econômicos.

O aumento na porcentagem de sucata até 30% está dentro da faixa encontrada na literatura, logo, é válido. Além disso, o estudo de Burchat-Korol (2013), encontrou médias de utilização de sucata na siderurgia integrada Polonesa em torno de 24%, 4% a mais que a Usina A. Dessa forma, temos que para as usinas siderúrgicas integradas da Polônia foi viável esse aumento na porcentagem da sucata.

Embora não tenham sido encontrados estudos que sirvam de base e evidência desse aumento da porcentagem no território brasileiro, existem diversos estudos como Noldin Junior (2002)

e Broadbent (2016) que citam que essa porcentagem de utilização de sucata pode chegar até 30% para integradas.

O resultado obtido referente aos insumos poupados devido à utilização de sucata para o cenário 4A pode ser interpretado como a quantidade de insumos que a Usina B economizaria caso utilizasse 100% de sucata no FEA, assim como o Artigo 3. Dessa forma, a Usina B dispensaria a obtenção de toda a quantidade de insumos referentes à produção de ferro gusa, o equivalente a 0,360 t de carvão vegetal, 0,676 t de minério de ferro, 0,067 MWh de energia elétrica e 0,064 t de calcário, por tonelada de aço bruto.

A utilização de 100% de sucata na rota semi-integrada possui ganhos ambientais e econômicos, e é realizada nas usinas semi-integradas da Polônia, conforme estudo de Burchat-Korol (2013). Dessa forma, o aumento na utilização de sucata pela Usina B proporcionaria tais ganhos. Entretanto, é importante ressaltar que a viabilidade desse aumento para as usinas semi-integradas do Brasil é dependente do volume disponível e da qualidade da sucata no território brasileiro, e segundo Rossi (2014), a utilização do ferro gusa sólido é comum devido à escassez da sucata no mercado brasileiro.

5.3.4 Avaliação dos impactos ambientais dos insumos primários

Os resultados obtidos no software OpenLCA com o método Environmental Footprints, referente à obtenção dos insumos primários: energia elétrica, minério de ferro e carvão mineral, refletiram o resultado do consumo desses insumos. Portanto, os cenários que demandaram por maiores quantidades de insumos também obtiveram maiores impactos ambientais associados (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 - Impactos ambientais estimados para cada cenário considerando a obtenção de energia elétrica, carvão mineral e minério de ferro.

Categoria de Impacto	Unidade	1A	2A	3A	1B/2B/3B	4B
Mudança climática	kg CO ₂ eq.	204,442	181,767	159,033	227,176	16,618
Ecotoxicidade água doce	CTUe	22,931	20,395	17,842	25,483	5,688
Radiação ionizante - saúde humana	kBq U-235 eq.	0,995	0,886	0,775	1,106	0,449
Uso da Terra	pt	962,545	856,454	749,174	1069,825	401,122
Destruição do ozônio	kg CFC-11 eq.	1,183*10 ⁻⁹	1,052*10 ⁻⁹	9,205*10 ⁻¹⁰	1,314*10 ⁻⁹	5,820*10 ⁻¹⁰
Uso de recursos fósseis	MJ	15668,997	13928,374	12187,227	17410,144	177,930
Uso de recursos minerais e metais	kg Sb _{eq.}	6,393*10 ⁻⁵	5,695*10 ⁻⁵	4,977*10 ⁻⁵	7,110*10 ⁻⁵	3,492*10 ⁻⁵
kg CO _{2eq} – Quilograma de dióxido de carbono equivalente					pt – ponto	
CTUe- Ecotoxicidade de unidades tóxicas comparativas					MJ – Megajoule	
kBq U-235 _{eq} – Quilobecquerel de Urânio-235 equivalente					Kg Sb _{eq} – Quilograma de antimônio equivalente	
kg CFC-11 _{eq} – Quilograma de tricloromonofluormetano equivalente						

Fonte – A autora (2021).

A utilização de uma maior quantidade de sucata em substituição ao ferro gusa, cenário que já é realidade na siderurgia, proporciona a redução de impactos ambientais referente a obtenção dos insumos primários necessários para a produção do ferro gusa, conforme observado na Tabela 5.14. Dessa forma, os cenários com maior utilização de sucata apresentaram menor impacto, decorrente da necessidade de uma menor quantidade ferro gusa e, conseqüentemente, da obtenção de insumos primários necessários para a produção desse insumo.

A categoria de impacto denominada mudança climática, expressada em kg CO_{2eq}, foi um dos impactos calculados no software OpenLCA. É importante ressaltar a diferença entre essa categoria de impacto e as emissões de GEE associadas ao ferro gusa que foram calculadas anteriormente, haja vista que possuem a mesma unidade. As emissões de GEE associadas ao

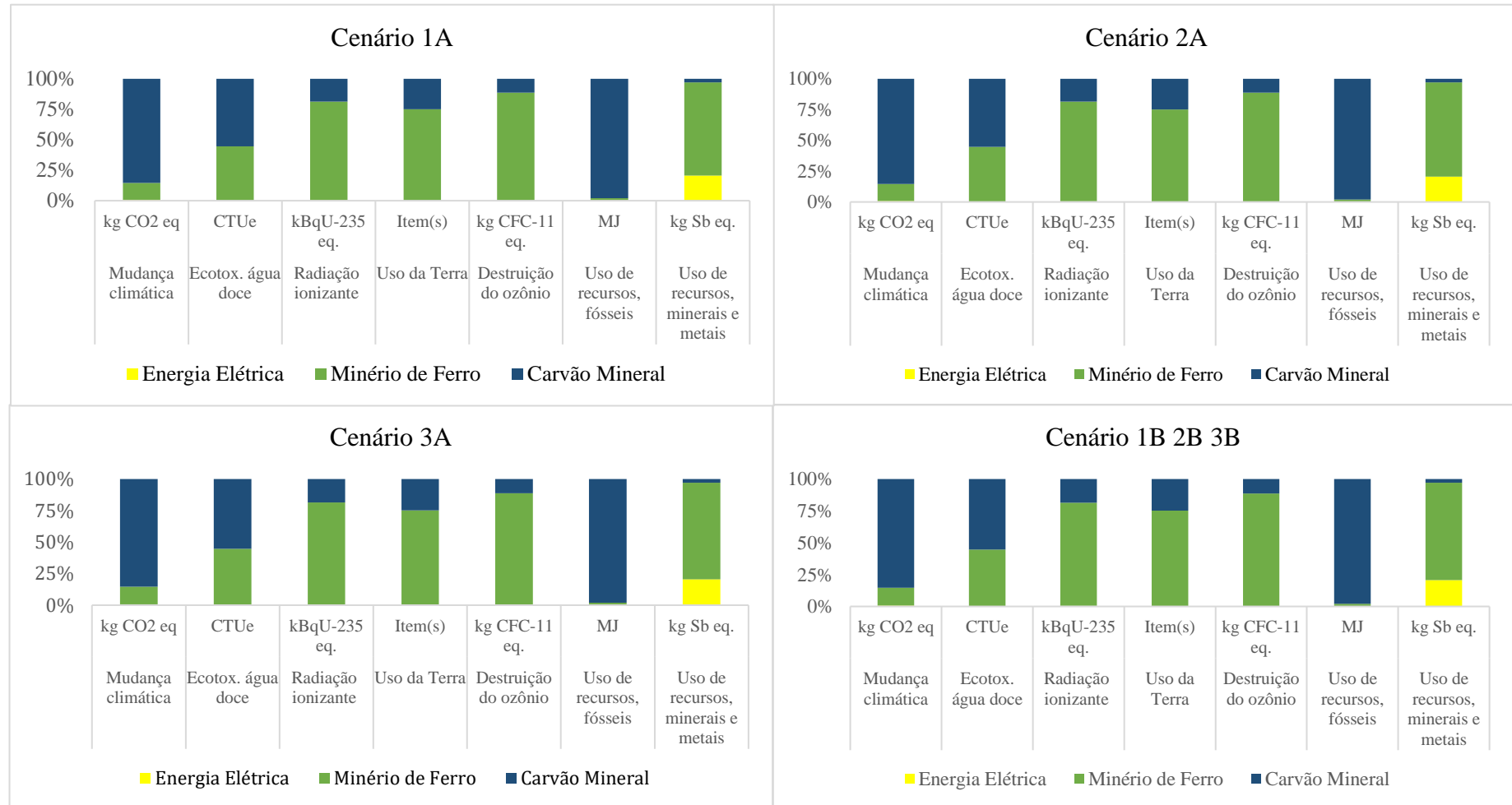
ferro gusa calculadas anteriormente por meio dos fatores de emissão diz respeito às emissões devido à utilização do ferro gusa no processo. Em contrapartida, o impacto de mudança climática diz respeito ao impacto causado devido à obtenção dos insumos primários necessários à produção de ferro gusa.

Nos cenários avaliados para a Usina A, o comportamento da contribuição de cada processo de obtenção dos insumos primários para as categorias de impacto ambiental avaliadas se manteve similar. Dessa forma, o quanto cada processo de obtenção de insumos contribuiu para a ocorrência dos impactos apresentou a mesma proporção entre os cenários da Usina A.

Essa similaridade é consequência da forma de produção do ferro gusa, que é a mesma para ambos os cenários da Usina A, embora haja uma relação direta entre consumo e impacto, ou seja, quanto maior o consumo de insumos primários, maior foi o impacto apresentado pelo cenário.

De acordo com os resultados obtidos, o minério de ferro foi o insumo que mais contribuiu para a geração de impactos ambientais para cada cenário avaliado. A obtenção de minério de ferro, foi a maior responsável pelos impactos referentes à radiação ionizante, ao uso da terra, à destruição da camada de ozônio, e ao uso de recursos minerais e metais dos cenários avaliados na Usina A. O processo de obtenção do carvão mineral teve maior influência nos impactos referentes à ecotoxicidade de água doce, mudança climática e uso de recursos fósseis (Figura 5.6).

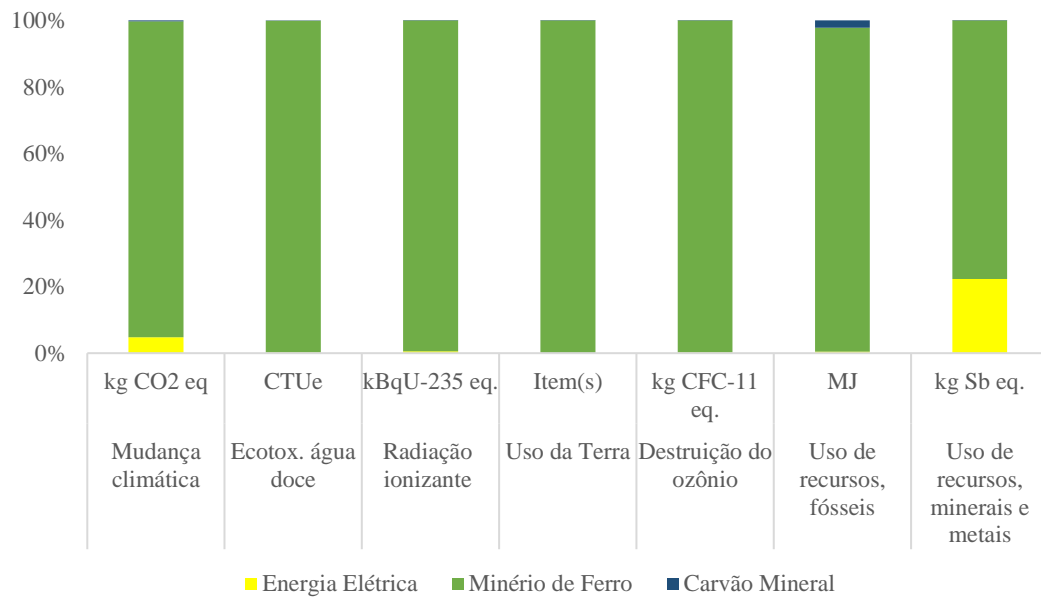
Figura 5.6 - Representatividade da obtenção dos insumos com relação aos impactos avaliados para os cenários da Usina A.



Fonte – A autora (2021).

O cenário 4B, por outro lado, por apresentar menor demanda por carvão mineral e por utilizar alto-forno a carvão vegetal para obtenção do ferro gusa na planta, teve seus impactos ambientais estimados decorrentes principalmente da produção de minério de ferro e uma baixa geração de impactos ambientais relacionados ao carvão mineral (Figura 5.7).

Figura 5.7 - Representatividade dos insumos com relação aos impactos avaliados para o cenário 4B.



Fonte – A autora (2021).

Pelo fato do cenário 4A não possuir demanda de ferro gusa, uma vez que é abastecido totalmente por sucata, não existem impactos associados à obtenção dos insumos primários, haja vista que os insumos primários calculados são referentes à demanda associada à produção de ferro gusa em cada cenário.

Assim como os impactos apresentados anteriormente na Tabela 5.14 referente à obtenção de carvão mineral, minério de ferro e energia elétrica, os impactos para calcário obtidos pelo método IMPACT 2002+, também foram maiores a depender da quantidade de insumos necessários em cada cenário. Como o cenário 4B tem um menor consumo de calcário com relação aos demais cenários, seus impactos associados à obtenção do calcário também foram menores. A Tabela 5.15 apresenta os impactos correspondentes à obtenção do calcário de acordo com a quantidade demandada em cada cenário.

Tabela 5.15 - Impactos obtidos em cada cenário considerando a obtenção de calcário.

Categoria de Impacto	Unidade	1A	2A	3A	1B/2B/3B	4B
Acidificação aquática	kg SO ₂ eq.	2,960*10 ⁻³	2,631*10 ⁻³	2,302*10 ⁻³	3,289*10 ⁻³	9,152*10 ⁻⁴
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq.	0,571	0,508	0,444	0,635	1,766*10 ⁻¹
Ocupação da terra	m ² arável	8,818*10 ⁻³	7,838*10 ⁻³	6,859*10 ⁻³	9,798*10 ⁻³	2,726*10 ⁻³
Energia não renovável	MJ	16,477	14,646	12,816	18,308	5,094
Ecotoxicidade aquática	kg triglicol água	9,770	8,685	7,599	10,856	3,021
Radiação ionizante	Bq C-14 eq.	7,038	6,256	5,474	7,82	2,176
Destruição do ozônio	kg CFC-11 eq.	3,623*10 ⁻⁸	3,220*10 ⁻⁸	2,818*10 ⁻⁸	4,025*10 ⁻⁸	1,120*10 ⁻⁸
Extração mineral	MJ	0,013	0,011	0,010	0,014	0,004

kg SO₂eq. – Quilograma de dióxido de enxofre equivalente kg triglicol água– Quilograma de triglicol na água
kg CO₂eq. – Quilograma de dióxido de carbono equivalente Bq C-14_{eq} – Becquerel de Carbono-14 equivalente
m² arável – Metro quadrado arável (cultivável) kg CFC-11eq – Quilograma de triclоромоноfluоrmetano equivalente
MJ – Megajoule

Fonte – A autora (2021).

Segundo Kittipongvises (2017), a produção de calcário tem como seus principais impactos ambientais as categorias que englobam recursos e mudanças climáticas, sendo representados pelas categorias de impacto: extração mineral, energia não renovável e aquecimento global. Diante disso, podemos concluir que um menor consumo de calcário proporcionaria um menor impacto ambiental principalmente nas categorias supracitadas.

Tendo em vista que apenas o cenário 4B demanda por carvão vegetal, a análise dos impactos da obtenção desse insumo se aplica somente a este cenário. Por ser um dos principais insumos do cenário 4B, seria interessante compará-lo em conjunto com os impactos obtidos para todos os cenários para o carvão mineral, minério de ferro e energia elétrica. No entanto, como não foi possível realizar a análise pelo mesmo método, a avaliação da obtenção carvão vegetal foi realizada individualmente, conforme apresenta Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Impactos obtidos no cenário 4B considerando a obtenção de carvão vegetal.

Categoria de Impacto	Unidade	4B
Acidificação aquática	kg SO ₂ eq.	0,103
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq.	2,837
Ocupação da terra	m ² org.arável	0,024
Energia não renovável	MJ	36,194
Ecotoxicidade aquática	kg triglicol na água	67,139
Radiação ionizante	Bq C-14 eq.	15,432
Destruição do ozônio	kg CFC-11eq.	3,767*10 ⁻⁷
Extração mineral	MJ	0,211

kg SO₂eq. – Quilograma de dióxido de enxofre equivalente
kg CO₂eq. – Quilograma de dióxido de carbono equivalente
m² arável – Metro quadrado arável (cultivável)
MJ – Megajoule
kg triglicol água– Quilograma de triglicol na água
Bq C-14eq – Becquerel de Carbono-14 equivalente
kg CFC-11eq – Quilograma de Tricloromonofluormetano equivalente

Fonte – A autora (2021).

Pelo fato dos impactos do calcário e carvão vegetal terem sido obtidos por meio do método IMPACT 2002+, não foi possível realizar a avaliação dos impactos desses consumos em conjunto com os demais.

Por fim, foi observado que os benefícios ambientais e econômicos foram maiores nos cenários que apresentaram maior porcentagem de sucata. Logo, o Cenário 4A, que utiliza 100% de sucata, foi o que apresentou maiores ganhos econômicos e menores impactos ambientais, haja vista que não possui demanda de ferro gusa, e conseqüentemente reduz o consumo de insumos primários, conforme mensurado, e de impactos ambientais agregados à obtenção desses insumos. O Cenário 4B foi o segundo cenário que apresentou maiores ganhos ambientais e econômicos, seguido pelos cenários 3A, 2A e 1A.

Embora os impactos ambientais referentes a obtenção da sucata não tenham sido avaliados nesse estudo, sendo avaliado apenas os impactos devido a obtenção das matérias-primas necessárias a produção do insumo substituto da sucata, o ferro gusa. Os resultados encontrados

complementam e concordam com o potencial da sucata apontado pela pesquisa de Perez (2008) e Trindade Junior (2013).

O estudo de Perez (2008) enuncia que a sucata é o material mais próximo quimicamente do material utilizado em um ciclo do aço original, e possui um menor consumo de energia e reduz os impactos ambientais em comparação aos insumos utilizados que são produzidos por meio de matérias-primas como minério de ferro e carvão. A pesquisa de Trindade Junior (2013), embora não apresente dados quantitativos, enuncia que a reciclagem do aço reduz o consumo de combustíveis fósseis, bem como a poluição correspondente a extração e beneficiamento de matérias-primas.

A complementação oferecida por esse estudo ao enunciado pela pesquisa de Perez (2008) e Trindade Junior (2013) é proveniente dos dados quantitativos obtidos nessa pesquisa com relação a redução no consumo de matérias primas e menor geração de impactos, devido à utilização de determinada quantidade de ferro gusa, quando da utilização de sucata nos cenários propostos.

6 CONCLUSÕES

O uso de sucata metálica apresenta benefícios econômicos e ambientais tanto para a usina integrada (Usina A) quanto para a usina semi-integrada (Usina B) avaliada. Ao comparar os cenários avaliados observa-se, que quanto maior o percentual de sucata utilizada mais elevados são os ganhos econômicos e ambientais. Deste modo, a utilização da sucata na carga metálica no refino primário deve ser incentivada.

A sucata possui um valor econômico mais baixo em comparação ao seu insumo substituto, proporcionando assim uma economia ao processo devido à sua utilização. Ademais, a aplicação da sucata proporciona uma redução nas emissões de GEE e um ganho econômico devido ao custo evitado referente à valoração econômica do carbono.

A utilização da sucata proporciona benefícios ambientais devido a uma redução na utilização de ferro gusa, e conseqüentemente, na economia de matérias-primas necessárias à produção desse insumo, como minério de ferro, carvão mineral, carvão vegetal, eletricidade e calcário. Os cenários que apresentaram maiores porcentagens de utilização de sucata, pouparam uma maior quantidade de insumos, e, conseqüentemente apresentaram maior redução de impactos associados a obtenção desses insumos.

A produção de minério de ferro é a principal fonte de impacto ambiental referente à produção do ferro gusa dentre os insumos avaliados para ambas as plantas. O carvão mineral também apresenta relevância para a Usina A por se tratar de um combustível fóssil, sendo sua utilização a principal responsável por alguns dos impactos avaliados.

A redução no consumo de minério no processo, e conseqüentemente a não obtenção do insumo, tem maior expressividade na redução das categorias de impactos como: radiação ionizante, uso da terra, destruição do ozônio e uso de recursos minerais e metais. A redução no consumo de carvão mineral tem maior contribuição na redução das categorias de impacto referentes à ecotoxicidade de água doce, mudança climática e uso de recursos fósseis.

A Usina B, por utilizar maior quantidade de sucata para a produção de aço, e carvão vegetal como insumo de produção em detrimento do carvão mineral, apresenta menor impacto ambiental e custos inferiores comparados à Usina A. Apesar de não ter sido possível realizar a

comparação dos impactos relacionados à obtenção do carvão vegetal pelo mesmo método dos demais insumos, acredita-se que ele é a segunda matéria-prima que tem maior influência nos impactos da Usina B, haja vista que é um dos insumos mais utilizados.

7 RECOMENDAÇÕES

Devido a não possibilidade de avaliação dos benefícios da sucata incluindo também seus aspectos e impactos agregados, sugere-se a realização de trabalhos voltados para a obtenção dos aspectos e impactos ambientais agregados à sucata, para aprimoramento da avaliação dos benefícios da utilização da sucata, tendo em vista que no desenvolvimento deste trabalho não foi encontrado na literatura esse conteúdo. Logo, de posse das informações supracitadas acerca da sucata, sugere que seja feita uma avaliação dos benefícios da utilização da sucata, considerando também essa carga agregada a ela.

Além disso, é recomendável que em futuros trabalhos sobre o tema, a avaliação de impactos dos insumos primários seja realizada pelo mesmo método, o que não foi possível realizar no trabalho aqui apresentado devido à insuficiência de informações na base de dados utilizada e suas limitações.

Como há variação na qualidade da sucata metálica disponível no mercado, recomenda-se que seja feito um estudo complementar considerando as características da sucata metálica para verificar a carga ótima de sucata que pode ser utilizada para a produção de aço bruto. É recomendado também que seja feita uma análise específica por tipo de aço, tendo em vista a existência de uma grande quantidade de variações desse produto.

Não foram encontrados estudos acerca do estoque de sucata no mercado brasileiro. Dessa forma, recomenda-se que sejam realizados estudos sobre a projeção de sucata disponível nas próximas décadas e a qualidade desse material em território brasileiro.

8 REFERÊNCIAS

ABDALLA, Fernando Antônio; SAMPAIO, Antônio Carlos Freire. Os novos princípios e conceitos inovadores da economia circular. **Entorno Geográfico**, [S.L.], n. 15, p. 82-102, 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida:2014**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

AGUIAR, Péricles Guimarães Oliveira. **Balço de massa integrado do ferro gusa entre altos-fornos e aciaria da Aperam South America**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ANDRADE, Maria Lúcia Amarante de; CUNHA, Luiz Maurício da Silva; GANDRA, Guilherme Tavares; RIBEIRO, Caio Cesar. **Mercado mundial de sucata**. [S.L.]: Ao2/Gesis, 2000. 10 p.

BATISTA, Daniella Cristina. **Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação da viabilidade de aplicações**. 2014. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências: Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BORGES, Ronaldo Adriano Alvarenga. **Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço (convertedores LD) minimizando custo**. 2016. 87 p. Monografia (Especialização em Otimização de Sistemas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BRAGA JUNIOR, Sergio Silva; PINHEIRO, Luciane Ribeiro Dias. A importância da reciclagem dos resíduos sólidos dentro das organizações. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 55-69, 2013.

BROADBENT, Clare. Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 21, n. 11, p. 1658-1665, 2016.

BURCHART-KOROL, Dorota. Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 54, p. 235-243, set. 2013.

CASTRO, José Adilson; AFRANÇA, Lexandre Bôscaro; GUILHERME, Vagner Silva; SAZAKI, Yasushi. Estudo numérico da influência de propriedades de amolecimento e fusão na cinética de formação de $(CaFe_2O_4-Ca_2Fe_2O_5)$ na sinterização de minério de ferro. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 17-27, 2013.

CARVALHO, Maria Beatriz Maury de. Avaliação de Ciclo de Vida. **Sustentabilidade em Debate**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 123-124, 2010.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Modernização da produção de carvão vegetal: Subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015. 150 p.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Perfil da Indústria Brasileira**. 2021. Disponível em: <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/#/industria-transformacao>. Acesso em: 24 ago. 2021

COSTA, Natália Rodrigues. **Economia circular como proposta para o processo industrial siderúrgico nacional**. 2017. 1 v. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação em Economia do Meio Ambiente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DEMUS, Thorsten; ECHTERHOF, Thomas; PFEIFER, Herbert; SCHULTEN, Marc; NOEL, Yves; QUICKER, Peter. Investigations on the use of biogenic residues as a substitute for fossil coal in the EAF steelmaking process. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH EUROPEAN ELECTRIC STEELMAKING CONFERENCE (EEC), 10., 2012, Graz. **Proceedings [...]**. Graz: [S.N.], 2012. 10p.

DORILEO, Ivo Leandro; JUNIOR, Herculano Xavier da Silva; BERNI, Mauro Donizeti; MESA, Juan Miguel Perez. **Centros de transformação: unidades integradas para produção de Coque**. Cambuí: [S.N.], 2010.

DUBOC, Eny; COSTA, Caroline Jácome; VELOSO, Rui Fonseca; OLIVEIRA, Leonardo Santos; PALUDO, Adriano. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no cerrado**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 37 p.

ECHTERHOF, Thomas. Review on the use of alternative carbon sources in eaf steelmaking. **Metals**, [S.l.], v. 11, ed. 2, p. 222, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition**. 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>. Acesso em: 11 fev. 2021.

ENERGY TRANSITIONS COMMISSIONS. **The circular economy: a powerful force for climate mitigation**. [S.l.]: [S.N.], 2018.

GONÇALVES, Wanderlei Miguel. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro gusa líquido com baixo teor de silício**. 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

GUIMARÃES, Eloísa Helena Rodrigues; MINOVES, Jorge Sala; AFONSO, Tarcisio; JEUNON, Ester Eliane. Logística direta e logística reversa na produção do aço: estudo de caso em uma empresa siderúrgica. In: III SINGEP E II S2IS - 2014, 3,2., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: [S.N.], 2014. p. 1-10.

HUPPES, Ronaldo Müller. **Estudo de alternativas para a identificação e controle da desoxidação do aço no forno panela**. 2014. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL (Rio de Janeiro). **Anuário estatístico**. 2020. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf. Acesso em: 11 fev. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL (Rio de Janeiro). **Anuário estatístico**. 2021. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo siderúrgico**. [2021?]. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 01 fev. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. 2018. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 07 fev. 2021.

KITTIPONGVISES, Suthirat. Assessment of Environmental Impacts of Limestone Quarrying Operations in Thailand. **Environmental And Climate Technologies**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 67-83, 27 nov. 2017.

LI, Xiaoling; SUN, Wenqiang; ZHAO, Liang; CAI, Jiuju. Material metabolism and environmental emissions of bf-bof and eaf steel production routes. **Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 50-58, 2017.

LINO, Bruno Escobar de Oliveira. **Avaliação do benefício social da reciclagem no setor eletroeletrônico**. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia e Mercados, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2019.

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira; SOBRINHO, Vicente de Paulo Ferreira Marques; ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Siderurgia para não siderurgistas**. Vitória. [s.n.], 2003. 128 p.

MAIA, Breno Totti. **Efeito da configuração do bico da lança na interação jato-banho metálico em convertedor LD**. 2007. 136 p. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MALDONADO, Ana Denise Ribeiro Mendonça; EDUARDO, Antonio Sérgio; RIBEIRO, José Soares. Valoração econômica ambiental como instrumento do planejamento ambiental. In: I ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO, 1., 2017, Naviraí. **Anais [...]**. Naviraí: [S.N.], 2017. p. 1-17.

MARCHIORI, F.; BELLONI, A.; BENINI, M.; CATENI, S.; COLLA, V.; EBEL, A.; LUPINELLI, M.; NASTASI, G.; NEUER, M.; PIETROSANTI, C.. Integrated dynamic energy management for steel production. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 105, p. 2772-2777, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Estudo da reciclagem de metais no país**. [s.l.]: [s.n.], 2009.

MIRANDA, Augusta Martinelli. **Monitoramento dos elementos residuais menos comuns no fornecimento de sucata para aciaria FEA**. 2019. 62 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MORAIS, Fabiana Fonseca de. Alto-Forno Sustentável – **O mercado de carbono no Brasil com ênfase na produção de gusa a partir de carvão vegetal de florestas plantadas de eucalipto**. 2008. 164 p. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MOTTA, RS da. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997.

MOTTA, RS da. Valoração e precificação dos recursos ambientais para uma economia verde. **Política Ambiental**, v. 8, p. 179-190, 2011.

MOURÃO, Marcelo Breda; YOKOJI, Akira; MALYNOWSKY, Antonio; LEANDRO, César Alves da Silva; TAKANO, Cyro; QUITES, Eduardo Emery Cunha; GENTILE, Erberto Francisco; SILVA, Guilherme F. B. Lenz e; BOLOTA, José Roberto; GONÇALVES, Marcelo; FACO, Rubens José. **Introdução à siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011. 428 p.

NOLDIN JÚNIOR, José Henrique. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

OPENLCA NEXUS. **Your source for LCA and sustainability data**. 2021. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/databases>. Acesso em: 20 jul. 2021

PASSOS, Elisa Kimus Dias. **Avaliação das rotas alternativas de produção de ferro gusa**. 2009. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PEREZ, José Antonio Costa. **A aplicação da avaliação do ciclo de vida para análise dos aspectos ambientais que envolvem a reciclagem de sucatas nas usinas siderúrgicas**. 2008. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Geociência e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

PORTUGAL JÚNIOR, P.s.; PORTUGAL, N.s.; ABREU, G.A.. Valoração Econômica Ambiental: um estudo analítico e teórico dos métodos e suas multiaplicabilidades. **Revista Catarinense da Ciência Contábil**, [S.L.], v. 11, n. 33, p. 22-34, 2012.

PWC - PricewaterhouseCoopers. **Siderurgia no Brasil**. [S.L.]: [S.N.], 2013. 16 p.

RECANATI, Francesca; CIROTH, Andreas. **Environmental Footprint secondary data for openLCA**. Berlim: [S.N.], 2019. 15 p.

RENZULLI, Pietro; NOTARNICOLA, Bruno; TASSIELLI, Giuseppe; ARCESE, Gabriella; CAPUA, Rosa di. Life Cycle Assessment of Steel Produced in an Italian Integrated Steel Mill. **Sustainability**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 719-734, 28 jul. 2016.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro; MAIA, Alexandre Gori. **Avaliação de custos e benefícios ambientais**. Brasília: Elisabete Ferrarezi, 2011. 52 p. Escola Nacional de Administração Pública (ENAP).

ROSSI, Daniel. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SILVA, José Nazareno Santos. IFPA:UFSM. **Siderurgia**. Belém: [S.N.], 2011. 110 p.

SILVA, Anderson Badia da. **Utilização de carepas como componente da carga de um forno elétrico a arco**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, Iasmim Ariane; CÂMARA, Pedro Henrique Medeiros; OLIVEIRA, Jaiza Bernardo de; MONTEIRO, Flánelson Maciel; LEITE, José Yvan Pereira. Caracterização tecnológica de escórias de alto-forno da empresa Fermar de Marabá/PA. In: simpósio de mineração, 20., 2019, São Paulo. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2019. p. 375-384.

SINDIFER - SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS (Minas Gerais). **Produção de ferro gusa em Minas Gerais e no Brasil**: anuário estatístico. Belo Horizonte: [S.N.], 2020.

TEIXEIRA, Georgia; RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos. Silvicultura e siderurgia a carvão vegetal: implicações na organização territorial no Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 19, n. 66, p. 297-312, 2018.

TRINDADE JUNIOR, José Carlos Nogueira. **Obtenção, mercado e reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira**. 2013. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VIANA, Fernando Luiz E.. Banco do Nordeste. **Indústria Siderúrgica. Caderno Setorial Etene**, [S.L.], v. 4, n. 92, p. 1-14, ago. 2019.

WORLD BANK GROUP. **State and trend of carbon pricing 2020**. Washington, DC. 2020. 109 p.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **About steel**. [2020?] Disponível em: <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>. Acesso em: 07 fev. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **CO2 Data Collection, User Guide, version 10**. Bruxelas: [S.N.], 2021. Disponível em: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:9dd44705-6b4a-496e-8f8f-14cc1158752d/CO2_User_Guide_V10.pdf. Acesso em: 07 ago. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel statistical yearbook: 2020 concise version**. 2020. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:5001dac8-0083-46f3-aadd-35aa357acbcc/Steel%20Statistical%20Yearbook%202020%20%2528concise%2520version%2529.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel - the permanent material in the circular economy**. 2016. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7e0dc90a-3efe-41bc-9fb4-85f9e873dfc7/Steel%20-%20The%20P>. Acesso em: 14 mar. 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **The white book of steel**. 2012. Disponível em: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7b406f65-3d94-4e8a-819f-c0b6e0c1624e/The%20White%20Book%20of%20Steel_web.pdf. Acesso em: 12 mar. 2021.

YELLISHETTY, Mohan; MUDD, Gavin M.; RANJITH, P.G.; THARUMARAJAH, A.. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 650-663, 2011.