



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



## AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DE COPRODUTOS DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

*Autor: Maria Valentina Antúnez Pasin*

*Orientadora: Liliana Amaral Feris*

*Co-orientadora: Keila Nunes*

Porto Alegre, fevereiro de 2024



Orientadora: Liliana Amaral Ferris

# AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DE COPRODUTOS DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química*

Orientadora: Liliana Amaral Ferris

Co-orientadora: Keila Nunes

Porto Alegre

2024



## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe pelo apoio e pela estrutura sempre proporcionada para que eu fosse atrás dos meus sonhos. Serei eternamente grata por tudo que tu fizeste por mim.

Aos meus padrinhos por todo o carinho, cuidado e incentivo. Vocês alegram minha vida.

Ao meu pai que não está mais presente fisicamente, mas convivemos tempo suficiente para que tu me inspirasses e deixasses um pouco de ti em mim.

Às minhas amigas Roberta Moraes, Júlia Waldman e Camille Rocha pela cumplicidade nessa trajetória. Vocês são as irmãs que escolhi.

Aos meus colegas da Engenharia Química por tornarem a graduação mais leve e divertida.

Aos demais amigos por colorirem a minha vida e torcerem por mim.

Ao meu namorado e sua família por vibrarem a cada pequena conquista minha e me acolherem nos momentos difíceis.

A todos os meus colegas do PCP por todos os ensinamentos.

À Prof. Liliana Ferris e Keila Nunes pela orientação, disposição e pelos conhecimentos compartilhados.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para que eu chegasse ao fim desse ciclo. A todos que torceram e apoiaram, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A gestão de resíduos tornou-se um aspecto estratégico para as empresas, impulsionada pelo aumento da consciência ambiental e pelas regulamentações vigentes. Neste contexto, as organizações estão sendo instigadas a repensar suas abordagens em relação ao descarte de resíduos, considerando não apenas o tradicional fluxo de produtos, mas também explorando oportunidades de reutilização desses resíduos. A indústria siderúrgica se destaca, por sua capacidade de empregar sucatas metálicas como matéria-prima e gerar resíduos passíveis de utilização em diferentes setores industriais. O presente trabalho objetivou avaliar o potencial de sustentabilidade da unidade de uma empresa siderúrgica através da análise da destinação dos resíduos industriais. Para isto, durante o período entre 2018 e 2022, foram selecionados os resíduos escória do FEA, resíduo de Pátio de Sucata, carepa de ferro, resíduo de Aciaria, pó de Aciaria e escória de forno panela, que representam 91% do volume total de resíduos gerados pela unidade. Os métodos de reciclagem, reutilização e disposição final dos resíduos dentro da empresa foram investigados e, alternativas para a destinação dos mesmos foram propostas conforme levantamento bibliográfico. A escória do FEA gerada na unidade estudada foi isenta de descartes no período analisado devido à sua consolidada aplicação como agregado siderúrgico. Além disso, possui outra aplicação viável como neutralizador de rejeito de carvão mineral em alternativa ao calcário. A terra do pátio é parcialmente reutilizada como cobertura de aterro e pavimentação, mas 96% são descartadas, representando uma oportunidade de estudo devido ao grande volume de geração e o alto índice de descarte. A carepa de ferro é comercializada pela empresa analisada para fabricação de contrapeso de elevador, mas também possui eficiência comprovada na produção de artefatos de cimento. O resíduo de aciaria sem reaproveitamento eficiente é destinado a aterros externos, gerando custos altos. O pó de aciaria elétrica gerado foi comercializado para o setor industrial da mineração após a segregação, tendo como uma alternativa ainda não utilizada a fabricação de argila vermelha. A escória de forno

panela é usada em substituição à cal hidráulica. Concluiu-se que devido a necessidade tanto ambiental quanto econômica a empresa analisada apresentou uma robusta gestão de seus resíduos.

**Palavras-chave:** siderurgia, gestão de resíduos, coprodutos.

## ABSTRACT

Industrial waste management has become a strategic aspect for companies, driven by increased environmental awareness and current regulations. Organizations are being urged to rethink their approaches to waste disposal, not only considering the traditional product flow, but also exploring opportunities for reusing this waste. The steel industry stands out in this context for its ability to use scrap metal as a raw material and generate waste that can be used in different industrial sectors. The aim of this study was to assess the sustainability potential of a steel company's plant by analyzing the destination of industrial waste. The six main types of waste that accounted for 91% of the volume generated by the plant from 2018 to 2022 were selected: steel mill slag, scrap yard waste, iron scale, steel mill waste, steel mill dust and ladle furnace slag. The aim of this study was to assess the sustainability potential of a steel company's plant by analyzing the destination of industrial waste. The six main types of waste that accounted for 91% of the volume generated by the plant from 2018 to 2022 were selected: steel plant slag, scrap yard waste, iron scale, steel plant waste, steel plant dust and ladle furnace slag. Methods for recycling, reusing and finally disposing of waste within the company were investigated and new alternatives for disposing of the waste generated were found through literature research. The siderurgy slag generated at the unit studied was exempt from disposal during the period analyzed due to its consolidated application as a siderurgy aggregate. It also has another viable application as a neutralizer for mineral coal tailings as an alternative to limestone. The earth from the yard is partially reused as landfill cover and paving, but a considerable fraction is discarded, representing an opportunity for study due to the large volume of generation and the high discard rate (96%). The iron mill scale is sold by the company analyzed to make elevator counterweights, but it also has proven efficiency in the production of cement artifacts. Steel mill waste that is not efficiently reused is sent to external landfills, generating significant costs. The electric arc furnace dust generated was sold to the mining industry after segregation, with the manufacture



of red clay as an alternative that has not yet been used. Pan furnace slag is used instead of hydraulic lime. It was concluded that due to both environmental and economic needs, the company analyzed had robust waste management.

**Keywords:** siderurgy, waste management, co-products.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parque industrial siderúrgico brasileiro.....	4
Figura 2: Evolução da produção e consumo do aço no Brasil entre 2005 e 2020. ....	5
Figura 3: Distribuição do consumo de aço no Brasil em 2020.....	6
Figura 4: Fluxograma da produção de aço em usinas semi-integradas e integradas.	7
Figura 5: Etapas do desenvolvimento do trabalho.....	13
Figura 6: Resíduos gerados pela planta siderúrgica estudada entre 2018 e 2022. ...	15
Figura 7: Fluxograma de geração de resíduos na usina siderúrgica analisada. ....	17

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Geração de coprodutos e resíduos em kg por tonelada de aço bruto, entre os anos de 2018 e 2020.....	11
<b>Tabela 2:</b> Destinação de coprodutos e resíduos siderúrgicos, entre os anos de 2018 e 2020. ....	11
<b>Tabela 3:</b> Teor de reaproveitamento de acordo com o tipo de resíduo nos anos de 2018 a 2022 na empresa analisada. ....	21
<b>Tabela 4:</b> Teor de descarte de acordo com o tipo de resíduo nos anos de 2018 a 2022 na empresa analisada. ....	22
<b>Tabela 5:</b> Utilização de resíduos siderúrgicos identificados na literatura.....	24

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Siderurgia no Brasil	3
2.2	Processo produtivo na indústria siderúrgica	6
2.3	Resíduos e Coprodutos	8
2.3.1	Definição de resíduos sólidos	9
2.3.2	Classificação de resíduos sólidos	10
2.3.3	Geração de resíduos siderúrgicos no Brasil	10
3	Materiais e Métodos	13
4	Resultados e discussão	15
4.1	Mapeamento e destino dos resíduos na siderúrgica analisada	15
4.1.1	Geração e destino da Escória do FEA	18
4.1.2	Geração e destino do Resíduo do Pátio de Sucatas	19
4.1.3	Origem e destino da Carepa de Ferro	19
4.1.4	Origem e destino do Resíduo de Aciaria	19
4.1.5	Geração e Destino do Pó de Aciaria gerado	20
4.1.6	Geração e destino da Escória de Forno Panela	20
4.2	Destinação dos resíduos gerados na siderúrgica analisada	21
4.3	Alternativas para os resíduos gerados na empresa analisada	23
5	Conclusões	26
	REFERÊNCIAS	29

## **1 Introdução**

O setor industrial é responsável pela geração de um grande volume de resíduos que, se destinados erroneamente, causam significativo dano ambiental. Por isso se justifica a importância de estratégias de gestão que minimizem impactos ambientais adversos e explorem oportunidades para a circularidade de recursos. A valorização dos coprodutos contribui para a redução do desperdício, a otimização dos recursos naturais e a minimização do impacto ambiental. Além disso, o aproveitamento econômico dos coprodutos pode trazer benefícios financeiros para as empresas, aumentando sua rentabilidade e competitividade.

A indústria siderúrgica se destaca por sua capacidade de empregar sucatas metálicas como matéria-prima e gerar resíduos passíveis de utilização em diferentes setores industriais. Nesse contexto, este estudo de avaliação de possibilidades de uso dos coprodutos se posiciona como uma contribuição significativa para a promoção de práticas mais sustentáveis e eficientes no setor siderúrgico, impulsionando a busca por soluções que integrem harmoniosamente os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

### **1.1 Objetivos**

O objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial de sustentabilidade de uma empresa siderúrgica do Rio Grande do Sul através da análise da destinação dos resíduos industriais.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Mapear os resíduos gerados por uma indústria siderúrgica localizada no Rio Grande do Sul e identificar a destinação desses resíduos.
- b) Mensurar a quantidade dos resíduos advindos da unidade siderúrgica em questão que são destinados e reaproveitados.

- c) Discutir sobre novas alternativas para os resíduos gerados na empresa analisada.

## **2 Revisão Bibliográfica**

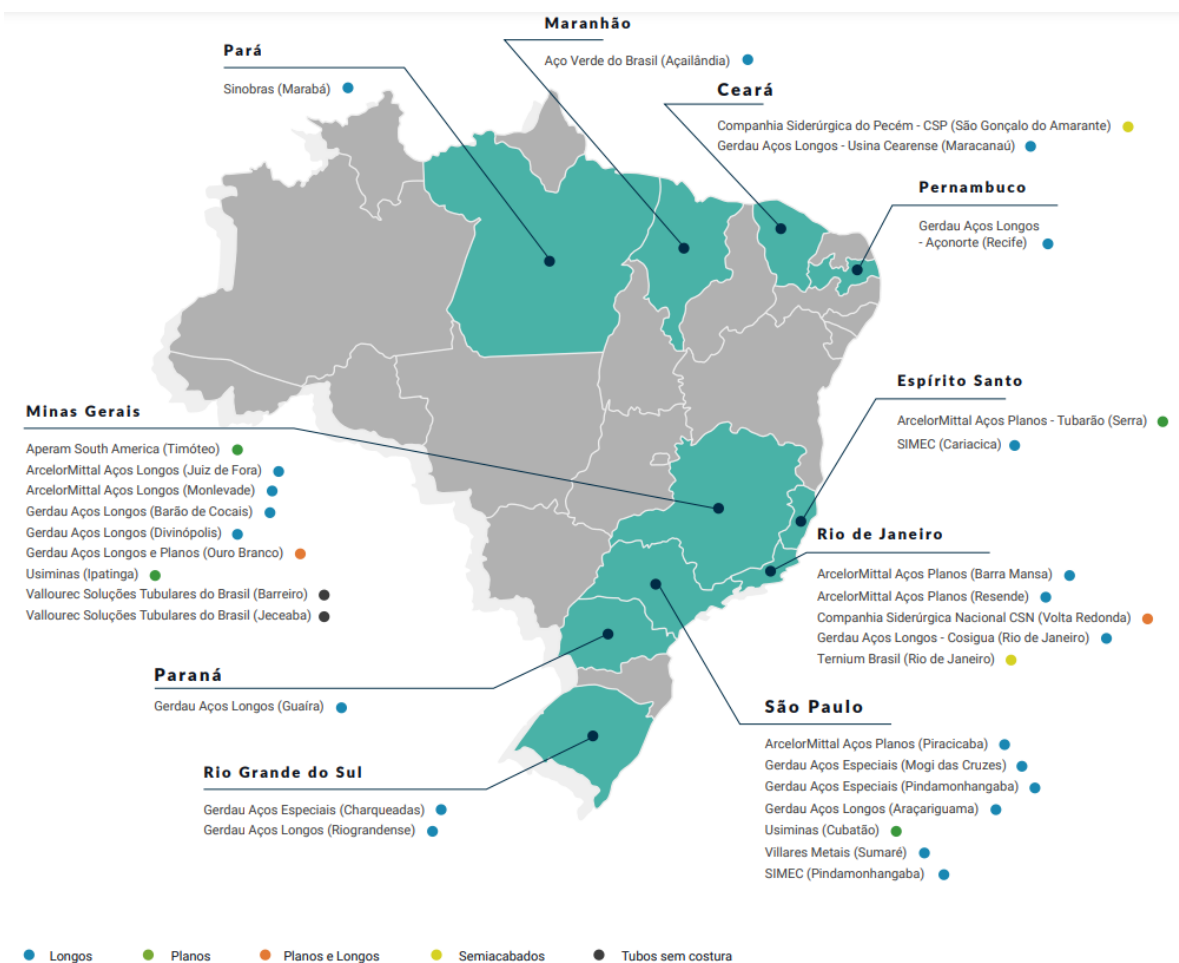
Este capítulo trará, inicialmente, a contextualização do cenário siderúrgico no Brasil, assim como os produtos mais relevantes desse ramo industrial. Em seguida, serão apresentados os principais resíduos gerados pela cadeia do aço e suas destinações.

### **2.1 Siderurgia no Brasil**

O aço é fundamental para o desenvolvimento da sociedade e tem forte presença no cotidiano das pessoas: nos veículos, ônibus e trens; na construção de pontes, viadutos, indústrias e grandes empreendimentos, em máquinas e equipamentos, em edifícios e casas, na produção e conservação de alimentos, como em fogões e geladeiras. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

O Brasil consolidou-se como 9º maior produtor mundial de aço em 2016. O parque industrial siderúrgico brasileiro é formado por 31 usinas, sendo 15 integradas e 16 semi-integradas. Os 12 grupos empresariais siderúrgicos brasileiros totalizam a capacidade de produção de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano. As usinas estão distribuídas em 10 estados brasileiros, conforme Figura 1. A região Sudeste, além de possuir a maior concentração de indústrias siderúrgicas, foi responsável por 86% da produção nacional de aço em 2020, totalizando 27 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Figura 1: Parque industrial siderúrgico brasileiro.



Fonte: Instituto Aço Brasil (2020).

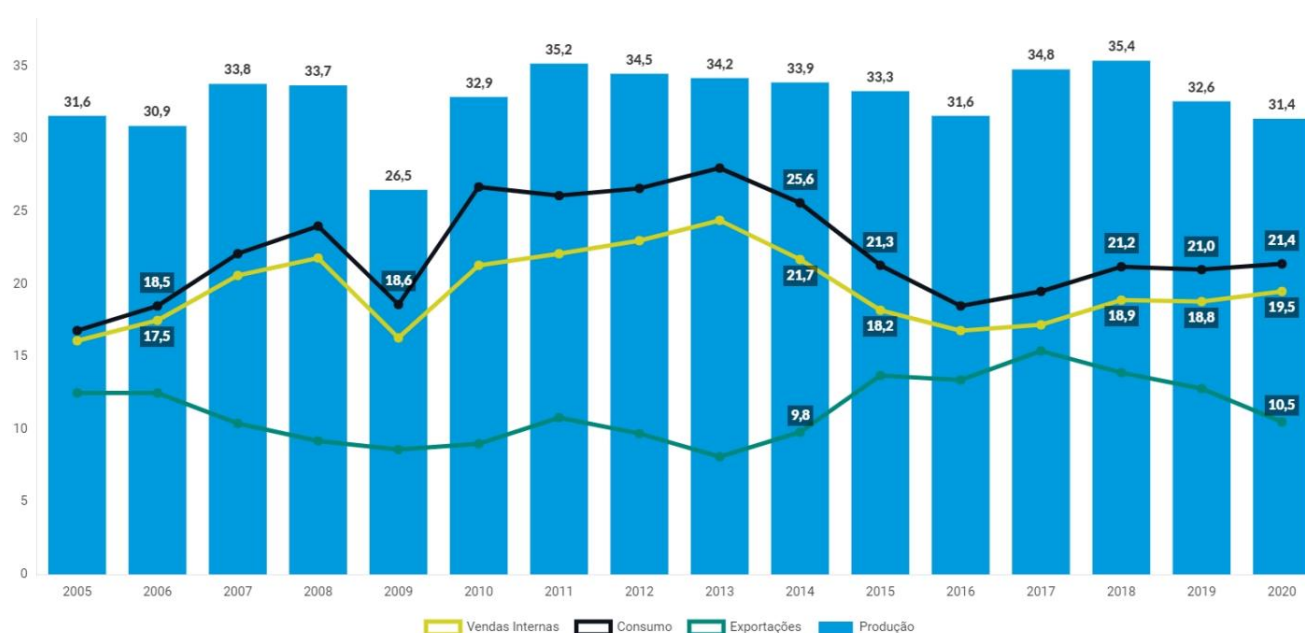
As crises econômicas no triênio 2018-2020 impactaram a indústria do aço. A produção recuou em 2019 e em 2020, voltando para o patamar de 2016, ano de recessão econômica. As vendas internas cresceram em 2018 e em 2020 atingiu o maior nível desde 2014, assim como o consumo aparente. As exportações caíram ao longo do triênio para o menor patamar desde 2014. Desde o início da pandemia de COVID-19 no Brasil, as siderúrgicas do país deram dado prioridade ao fornecimento para o mercado interno em detrimento das exportações, resultando em uma queda de 17,7% nas exportações para 10,5 milhões de toneladas. O aumento de 2,3% no consumo aparente em 2020 foi impulsionado pelo crescimento de 3,5% nas vendas,



enquanto as importações diminuíram 13,9% no mesmo período, totalizando 2,0 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Na Figura 2 são apresentados os dados de produção e consumo, vendas internas e exportações de 2005 até 2020 em milhões de toneladas.

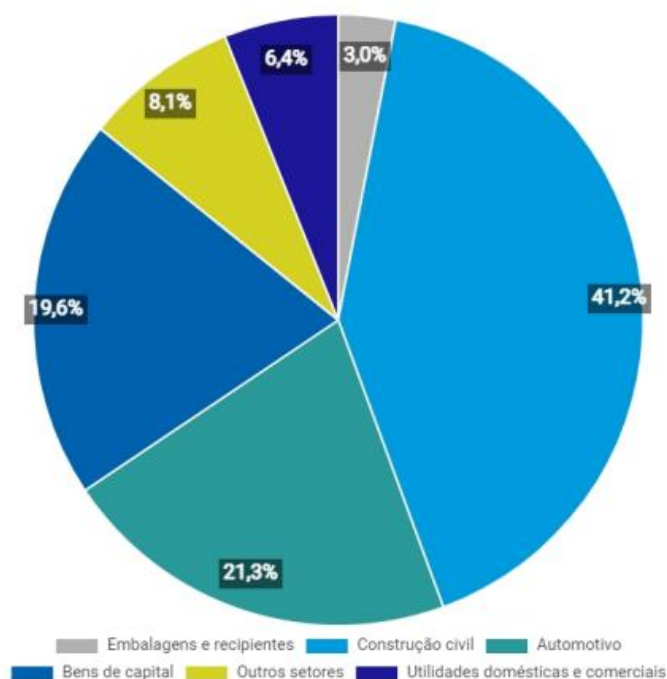
Figura 2: Evolução da produção e consumo do aço no Brasil entre 2005 e 2020.



Fonte: Instituto Aço Brasil (2020).

Conforme relatório de sustentabilidade do ano de 2020, publicado pelo Instituto Aço Brasil, os setores que mais consumiram produtos siderúrgicos no Brasil foram: construção civil, bens de capital, indústria automotiva e fábricas de eletrodomésticos. Juntos, esses setores representaram 82,1% do consumo de aço em 2020. A distribuição do consumo de aço no Brasil em 2020 é apresentada na Figura 3.

Figura 3: Distribuição do consumo de aço no Brasil em 2020.

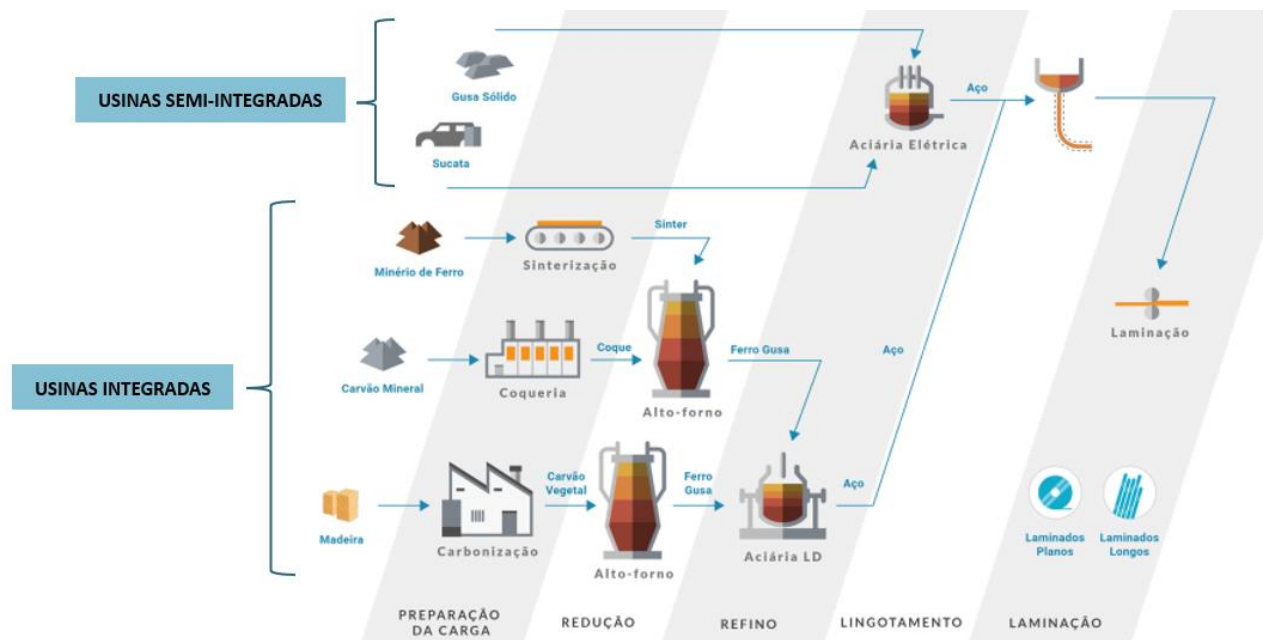


Fonte: Instituto Aço Brasil, 2020.

## 2.2 Processo produtivo na indústria siderúrgica

As usinas siderúrgicas são classificadas em integradas, semi-integradas e não integradas. Nas usinas integradas o processo produtivo ocorre em três etapas principais: redução, refino e laminação. As usinas semi-integradas dispõem de duas etapas do processo: redução e refino ou refino e laminação. Já as usinas não integradas realizam somente uma etapa do processo: redução ou laminação (MOURÃO, 2007; 2013). O fluxograma do processo é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma da produção de aço em usinas semi-integradas e integradas.



Fonte: Adaptado de IAB (2020).

A etapa de redução tem o objetivo de transformar o minério de ferro em ferro-gusa. Para isso, no alto forno o carbono do coque é queimado, gerando gás e calor. Esse gás provoca a redução do minério de ferro e a combinação do metal a um alto teor de carbono (3,5 – 5%). O ferro gusa é a combinação de ferro, carbono e silício. Nessa etapa ocorre a eliminação de elementos como fósforo e enxofre, prejudiciais as propriedades do aço.

A etapa do refino ocorre na aciaria com o objetivo de transformar o ferro gusa em aço líquido pela injeção de ar a altas temperaturas. Nessa etapa elementos químicos são adicionados para atribuir ao aço as propriedades desejadas. Em seguida, o aço é solidificado, por lingotamento contínuo ou convencional, em formas pré-determinadas de produtos semiacabados. Por fim, a etapa de laminação transforma os produtos

semiacabados em produtos siderúrgicos acabados, tais como: barras, perfis, chapas finas e grossas, bobinas, vergalhões, entre outros (RIZZO, 2005; MOURÃO 2007).

Segundo Alves (2016), o forno elétrico a arco (FEA) utilizado em rotas semi-integradas opera em batelada e é carregado de sucata e gusa no estado sólido. Neste tipo de processo, a sucata metálica é responsável por 60-80% do custo de produção do aço. Por ser um material heterogêneo física e quimicamente, a triagem e processamento da sucata ferrosa no pátio de sucatas é fundamental para a sua adequação. Inicialmente, a sucata é separada e classificada de acordo com seu tamanho, densidade, composição química, procedência e método de processamento. Posteriormente, é processada por equipamentos do pátio de sucatas que visam adequar suas dimensões, densidade e quantidade de impurezas. Os principais métodos utilizados no processamento de sucatas são:

- Prensa pacote: utilizada para formar pacotes de sucata;
- Prensa tesoura: primeiramente, prensa a sucata e depois uma tesoura guilhotina corta a mesma, em alguns casos é utilizada uma calha vibratória para retirar impurezas;
- Oxicorte: equipamento utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões;
- Tesoura móvel: implemento acoplado ao braço de escavadeiras industriais, composto por duas mandíbulas (inferior e superior) e lâminas de corte;
- Shredder: equipamento composto por moinho e grelhas, que irá triturar a sucata e realizar separação magnética, promovendo a retirada de impurezas.

### **2.3 Resíduos e Coprodutos**

A atividade siderúrgica demanda uma intensa utilização de recursos energéticos, hídricos e materiais, resultando na geração de 700 quilos de resíduos sólidos por 1000 quilos de aço produzida. O descarte inadequado desses resíduos poderia acarretar a inviabilidade ambiental e econômica da produção de aço. No entanto, através de uma gestão eficiente e de processos apropriados, é possível direcionar esses resíduos sólidos para a cadeia produtiva, onde podem ser reutilizados como materiais alternativos de valor econômico significativo. Essa oportunidade de reaproveitamento

permite classificar os resíduos sólidos como coprodutos do processo de fabricação do aço (ABM, 2008).

### *2.3.1 Definição de resíduos sólidos*

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010, define resíduos sólidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos possuem o potencial de exercer diferentes formas de impacto sobre o meio ambiente. Dentre essas formas, destaca-se a alteração da paisagem em virtude da poluição visual, bem como a liberação de maus odores e substâncias químicas voláteis resultantes da decomposição dos resíduos. Adicionalmente, a ação do vento pode dispersar materiais particulados, enquanto a queima dos resíduos pode ocasionar a liberação simultânea de gases tóxicos. Ademais, substâncias presentes nos resíduos podem ser liberadas através do processo de lixiviação, o qual provoca a infiltração no solo e nos aquíferos subterrâneos, bem como durante o escoamento superficial das águas pluviais, atingindo, assim, os corpos d'água. É importante destacar que nutrientes, como nitrogênio, fósforo e outros macro e micronutrientes, têm a capacidade de promover a eutrofização das águas, ao passo que outras substâncias químicas podem ser tóxicas ou apresentar características de bioacumulação na cadeia alimentar. Portanto, a gestão e o gerenciamento adequados dos resíduos são imprescindíveis para garantir sua disposição adequada (CASTILHO JR et al., 2006).

### 2.3.2 *Classificação de resíduos sólidos*

Os resíduos sólidos são classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública pela norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) para que possam ser gerenciados adequadamente. Desta forma, esta norma enquadra os resíduos de acordo com as seguintes Classes:

- Classe I - perigosos: São aqueles que apresentam uma ou mais das seguintes características: periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II A - não perigosos e não inertes: São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos da classe I (perigosos); podem apresentar as seguintes características combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B - não perigosos e inertes: Quaisquer resíduos, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma de amostragem de resíduos (NBR 10.007), e submetidos a um contato estático e dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, descrita na norma de solubilização de resíduos (NBR 10.006), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor conforme anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

### 2.3.3 *Geração de resíduos siderúrgicos no Brasil*

Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2020), a indústria siderúrgica gerou no triênio 2018 a 2020 de 600 a 700 kg de coprodutos e resíduos por toneladas de aço bruto produzido, não sofrendo grandes variações ao longo do período. Mais de 90% dos resíduos gerados no processo de produção do aço são reaproveitados, porém 1-2% são estocados e 4-5% são enviados para disposição final. Na Tabela 1, são apresentados os dados de geração de coprodutos e resíduos siderúrgico ao longo do triênio 2018-2020. Já na Tabela 2 é apresentada a destinação de coprodutos e

resíduos ao longo do mesmo período. Segundo a PNRS, a disposição final consiste em distribuir ordenadamente os rejeitos em aterros, observando as normas operacionais específicas que evitem danos ou riscos à saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais adversos.

**Tabela 1:** Geração de coprodutos e resíduos em kg por tonelada de aço bruto, entre os anos de 2018 e 2020.

	2018	2019	2020
<b>Geração de coprodutos e resíduos (kg/t)</b>	619	620	622

Fonte: IAB, (2020).

**Tabela 2:** Destinação de coprodutos e resíduos siderúrgicos, entre os anos de 2018 e 2020.

	2018 (%)	2019 (%)	2020 (%)
<b>Reaproveitamento</b>	95	94	93
<b>Estoque</b>	1	2	2
<b>Disposição final</b>	4	4	5

Fonte: IAB, (2020).

Conforme a definição estabelecida pela Norma ABNT NBR 5019/82, a escória é um material líquido ou pastoso resultante de operações pirometalúrgicas, geralmente contendo sílica, que solidifica em temperatura ambiente. De acordo com a Enciclopédia Britânica, a escória é um subproduto formado durante processos de fusão, soldagem ou outros processos metalúrgicos e de combustão, a partir das impurezas presentes nos metais ou minérios em processo de tratamento. Nesse contexto, as impurezas referem-se aos elementos contidos nas matérias-primas utilizadas nas etapas de produção do aço, que devem ser removidas total ou

parcialmente, a fim de conferir propriedades mecânicas específicas ao aço produzido. As propriedades mecânicas dos aços são determinadas pelos teores de determinados elementos e compostos presentes no aço, bem como pelos processos termomecânicos aos quais os aços são submetidos ao longo do processo de fabricação. As escórias siderúrgicas que eram simplesmente armazenadas em aterros, atualmente, passaram a ser beneficiadas, resultando em uma ampla variedade de produtos com diversas aplicações. Dessa forma, as escórias passaram a ser consideradas como coprodutos da atividade siderúrgica (ABM, 2008).

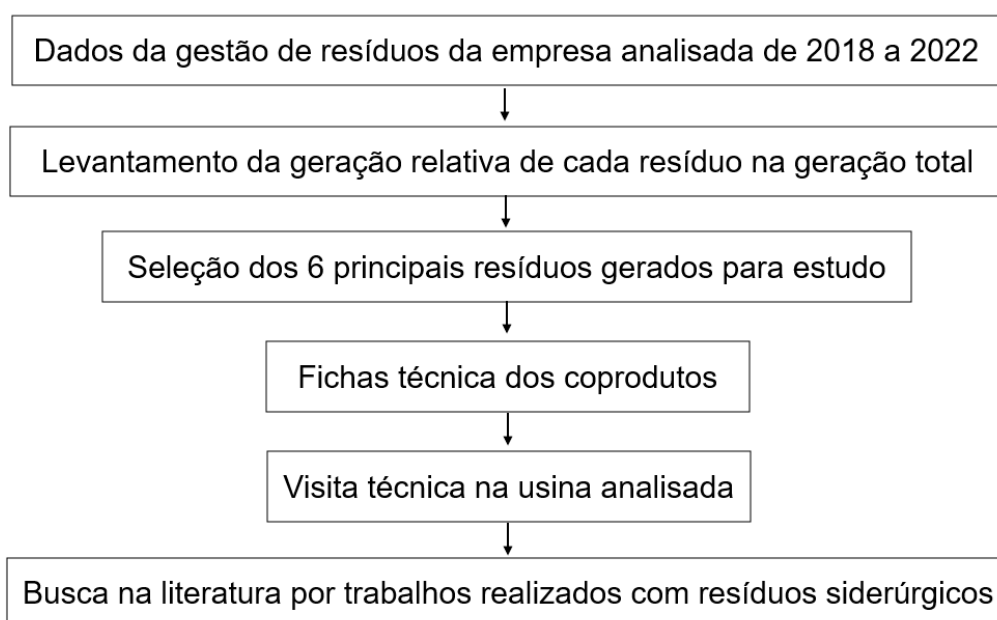


### 3 Materiais e Métodos

O estudo foi realizado com base nos dados de uma empresa multinacional produtora de aços especiais localizada no estado do Rio Grande do Sul, e pertencente a um dos maiores grupos siderúrgicos do mundo. A unidade analisada utiliza como matéria-prima principal a sucata metálica. Parte dos resíduos gerados no processo produtivo são destinados para aplicação em outras empresas.

Os passos realizados no desenvolvimento do trabalho são representados na Figura.

Figura 5: Etapas do desenvolvimento do trabalho.



*Fonte:* A autora.

Os dados do gerenciamento de resíduos da unidade no período de 2018 até 2022 foram cedidos pela empresa. Entre os dados estavam a quantidade descartada (t), que é tudo aquilo que foi destinado para aterro externo ou enviado para tratamento e a quantidade reaproveitada (t), que é o somatório de tudo que foi coprocessado, reciclado ou reutilizado. A soma da quantidade descartada e reaproveitada resulta na quantidade destinada (t). Também foi fornecido o resultado financeiro mensal de cada resíduo, considerando na despesa (R\$) o custo para tratamento e destinação do

resíduo e na receita (R\$) a quantidade vendida. Os dados foram transferidos para uma planilha de Excel, onde foram tratados a fim de avaliar a evolução no período analisado. Com isso, foi realizado inicialmente um levantamento da porcentagem relativa de cada resíduo referente a geração total de resíduos na planta siderúrgica a fim de determinar os resíduos que possuem maior volume gerado. Em posse do resultado, escolheu-se focar nos seis resíduos mais produzidos no período, que representam 91% do total da geração, sendo deles 48% escória do FEA, 11% resíduo de Pátio de Sucata, 10% carepa de ferro, 9% resíduo de Aciaria, 6% pó de Aciaria e 6% escória de forno panela. O resíduo do pátio de sucatas teve sua nomenclatura alterada pela empresa em março de 2022, subdividindo-se em terra do pátio e terra do pátio misturada, sendo a fração que é reaproveitada e a que não é limpa o suficiente para reaproveitamento e por esse motivo é destinada para aterros. Para descomplicar a análise o resíduo será referenciado como resíduo de pátio de sucatas em todo o período analisado.

A fim de sugerir novas alternativas de destinação ou tratamento aos resíduos gerados fez-se uma busca na literatura por trabalhos já realizados com esses tipos de resíduos industriais. A coleta de dados da literatura se deu por meio da pesquisa pelas palavras-chaves: Resíduos Industriais, Indústria Siderúrgica. Foi possível encontrar trabalhos já realizados dentro da empresa estudada. Para enriquecer a análise com dados sobre a composição química e propriedades físicas, as fichas técnicas dos coprodutos do acervo da empresa foram utilizadas.

A fim de examinar a forma como esses resíduos são tratados e gerenciados dentro da empresa, foi realizada uma visita técnica na usina analisada. Foram investigados os métodos de reciclagem, reutilização e disposição final dos resíduos, com ênfase na avaliação da eficiência e conformidade com as normas ambientais e regulamentações vigentes.

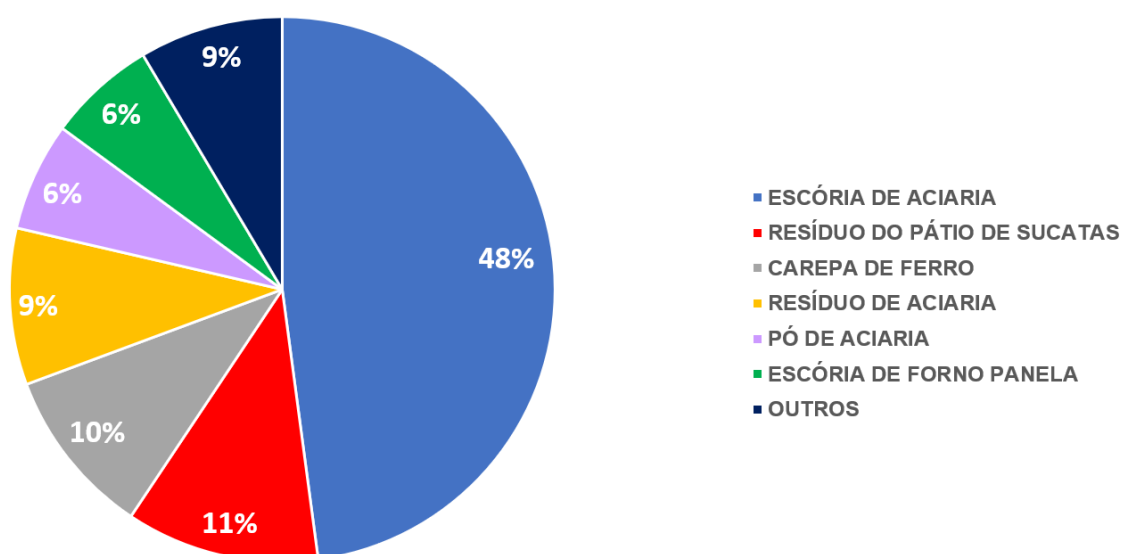
## 4 Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados do presente trabalho, abordando inicialmente o mapeamento dos resíduos da indústria siderúrgica analisada. Posteriormente, serão discutidas a destinação dos mesmos pela empresa e, possíveis alternativas para os resíduos.

### 4.1 Mapeamento e destino dos resíduos na siderúrgica analisada

A porcentagem relativa de cada resíduo referente a geração total de resíduos na planta siderúrgica analisada entre 2018 e 2022 é apresentada na Figura 6. É possível observar que os 6 tipos de resíduos avaliados (escória do FEA, resíduo de Pátio de Sucata, carepa de ferro, resíduo de Aciaria, pó de Aciaria e escória de forno panela) representam 91% da geração total de resíduos, motivo que justifica a escolha deles para análise do presente trabalho.

Figura 6: Resíduos gerados pela planta siderúrgica estudada entre 2018 e 2022.



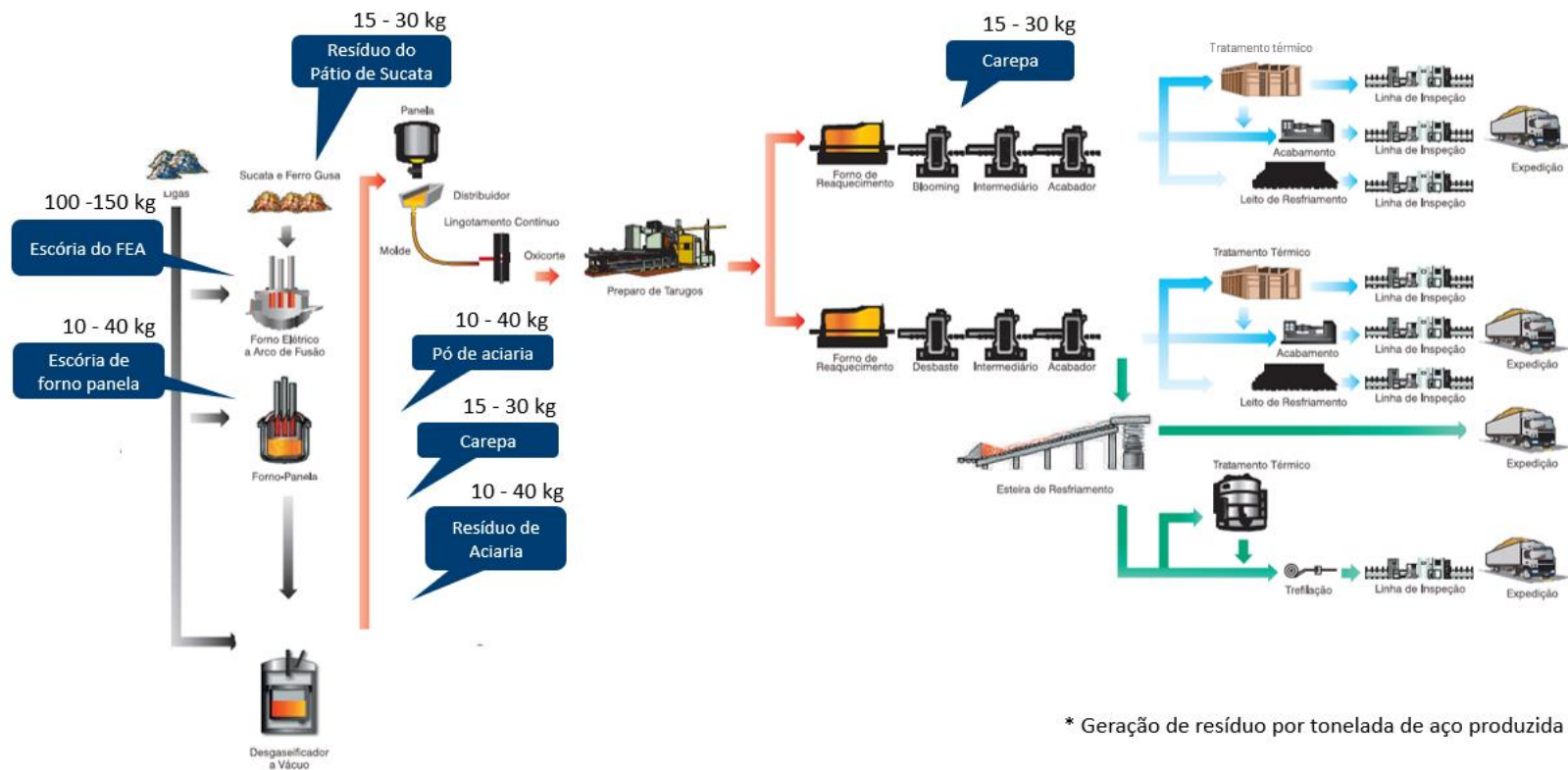
Fonte: A autora.

As escórias desempenham papel importante como matéria-prima para diversas aplicações industriais, tais como fabricação de cimento, lastro ferroviário, base e sub-base rodoviária, fertilizantes e corretivos de solo. Na usina analisada duas correntes de escórias são geradas na Aciaria: a escória de aço carbono e a escória de forno panela.

Segundo a Agência Europeia para o Controle e Prevenção da Poluição (EIPPCB), o reaproveitamento das escórias siderúrgicas é apontado como a solução técnica mais eficaz disponível na atualidade. Essa afirmação ressalta a importância e as vantagens do aproveitamento desses materiais como coprodutos da indústria siderúrgica, em vez de considerá-los simplesmente como resíduos a serem descartados.

Na Figura 6 o fluxograma de processo da indústria siderúrgica analisada é apresentado com o detalhamento de onde os resíduos são gerados.

Figura 7: Fluxograma de geração de resíduos na usina siderúrgica analisada.



Fonte: Adaptado acervo da empresa estudada.

#### 4.1.1 *Geração e destino da Escória do FEA*

A escória do FEA é o principal resíduo da fabricação do aço, que representa um volume de geração, entre 100 e 150 quilos por tonelada de aço. O processamento da escória do FEA visando sua transformação em coproduto requer a aplicação de operações unitárias como resfriamento controlado, britagem, separação magnética, classificação granulométrica e estabilização volumétrica. Essas etapas desempenham um papel crucial para assegurar a qualidade e as propriedades desejadas do coproduto final, um material que pode ser utilizado como alternativa ao agregado natural. O resfriamento rápido reduz o tamanho inicial dos blocos de agregados formados e facilita a separação magnética. Na britagem, a escória é fragmentada de acordo com a aplicação final, assim como ocorre com os agregados naturais. Já na separação magnética, o ferro metálico é removido por ser prejudicial à maioria das aplicações em potencial. A classificação granulométrica ajusta a escória à especificação de mercado, passando então a ser denominada agregado siderúrgico. A etapa de estabilização volumétrica é essencial para a utilização da escória do FEA como agregados siderúrgicos, matérias-primas para outros processos industriais.

As principais aplicações da escória do FEA no Brasil, após processamento, são a pavimentação rodoviária e lastro ferroviário. Na União Europeia, as aplicações são a pavimentação rodoviária, fabricação de cimento, fertilizantes e como material construtivo para barragens. Vale ressaltar que na Europa as escórias são amplamente utilizadas na composição da camada asfáltica, e no Brasil são geralmente utilizadas como base ou sub-base rodoviária.

Na usina estudada, a escória de aço carbono é gerada em toda corrida do FEA e armazenada em uma baía para resfriar. Após o resfriamento, é levada para o pátio de sucatas e imediatamente resfriada com água fria a fim de que a parte metálica se solte. Posteriormente, separa-se a escória em metálicas e não metálicas. A metálica é reaproveitada na aciaria e a não metálica é usada em pavimentação, base de pilha ou é vendida por um terceiro, responsável pelo processamento de alguns resíduos e coprodutos gerados nessa siderúrgica.

#### *4.1.2 Geração e destino do Resíduo do Pátio de Sucatas*

O resíduo do pátio de sucatas é o excedente de todos os processamentos que ocorrem nessa área, sendo subdividida em terra do pátio e terra do pátio misturada. Parte desse resíduo, a terra do pátio reaproveitada como cobertura de aterro e na composição de pavimentação, já uma fração maior chamada de terra do pátio misturada ainda é destinada para aterro externo.

#### *4.1.3 Origem e destino da Carepa de Ferro*

A carepa pode ser gerada de duas formas, uma delas é quando o tarugo é resfriado e ela se desprende pela pressão da água. Na segunda maneira, a carepa desprende-se do tarugo no leito. Esse tipo de resíduo é composto basicamente por óxido de ferro proveniente da oxidação da superfície do aço quando em contato com o ar. Por ser classificado como Classe I – perigosos segundo a Norma ABNT NBR 10.004, há a necessidade de cuidados adicionais com o seu manuseio e destinação em aterros. Parte da carepa é reutilizada na própria aciaria da usina, porém, quando a granulometria é reduzida, o aproveitamento em sua totalidade é inviabilizado. Por esta razão esse coproduto é comercializado para diferentes aplicações, principalmente como contrapeso de elevador.

#### *4.1.4 Origem e destino do Resíduo de Aciaria*

Óxido de magnésio e óxido de ferro III representam 50% da composição do resíduo de aciaria. Ele é classificado como Classe II A - não perigosos e não inertes e é gerado de quatro formas no processo da usina siderúrgica analisada:

1. pelo processamento do refratário do distribuidor que é uma massa que com a exposição ao calor se transforma em um pó;
2. pelo processamento da garra e do segregado dos blocos e andorinhas gerados no distribuidor;

3. pelo processamento do pó do VD que é gerado na válvula de despressurização do Forno Panela;
4. Pelo processamento na Aciaria dos cascões gerados na válvula de despressurização.

Todo o volume de resíduo de aciaria gerado pela usina siderúrgica analisada é destinado para aterros.

#### *4.1.5 Geração e Destino do Pó de Aciaria gerado*

O pó de aciaria elétrica é classificado como um resíduo de Classe I – perigosos, e por esse motivo os devidos cuidados devem ser tomados ao manuseá-lo e ao destiná-lo. Esse resíduo é composto por metais, tais como zinco, cromo, chumbo e cádmio. Por possuir granulometria muito fina, é captado por um sistema de despoejamento para posteriormente ser segregado. Devido ao seu alto teor de zinco, é comercializado para o setor industrial de mineração após a segregação.

#### *4.1.6 Geração e destino da Escória de Forno Panela*

A escória de forno panela é outro resíduo da fabricação do aço, que representa um volume significativo de geração, entre 10 e 40 quilos por tonelada de aço. Apesar de pôr vezes ser erroneamente classificada nas estatísticas como escória de aciaria, possui características distintas que exigem um tratamento separado. Essa distinção entre os dois resíduos se faz necessária tanto por motivos técnicos quanto legais, pois a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), proíbe a combinação de resíduos com características distintas.

Uma característica relevante da escória de forno panela é a sua instabilidade dimensional durante o resfriamento, o que a torna bastante polvorosa, dificultando o seu manuseio. A escória de forno panela é um resíduo Classe II A - não perigosos e não inertes com 49% de óxido de cálcio (CaO), também chamado de cal, que é amplamente usado em todo o processo siderúrgico. Através de segregação e



processamento adequados, a escória pode ser misturada a outros resíduos siderúrgicos, como refratários, para ser reutilizada na aciaria como substituto da cal ou de escórias sintéticas, ou ainda ser reciclada no próprio forno-panela.

#### 4.2 Destinação dos resíduos gerados na siderúrgica analisada

A destinação de resíduos gerados na empresa siderúrgica analisada foi dividida em dois tipos, a porção reaproveitada e descartada. O reaproveitamento referiu-se aos resíduos que foram coprocessados, reciclados, tratados ou reutilizados. Os resíduos descartados pela empresa foram destinados para aterros externos ou para tratamento. Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os percentuais de reaproveitamento e descarte da indústria estudada no período de 2018 a 2022.

**Tabela 3:** Teor de reaproveitamento de acordo com o tipo de resíduo nos anos de 2018 a 2022 na empresa analisada.

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>2018 (%)</b>	<b>2019 (%)</b>	<b>2020 (%)</b>	<b>2021 (%)</b>	<b>2022 (%)</b>
Escória do FEA	89	139	124	85	63
Resíduo do Pátio de Sucatas	0	12	34	29	40
Carepa de Ferro	58	89	132	102	140
Resíduo de Aciaria	0	0	0	0	0
Pó de Aciaria	103	99	98	99	97
Escória de Forno Panela	208	77	0	35	39

*Fonte:* A autora.

**Tabela 4:** Teor de descarte de acordo com o tipo de resíduo nos anos de 2018 a 2022 na empresa analisada.

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>2018 (%)</b>	<b>2019 (%)</b>	<b>2020 (%)</b>	<b>2021 (%)</b>	<b>2022 (%)</b>
Escória do FEA	0	0	0	0	0
Resíduo do Pátio de Sucatas	95	130	77	81	98
Carepa de Ferro	0	34	0	0	0
Resíduo de Aciaria	11	135	96	162	59
Pó de Aciaria	7	1	2	3	3
Escória de Forno Panela	0	0	3	0	0

*Fonte:* A autora.

A destinação de resíduos em estoque também foi contabilizada nos indicadores, ou seja, quando o resíduo era gerado e não era destinado no mesmo período analisado, ele permanecia estocado até que fosse encaminhado para seu destino e o volume de destinação era contabilizado no indicador do período vigente. Por esse motivo valores superiores a 100% são justificados.

A escória do FEA foi isenta de descartes no período analisado, apresentando valores acima dos 85% de reaproveitamento nos quatro primeiros anos estudados. Isso se deve à sua transformação em agregado siderúrgico que substitui a brita na construção civil. O ano de 2022 destaca-se pelo alto nível de estocagem do resíduo. Já o resíduo de pátio de sucatas possui média de descarte de 96%.

O valor do teor de reaproveitamento da carepa de ferro no ano de 2018 foi inferior aos outros anos pois 42% da geração ficou em estoque, já que não houve descartes neste ano. No ano posterior, 89% foram reaproveitadas e 34% descartadas. A partir de 2020 nota-se um padrão de taxa zero de descarte e reaproveitamento acima dos 100%, isso se deve a destinação deste coproduto como contrapeso de elevador.

A totalidade do volume de resíduo de aciaria foi destinado para aterros externos por não possuir reaproveitamento eficiente. O descarte desse resíduo gerou um custo na casa dos milhões de reais para a empresa no quinquênio analisado.

O pó de aciaria possui um desvio padrão em relação ao índice de reaproveitamento bastante baixo, com seus valores variando de 98 a 103. Além disso, possui percentis baixos de descarte, devido ao seu alto teor de zinco que torna seu comércio atrativo. Já a escória de forno panela é o resíduo que possui a maior oscilação no decorrer dos anos investigados. O teor de estocagem desse resíduo é bastante elevado já que em quatro dos cinco anos analisados o teor de reaproveitamento não se aproximou de 10% e o único ano que se teve descarte foi em 2020, com apenas 3% da geração sendo destinado para aterro externo. Apesar de ter sua eficácia comprovada quando utilizado na produção de fertilizantes, esta aplicação não havia se consolidado na empresa pesquisada no período analisado.

#### **4.3 Alternativas para os resíduos gerados na empresa analisada**

Na literatura são encontrados diversos estudos com foco no reaproveitamento de resíduos siderúrgicos. A Tabela 5 apresenta alguns dos estudos relacionados à utilização de resíduos siderúrgicos como matéria-prima ou insumos em diversos segmentos econômicos.

**Tabela 5:** Utilização de resíduos siderúrgicos identificados na literatura.

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>Proposta</b>	<b>Referência</b>
Escória do FEA	Agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário	Pacheco (2006)
	Neutralizador de rejeito de carvão mineral	Vasquez (2015)
Resíduo do Pátio de Sucatas	Cobertura intermediária e final de um aterro de resíduos da construção civil classe A	Quadrado (2022)
Carepa de Ferro	Sinterização	Seabra (2021)
	Artefatos de cimento	Gonçalves (2004)
Pó de Aciaria	Material cerâmico	Silva (2018)
Escória de Forno Panela	Material cerâmico	Cardoso (2009)
	Argamassa	Marinho (2015)

*Fonte:* A autora.

Pacheco (2006) analisou a aplicação da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário, chegando à conclusão de que a utilização é viável. Esse tipo de reaproveitamento já é utilizado na empresa analisada, porém um estudo mais recente comprovou que a mesma escória de aciaria também pode ser utilizada como neutralizador de rejeito de carvão mineral em alternativa ao calcário (VASQUEZ, 2015). Quadrado (2022) comprovou que a fração limpa do resíduo do

pátio de sucatas e a terra do Shredder (fração pesada - terra e metais particulados) podem ser utilizados como cobertura intermediária e final de aterro de resíduos da construção civil classe A. Para isso, devem ser misturados com o solo natural da região e deve ser realizado monitoramentos semestrais de análises físico-químicas das águas pluviais do empreendimento que já são exigidos na LO. A empresa analisada comercializa a terra do pátio limpa para que ela seja utilizada como cobertura de aterros.

Seabra (2021) concluiu que a incorporação da carepa de ferro influenciou positivamente na obtenção de sínter, aumentando o teor de ferro e contribuindo para sua resistência mecânica. Sínter é um material poroso e consolidado obtido pela aglomeração térmica de finos de minério de ferro, coque e outros aditivos, utilizado na produção de ferro e aço. A mesma carepa de ferro foi aplicada por Gonçalves (2004) na produção de artefatos de cimento, que apresentaram resistência elevada adequada para produtos destinados a pavimentos para tráfego leve (veículos de passeio), estacionamentos e passarelas. Já incorporação de pó de aciaria na fabricação de argila vermelha foi avaliada por Silva (2018), avaliando as características químicas, físicas, mineralógicas e térmicas. Concluiu-se que a adição de 10 e 20% de pó de aciaria nas temperaturas de 850 e 950°C produz material indicado para fabricação de tijolos em termos de resistência à flexão e absorção de água.

A escória de forno panela também teve sua utilização na fabricação de material cerâmico com função de vedação ou estrutural comprovada por Cardoso (2009), com incorporação de até 15% (teor máximo testado). A mesma escória de forno panela teve o uso como um aglomerante para argamassas em substituição à cal hidratada e à cal hidráulica analisado por Marinho (2015). Todas as exigências químicas e físicas de uma cal para argamassa, conforme prescrições normativas, foram ensaiadas no resíduo siderúrgico, comprovando a possibilidade da sua utilização como um aglomerante ecológico.

Os estudos apresentados são essenciais para o desenvolvimento ambiental e econômico de indústrias siderúrgicas por contribuírem para a redução de resíduos, economia de recursos naturais, já que evita a extração de novas matérias-primas. Também abre oportunidades para o desenvolvimento de novos negócios e cadeias

produtivas, impulsionando a economia circular. Para promover esse processo, é essencial investir em pesquisas sobre o reaproveitamento de coprodutos.

## 5 Conclusões

O volume de resíduos gerados por indústrias siderúrgicas é enorme, porém esses resíduos podem ser reciclados nos processos internos ou comercializados para reutilização em outros setores. Essas práticas oferecem diversos benefícios, incluindo a preservação ambiental, a economia de recursos naturais e vantagens para a comunidade em geral.

O estudo de caso permitiu concluir que a unidade siderúrgica analisada estava em conformidade com as normas ambientais durante o período estudado e apresenta um potencial de sustentabilidade robusto. A posição geográfica da empresa é desfavorável para a comercialização dos resíduos por estar longe da região Sudeste, onde está o polo industrial brasileiro. Apesar disso, a unidade estava se desenvolvendo no que se refere a gerenciamento de coprodutos. Apresentou reaproveitamento robusto para 70% do volume de resíduos analisados, sendo eles: escória de Aciaria, carepa e pó de Aciaria.

A escória de Aciaria gerada na unidade analisada foi transformada em agregado siderúrgico que substitui a brita no setor de construção civil. Esse resíduo foi isento de descartes no período estudado, apresentando teor de reaproveitamento acima dos 85% de 2018 a 2021. Apesar da robusta aplicação na empresa analisada, ainda é possível utilizar a escória de aciaria como neutralizador de rejeito de carvão mineral em alternativa ao calcário.

Uma fração da carepa é reutilizada na própria aciaria da usina estudada, porém, o aproveitamento em sua totalidade é inviabilizado quando a granulometria é reduzida. Por esta razão esse coproduto é comercializado para diferentes aplicações, principalmente como contrapeso de elevador. A partir de 2020 o índice de descarte foi zerado e o reaproveitamento atingiu níveis acima dos 100%, indicando quando a reutilização como contrapeso de elevador se consolidou. Estudos comprovam que a incorporação da carepa de ferro influencia positivamente na obtenção do sinter,

aumentando o teor de ferro e contribuindo para sua resistência mecânica. A mesma carepa de ferro pode ser na produção de artefatos de cimento, que apresentaram resistência elevada adequada para produtos destinados a pavimentos para tráfego leve (veículos de passeio), estacionamentos e passarelas.

O pó de aciaria elétrica gerado foi comercializado para o setor industrial da mineração após a segregação. O baixo desvio padrão em relação ao índice de reaproveitamento, com seus valores variando de 98 a 103, indica sua robustez em termos de reciclagem. Além disso, apresentou baixos índices de descarte, devido ao seu alto teor de zinco que torna seu comércio atrativo. A incorporação de pó de aciaria na fabricação de argila vermelha produz material indicado para fabricação de tijolos em termos de resistência à flexão e absorção de água.

30% do volume de resíduos analisados não apresentou reaproveitamento consistente sendo eles: terra do pátio, resíduo de Aciaria e escória de forno panela.

Parte da terra do pátio é reaproveitada como cobertura de aterro e na composição de pavimentação, já uma fração maior chamada de terra do pátio misturada ainda é destinada para aterro externo. Este resíduo representa a maior oportunidade de estudos por ser o segundo resíduo gerado e ter média de descarte de 96%. Uma oportunidade de aplicação é na utilização da fração limpa do resíduo do pátio de sucatas e a terra do Shredder (fração pesada - terra e metais particulados) como cobertura intermediária e final de aterro de resíduos da construção civil classe A.

Todo o volume de resíduo de aciaria gerado pela usina em questão foi destinado para aterros externos por não possuir reaproveitamento eficiente. O descarte desse resíduo gerou um custo na casa dos milhões para a empresa no quinquênio analisado. Por esse motivo, o estudo de alternativas de reaproveitamento do resíduo de aciaria é importante por motivos ambientais e uma oportunidade de melhoria em termos econômicos.

A escória de forno panela foi misturada a outros resíduos siderúrgicos, como refratários, para ser reutilizada na aciaria como substituto da cal ou de escórias sintéticas, ou ainda foi reciclada no próprio forno-panela. Esse resíduo apresentou uma grande oscilação no decorrer dos anos investigados. O teor de estocagem também foi bastante elevado já que em quatro dos cinco anos analisados o teor de reaproveitamento não se aproximou de 10% e o único ano se teve descarte foi em

2020, com apenas 3% da geração sendo destinado para aterro externo. Apesar de ter sua eficácia comprovada quando utilizado na produção de fertilizantes, esta aplicação não havia se consolidado na empresa pesquisada no período analisado. A escória de forno panela também teve sua utilização na fabricação de material cerâmico com função de vedação ou estrutural comprovada e no uso como um aglomerante para argamassas em substituição à cal hidratada e à cal hidráulica.

A pesquisa mostrou-se relevante por evidenciar a vasta quantidade de alternativas de reutilização de resíduos siderúrgicos e por auxiliar em estudos relacionados ao gerenciamento destes. Sugere-se para trabalhos futuros o estudo de usinas localizadas em outros estados ou países com posição geográfica mais favorável. Além disso, deve-se focar esforços para encontrar alternativas para o reaproveitamento da terra do pátio de sucatas e do resíduo de aciaria.



## REFERÊNCIAS

ALVES, P. C. **Análise do rendimento metálico do FEA devido ao uso do sistema de despoejamento do Shredder**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM. Nota Técnica: Gestão e Coprodutos, Panorama do setor siderúrgico. Brasil, Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

CARDOSO, M. D. **Reciclagem de escória de forno panela de aciaria elétrica em material cerâmico**. 2009. 98-99p. Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Brasil, São Leopoldo, 2009.

FERREIRA, F. **Análise da eficiência relativa das usinas mini-mills da Gerdau S.A nas Américas: Um estudo a partir da análise envoltória de dados**. 2012. 103p. Pós-graduação em Ciências Contábeis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Brasil, São Leopoldo, 2012.

GONÇALVES, M. R. F. et al. **Utilização de carepa como agregado para produção de artefatos de cimento**. 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de sustentabilidade. 2014. Acesso em: 29 jun. 2023

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de sustentabilidade. 2020. Acesso em: 10 jun. 2023

PACHECO, L. C. D. **O estudo da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário**. 2006. 98p. Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense. Brasil, Niterói, 2006.

MARINHO, A. L. B. **Aglomerante ecológico para argamassa – Reciclagem da escória de forno panela**. 2015. 69p. Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Brasil, Ouro Preto, 2015.

MOURÃO, M. B. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007.

MOURÃO, M. B. **Fundamentos da Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013.

**QUADRADO, M. C. Avaliação Ambiental da Aplicação de Resíduos Siderúrgicos em uma Área Degradada pela Mineração Licenciada como Aterro de Resíduos da Construção Civil, 2022.**

**RIZZO, M. D. S. Introdução aos Processos Siderúrgicos.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2005.

**SEABRA, D. C. M. Produção e caracterização de sinter de finos minérios de ferro com a utilização de 8% do coque e 12% da carepa de laminação, 2021.**

**VASQUEZ, B. A. F. Produção de solo a partir de rejeito de carvão mineral, 2015.**