



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**VITOR DANTAS LOPES**

**MELHORIA DA QUALIDADE DA SUCATA UTILIZADA EM FORNO ELÉTRICO A  
ARCO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE DUAS ROTAS DE PROCESSAMENTO**

**FORTALEZA**

**2022**

VITOR DANTAS LOPES

MELHORIA DA QUALIDADE DA SUCATA UTILIZADA EM FORNO ELÉTRICO A  
ARCO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE DUAS ROTAS DE PROCESSAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug  
Co-Orientador: Me. Eng Rodrigo Alves Ramos

**FORTALEZA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L856m Lopes, Vitor Dantas.

Melhoria da qualidade da sucata utilizada em forno elétrico a arco através da combinação de duas rotas de processamento / Vitor Dantas Lopes. – 2022.  
40 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Rodrigo Alves Ramos.

1. Sucata. 2. Forno elétrico a arco. 3. Rendimento metálico. 4. Impurezas. 5. Processamento. I. Título.  
CDD 669

---

VITOR DANTAS LOPES

MELHORIA DA QUALIDADE DA SUCATA UTILIZADA EM FORNO ELÉTRICO A  
ARCO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE DUAS ROTAS DE PROCESSAMENTO

Monografia apresentada ao Departamento de  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em: 26/01/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ing. Jeferson Leandro Klug (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Eng Rodrigo Alves Ramos (Coorientador)  
Gerdau Aços Longos S.A

---

Prof. Dr. Eng. Ricardo Emílio  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Alcinei Dantas Lopes e Francisco Elder Lopes, pelo amor, carinho, dedicação, educação, cuidado e sabedoria que me fazem percorrer os caminhos da vida.

As minhas irmãs, Raquel Dantas Lopes e Livia Dantas Lopes que sempre serviram de exemplo e incentivo para percorrer a trilha de uma Universidade Federal.

Ao meu cunhado, Faustino Júnior que sempre esteve disposto a me ensinar e orientar a percorrer o melhor caminho possível, seja no meio acadêmico, como profissional.

Aos meus amigos e companheiros de universidade, com quem tive a honra de caminhar junto nesta jornada: Breno Lucena, Dharien Oliveira, Dylan Santos, Fernando Capistrano, Francisco Carlos Gomes da Silva, Francisco Willian da Silva Gomes, Guilherme Feitosa, Ianca Maria, Isaque Brito, Igor Conde, Juliana Albuquerque, Leandro Rodrigues, Stephanny Santos, Victor Leocádio e Vitória Lima de Sousa por todo apoio na minha caminhada durante a Universidade e por toda a ajuda que recebi com relação aos estudos, amizade, carinho, experiências e convivência durante todos esses anos. Com eles tudo se tornou mais leve e mais fácil.

A minha namorada, parceira e amiga, Cristieley Ferreira, pelo apoio acadêmico e profissional, além de aconselhar, guiar e me fortalecer para alcançar todos os meus objetivos.

Aos meus professores de universidade Jorge Luiz, Elineudo Moura, Marcelo José, Cleiton Carvalho, Igor Frota, Walney Silva, Ricardo Emílio, Francisco Marcondes, Hamilton Ferreira, Ênio Pontes e Marcelo Motta, que foram de suma importância para minha formação como pessoa e engenheiro.

Ao servidor do departamento, Antônio Bandeira, pela assistência, paciência e empenho durante a caminhada.

Ao meu orientador, Jeferson Klug, pelo incentivo e comprometimento na conclusão de meu trabalho, paciência e disponibilidade na retirada de quaisquer dúvidas, e conselhos para vida acadêmica.

Ao meu coorientador de TCC e amigo, Rodrigo Alves Ramos, pela paciência, incentivo, conselhos e orientação durante todo o período de estágio, sempre à disposição.

A Profa. Dra. Janaína Machado pelo grande auxílio na minha preparação como aluno e profissional durante minha estadia no Programa de Educação Tutorial (PET) e na graduação.

Ao meu colega de trabalho e amigo, Emerson Sousa pelos ensinamentos, paciência, orientação e conselhos na confecção do TCC e de artigos durante o período de estágio, sendo uma pessoa fundamental para meu desenvolvimento nesse quesito.

Aos colegas de trabalho, Diego Araruna, Eric Vieira Saintrain, Francisco Victor de Oliveira Sousa, Thiago Ivo pelas orientações de como ser um bom engenheiro, além do auxílio na condução do trabalho e adequação do mesmo presando por qualidade e simplicidade.

A Gerdau Aços Longos S.A onde pude estagiar na Aciaria e pude conhecer profissionais excelentes e ótimas pessoas com quem tive a oportunidade e prazer de trabalhar e que levarei para o resto de minha vida.

A todos que diretamente e indiretamente me ajudaram nesta caminhada, meu sincero muito obrigado.

## RESUMO

Como matéria-prima mais importante no processo de fusão do forno elétrico a arco, a sucata deve atender a uma série de pré-condições para ser utilizada como insumo competitivo. No presente estudo, um tipo específico de sucata, caracterizado por suas impurezas intrínsecas, foi submetida a uma metodologia alternativa de processamento a fim de avaliar seu efeito no processo do FEA. Essa sucata possui tamanho inadequado para ser utilizada diretamente no processo e, historicamente, possui grande quantidade de impurezas. A tesoura móvel é um dos equipamentos do pátio de sucata que processa os pacotes de sucata mista por obsolescência, tornando-os adequados para o processo. Existem equipamentos de processamento de sucatas que possuem sistema de limpeza no qual consegue retirar uma parte das impurezas agregadas na sucata, como a Prensa Tesoura, por exemplo. Entretanto, a tesoura móvel não possui nenhum sistema de limpeza, então grande parte das impurezas permanecem agregadas a sucata, o que limita sua utilização no FEA devido a uma piora provocada no rendimento metálico, além de aumentar o consumo de energia específica forno. A prensa tesoura, apesar de ser capaz de processar os pacotes e captar parte das impurezas, não possui grande poder de processamento para esse material devido a geometria e dimensões dos pacotes. O objetivo do presente trabalho é obter um referencial quantitativo de impurezas retiradas dessa sucata pela combinação de duas formas de processamento, tesoura móvel e prensa tesoura. Em testes preliminares, essa combinação propiciou uma menor quantidade de sucata utilizada para abastecer o forno, além de incremento no volume de aço vazado ao com a forma tradicional de utilização. As variáveis rendimento metálico e energia específica foram as principais afetadas nesse teste, cujos resultados foram aceitáveis para poder prosseguir com mais experimentos a fim de explorar todo o potencial da etapa adicionada. Foi observado que os pacotes de sucata mista apresentaram um percentual de impurezas de 9.1% ao serem processados pela tesoura móvel e de 5,12% pela prensa tesoura.

**Palavras-chave:** Sucata; Forno Elétrico a Arco; Rendimento Metálico; Impurezas.

## ABSTRACT

The mobile shear is one of the equipments of the scrap yard which process bundles made by domestic scrap, making it suitable for the process. There are scrap processing equipment that has a cleaning system which remove a part of the impurities aggregated in the scrap, such as the Shear Press, for example. However, the mobile shear does not have a cleaning system, then the major amount of impurity remains incorporated to scrap, which limits its use in EAF, because the impurity reduces the metallic yield and increase the specific energy consumption of the EAF. The shear press is also an equipment capable to process the bundles, but due to size of the bundles, the process capacity of the shear press to this specific kind of scrap is limited. The purpose of this research is got a quantitative reference of impurities removed from this scrap by the combination of two forms of processing, mobile shear and shear press. It was observed that the heats which was using the test scrap had lower charging weight with a higher tapping weight compared to the base heats. The variables metallic yield and specific energy were the main affect in the preliminary test heats using the methodology. The results were acceptable to be able to proceed for more test heats to explore the full potential of the added step at the scrap processing. The processing results showed that 9.1% of impurities were REMOVED by the mobile shear, and 5.12% by the shear press, using the proposed processing rout.

**Keywords:** Scrap. EAF. Impurity. Yield.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração das etapas de redução e refino do processo siderúrgico.....	16
Figura 2 - Custos na produção do aço .....	17
Figura 3 - Tesoura Móvel .....	19
Figura 4 - Escavadeira com implemento de garra abastecendo bandeja da prensa.....	21
Figura 5 - Corte de sucata efetuada pelas navalhas da prensa. ....	21
Figura 6 - Esteira transportadora de sucata e tambor rotativo. ....	22
Figura 7 - Prensa tesoura Harris BSH 1123.....	22
Figura 8 - Sucata tesourada .....	23
Figura 9 - Ilustração dos equipamentos do FEA. ....	25
Figura 10 - Exemplo esquemático de equipamentos da aciaria considerada. Diagrama do processo de produção de aços via aciaria elétrica .....	27
Figura 11 - Gráfico de distribuição normal .....	28
Figura 12 - Fluxograma de atividades .....	29
Figura 13 - Carregamento de pacote de mista .....	30
Figura 14 - Imagem do pacote de mista antes do corte .....	31
Figura 15 - Imagem de tesoura móvel fragmentando pacote de mista.....	31
Figura 16 - Sucata de pacote fragmentado após corte dos pacotes de mista.....	32
Figura 17 - Impurezas contida nos pacotes de sucata mista após carregamento com eletroímã .....	32
Figura 18 - Escavadeira com implemento de imã utilizado para carregar a sucata para teste .	33
Figura 19 - Produção da tesoura móvel estocada ao lado da prensa .....	33
Figura 20 - Representação do processamento da Prensa Tesoura .....	34
Figura 21 - Eletroímã de ponte estacionado ao lado de sucata teste .....	34
Figura 22 - Gráfico comparativo entre quantidade média de sucata em relação à média mensal .....	37
Figura 23 - Gráfico comparativo entre quantidade média de aço vazado em relação à média mensal.....	37
Figura 24 - Gráfico comparativo entre quantidade média de aço vazado em relação à média mensal.....	38
Figura 25 - Gráfico comparativo entre Power o n médio em relação à média mensal.....	38

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resumo dos dados utilizados entre base e teste .....	35
Tabela 2 - Resultados do processamento de sucata após Tesoura Móvel.....	36
Tabela 3 - Resultados do processamento de sucata após Prensa Tesoura.....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>2.1</b>	<b>Aciaria Elétrica</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Pátio de Sucatas</b> .....	16
<b>2.2.1</b>	<b><i>Equipamentos de Processamento de Sucatas</i></b> .....	18
<b>2.2.2.1</b>	<b><i>Tesoura Móvel</i></b> .....	18
<b>2.2.2.1.1</b>	<b>Sucata Fragmentada da Tesoura Móvel</b> .....	19
<b>2.2.2.2</b>	<b><i>Prensa Tesoura</i></b> .....	20
<b>2.2.2.2.1</b>	<b>Sucata Tesourada</b> .....	23
<b>2.2.3</b>	<b><i>Pátio de Preparação de Cestão (PPC)</i></b> .....	23
<b>2.2.4</b>	<b><i>Impurezas e Rendimento Metálico</i></b> .....	24
<b>2.3</b>	<b>Forno Elétrico a Arco (FEA)</b> .....	24
<b>2.4</b>	<b>Forno Panela (FP)</b> .....	26
<b>2.5</b>	<b>Lingotamento Contínuo</b> .....	27
<b>2.6</b>	<b>Análise Estatística</b> .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Produção de Pacote Fragmentado por Tesoura Móvel</b> .....	30
<b>3.2</b>	<b>Processamento de Sucata da Tesoura Móvel utilizando Prensa Tesoura</b> .....	33
<b>3.3</b>	<b>Abastecimento do FEA com Sucata gerada pela Nova Rota de Processamento</b>	34
<b>3.4</b>	<b>Processamento de Dados</b> .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
<b>4.1</b>	<b>Resultados de Remoção de Impurezas da sucata</b> .....	36
<b>4.2</b>	<b>Resultados do processo do Forno Elétrico a Arco utilizando a sucata teste</b> ..	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	40
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	41

## 1 INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas estão divididas em integradas e semi-integradas. As integradas utilizam ferro primário (minério de ferro) como matéria prima para produzir aço nos Altos Fornos, enquanto as semi-integradas utilizam sucata de aço como fonte para Fornos Elétricos a Arco (MOURÃO, 2007). A sucata é a matéria prima mais importante nas aciarias elétricas e representa entre 60% a 80% no custo de fabricação do aço, valor que vai depender das condições de mercado (ALVES, 2016).

O pátio de sucatas tem como função principal abastecer o pátio de preparação de cestão (PPC) com sucata dentro dos padrões de tamanho e limpeza, que será utilizada para confeccionar os cestões respeitando uma ordem correta de sucatas dispostas em camadas. Essa disposição específica serve para acomodar a sucata da melhor forma possível para não danificar componentes do FEA. A sucata é classificada de acordo com densidade, tamanho e quantidade de impurezas e então destinadas ao Pátio de Preparação de Cestão se todos esses parâmetros estiverem dentro dos padrões. O classificador é a pessoa que tem função de analisar a quantidade de impurezas presentes na carga e garantir sua conformidade com as características estabelecidas seguindo a instrução técnica interna de sucatas. Quando algum dos parâmetros não estiver conforme, a sucata é classificada como não pronta e é enviada para ser processada no maquinário mais adequado, que varia conforme o tipo de sucata. Ao passar por qualquer processamento, a sucata não pronta recebe um incremento de valor de custo referente a utilização daquele equipamento que será somado ao seu valor inicial, agregando custo ao processo (JOHN 2009). Por isso, é de suma importância que cada tipo de sucata não pronta tenha seu processamento bem definido conforme suas configurações (KOHMANN, 2015).

Um dos maquinários de processamento de sucatas é a prensa tesoura. Esse equipamento tem finalidade de aumentar a densidade da sucata, podendo ser complementada com outros dispositivos e equipamentos que permitem reduzir as impurezas e residuais, no caso em questão, a prensa possui um tambor magnético giratório para essa finalidade. O maquinário opera principalmente com sucata de obsolescência doméstica na qual pode apresentar altos níveis de impurezas, e baixa densidade. A sucata doméstica ainda pode ser compactada por um equipamento que somente realiza a prensagem dessa sucata, formando um pacote de sucata de obsolescência. Esse formato dado a sucata viabiliza o transporte em grande quantidade para ser entregue nas usinas. Entretanto, a quantidade de impurezas contida ainda é um problema para o processo, além disso, as dimensões dos pacotes geralmente estão fora do padrão aceitável para classificar essa sucata como pronta para consumo. A prensa tesoura é capaz de processar

os pacotes, porém de forma limitada, devido ao tamanho. Então, uma maneira de viabilizar o uso desse material no forno é por meio de tesouras móveis. Esse maquinário pode efetuar vários cortes nos pacotes e o produto do processamento é uma sucata com aspecto fragmentado. Esse tipo de processamento pode ser utilizado em ocasiões de alto estoque desse material, ou quando a prensa tesoura estiver com problemas de funcionamento e que não haja nenhuma outra forma de processamento. Uma das principais diferenças entre tesoura móvel e prensa tesoura é que a última não possui mobilidade, entretanto possui um sistema de limpeza de impurezas e de aumento de densidade.

Esse trabalho tem o objetivo de avaliar se há uma quantidade de impurezas relevante em determinado tipo de sucata além de analisar uma combinação de processamentos, utilizando tesoura móvel seguido de prensa tesoura para melhorar a condição final da sucata de pacote de obsolescência mista, e quantificar um valor médio de impurezas a ser retirado dessa sucata, que tradicionalmente são utilizadas de forma singular

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse Tópico serão apresentados conceitos de operação do FEA, Prensa Tesoura e Tesoura móvel. A aciaria em questão possui lingotamento contínuo, então a descrição de funções inicia na aciaria elétrica falando do FEA e encerra com um aprofundamento no pátio de sucatas. Será abordado o processo de produção do aço, funções do pátio de sucatas, funcionamento da prensa tesoura, funcionamento da Tesoura móvel e como a sucata pode influenciar no rendimento metálico.

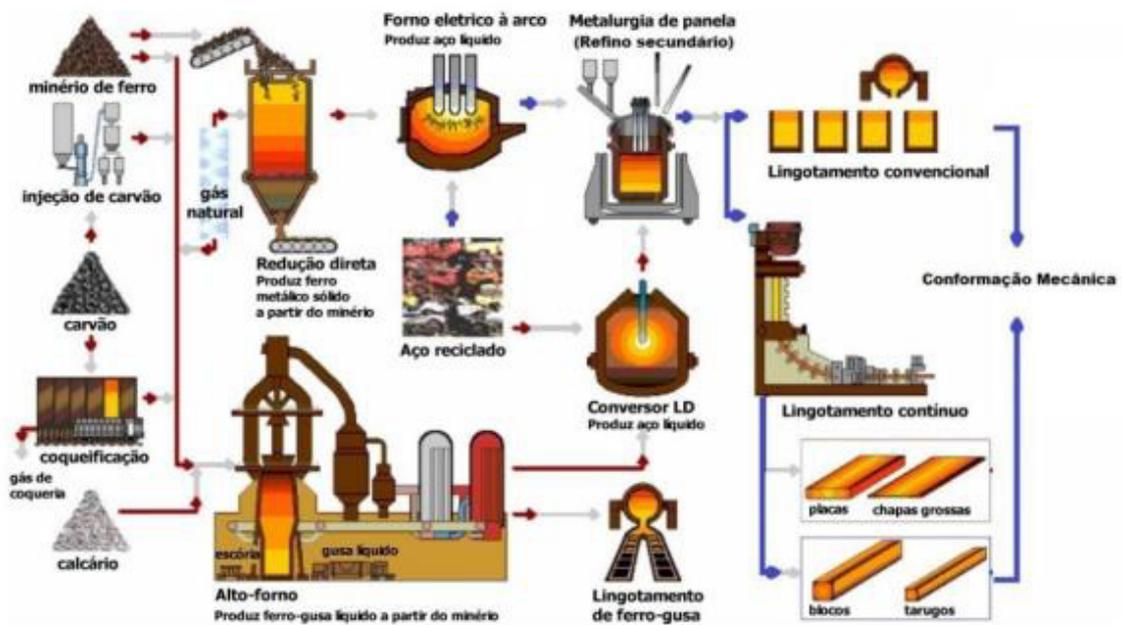
### 2.1 Aciaria Elétrica

A produção mundial de aço se baseia em dois tipos de usinas siderúrgicas: Integradas e semi - integradas. A usina integrada contempla as 3 etapas do processo siderúrgico: Redução, refino e conformação mecânica, e produz aço via Alto forno/conversor BOF enquanto as usinas semi integradas realizam duas etapas do processo siderúrgico, geralmente etapas de refino e conformação mecânica, utilizando o Forno Elétrico a Arco. Cerca de 28% da produção mundial de aço se deve ao FEA e 72% aos Altos Fornos (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2018).

Na redução, o óxido de ferro se torna ferro metálico no processo do alto forno ou por redução direta. O alto forno produz ferro gusa líquido com uma faixa de 4% de carbono em sua composição, enquanto que a redução direta produz o ferro esponja. O ferro primário, ou ferro gusa, passa então para etapa de refino na aciaria. Alternativamente ao ferro primário, pode ser empregada sucata de aço reciclado como fonte de ferro na aciaria, através dos processos de conversor LD ou forno elétrico a arco. Ainda na aciaria, o aço após refino secundário é solidificado na forma de produtos semiacabados. Estes passam pela etapa de conformação mecânica na qual tomam a forma final do produto (RIZZO, 2005).

As etapas de redução e refino com seus principais equipamentos e matérias-primas estão ilustradas na Figura 1. Destacado em azul, pode-se observar a rota de produção da aciaria na qual foi desenvolvido o trabalho.

Figura 1 - Ilustração das etapas de redução e refino do processo siderúrgico.



Fonte: Adaptado de Moreira (2012).

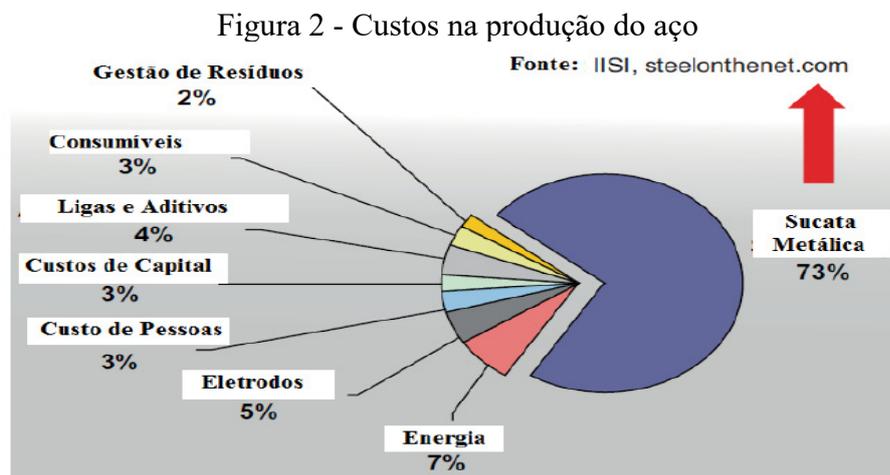
A Figura 1 mostra a diferença entre os 2 tipos de usinas, tanto em questão de matéria-prima na entrada, como também os diferentes equipamentos utilizados para a produção de aço. Uma semelhança entre os tipos de usina apresentados é o processo de lingotamento, que pode ser convencional ou contínuo. Após essa etapa, o processo fornece um produto semi-acabado que, posteriormente, pode ser trabalhado para obtenção de produtos através de processos como: laminação, trefilação, forjamento, entre outros (RIZZO, 2005).

O fluxo destacado de azul representa uma usina semi-integrada, onde matéria-prima utilizada para abastecer o FEA é a sucata ferrosa. O fluxo destacado de vermelho representa uma usina integrada, é possível visualizar a entrada de minério de ferro como matéria-prima, além do minério, coque e fluxantes são adicionados para ocorrer a redução e fusão no alto-forno, dando origem ao ferro-gusa (produto ferroso com teores de carbono entre 4 e 5%). Após o vazamento, o ferro-gusa é levado para o conversor a oxigênio onde será feito o refino oxidante.

## 2.2 Pátio de Sucatas

Local onde a sucata é classificada, processada quando necessário (fora do padrão exigido pelo forno) e destinada para as baias do PPC. De acordo com a origem da sucata ela pode ser classificada em sucata de retorno interno, obsolescência ou industrial (CHEVRAND, 2007).

A sucata ferrosa pode ser classificada em torno de 20 tipos para aço ao carbono e mais de 100 para aços inoxidáveis (SANDBERG, 2005). A sucata ferrosa é responsável, em média, por 70% do custo de produção do aço e também influencia nos parâmetros do forno, a qualidade do aço líquido, emissão de gases e composição da escória (MALFA, 2013). A Figura 2 mostra um gráfico com representações de custos na produção do aço em uma aciaria.



Fonte: Adaptado de Malfa (2013)

A principal função de um pátio de sucatas é transformar e adequar o material recebido de acordo com as exigências do forno, aliado ao menor custo possível. A sucata é separada e classificada de acordo com seu tamanho, densidade, composição química, procedência e método de processamento (SANDBERG, 2007).

As sucatas podem ser classificadas em três categorias:

1. Sucata de retorno interno: São sucatas geradas pela própria usina, como despontes da laminação, tarugos com problemas de composição, romboidade ou porosidade, escória recuperada e beneficiada, entre outros. Um fato é que esse tipo de sucata está em declínio, pois os processos estão cada vez mais robustos, diminuindo a perda metálica (JOHN, 2009).

2. Sucata industrial: proveniente da transformação do aço em produto acabado. Dependendo da localização da siderúrgica pode haver grande demanda deste tipo de sucata (JOHN, 2009).

3. Sucata de obsolescência: proveniente de materiais considerados obsoletos e irrecuperáveis para o uso, corresponde à sucata que chega à usina depois de 15 anos ou mais de sua produção original (JOHN, 2009). Dentro dessa classe, ainda há duas subdivisões: sucata de obsolescência doméstica, que é formada por materiais domésticos como: fogões, geladeiras,

automóveis, latarias, entre outros ou sucata de obsolescência graúda, que é uma categoria de sucata com maior densidade e espessura, como trilhos de ferrovias, por exemplo.

### ***2.2.1 Equipamentos de Processamento de Sucatas***

Um dos requisitos importantes de segurança de uma usina com FEA é o tamanho da sucata, no qual o tamanho pode variar de forno para forno. Além de parâmetros como densidade e quantidade de impurezas que precisam ser melhorados antes do carregamento (Alves, 2016) . Os principais métodos utilizados no processamento de sucata para este fim são:

- Prensa pacote: utilizada para formar pacotes de sucata;
- Prensa tesoura: É um dos principais meios de produção dos Pátios de Sucata no quesito de produtividade, ficando atrás apenas do Shredder. Consiste em prensar a sucata e depois uma tesoura guilhotina corta a mesma, em alguns casos é utilizada uma calha vibratória para retirar impurezas;
- Oxicorte: Nome dado a área com linhas de maçaricos apropriados 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 tritura a sucata e realiza separação magnética, promovendo a retirada de impurezas;

#### ***2.2.2.1 Tesoura Móvel***

As Tesouras Hidráulicas Móveis, adaptadas em máquinas escavadeiras, processam um volume menor de sucata em comparação com prensas tesouras, no entanto, em função da possibilidade de deslocamento, são utilizadas para desmontes de estruturas armadas, processamento de sucatas e de equipamentos de grande volume de forma cirúrgica mais precisa, com maior segurança e menor exposição dos operadores na atividade. O equipamento tesoura é composto por uma estrutura em aço que suporta um conjunto de navalhas que executam o corte, acionadas por um cilindro hidráulico. A tesoura possui um dispositivo de acoplamento para o braço de escavadeira, proporcionando a função de movimentação necessária para posicionar as navalhas na região de corte desejado. Este dispositivo, em alguns modelos mais avançados, possui uma junta rotatória movimentada hidraulicamente, permitindo a tesoura girar em seu próprio eixo, proporcionando maior precisão e facilidade para posicionamento das

navalhas na região a ser cortada (MÓDULO TÉCNICO GERDAU). A Figura 3 a seguir mostra um exemplo de tesoura móvel.

Figura 3 - Tesoura Móvel



Fonte: Próprio Autor

#### 2.2.2.1.1 Sucata Fragmentada da Tesoura Móvel

A sucata processada por esse equipamento normalmente é de obsolescência graúda com espessura superior a 3mm e possui densidade superior a sucata tesourada. Porém, em certas ocasiões, como alto estoque de pacote de mista, o pátio de sucatas pode processar essa sucata utilizando as tesouras e a sucata recebe o nome de pacote fragmentado. O perfil dessa sucata se assemelha a sucata tesourada, pois ambas são provenientes da sucata mista, o que difere é o processamento, limpeza e densidade, pois o pacote fragmentado pela tesoura móvel é apenas cortado, sem passar por um sistema de prensagem para conferir densidade, além de não possuir nenhum sistema de limpeza. Por isso, sua densidade média é bastante próxima da sucata mista por obsolescência, possuindo um valor médio e histórico de  $0,3t/m^3$ . Por esses motivos, o percentual dessa sucata utilizado para confeccionar o cestão na usina em questão é baixo.

### 2.2.2.2 Prensa Tesoura

A Prensa tesoura é o equipamento que basicamente prensa e corta sucata. O abastecimento desse equipamento pode ser realizado por um guindaste ou manipuladores de sucata com implemento de garra. A prensa tesoura possui 3 sistemas principais:

**Sistema Hidráulico:** Esse módulo é o que serve para executar os movimentos principais da prensa. É constituído por: Motores e Bombas hidráulicas, geram pressão para acionamento dos cilindros de movimentação; Motor e Bomba Piloto, geram pressão hidráulica para acionamento das válvulas; Motor e Bomba para resfriamento do óleo hidráulico; motor e bomba do filtro de óleo; Motor e bomba de lubrificação; Tanque de óleo Hidráulico.

**Caixa da prensa:** Esse é o recipiente que recebe a sucata a ser processada e é constituído por: Empurradores laterais esquerdo e direito com objetivo de prensar lateralmente a sucata; Bandeja; é uma mesa onde a sucata é colocada para ser depositada dentro da caixa da prensa; Abas esquerda e direita, com função de deixar a sucata com um pré formato para facilitar o fechamento da caixa.

**Prensa e Corte:** Módulo que aumenta a densidade da sucata. É constituído pelo Cilindro empurrador: Empurra a sucata que está dentro da caixa em direção ao corte; Cilindro de Prensagem: Executa a prensagem final da sucata; Cilindro de corte, dotado de navalhas superiores e inferiores para efetuar o corte da sucata.

Além desses 3 módulos, existe o sistema calhas vibratórias e esteiras transportadoras de sucata. que são acionadas eletricamente com função de transportar e separar impurezas menos agregadas contidas na sucata enquanto a mesma é deslocada para o sistema de limpeza (caso exista), ou para transportar para caminhões ou para descarregar em uma baía pré determinada. Na usina em questão, existe um quarto sistema, que seria o sistema de limpeza efetuado por um tambor magnético giratório.

**Tambor Magnético Giratório:** Tambor rotativo com área interna dotada de aletas e furas que possibilitam a queda da sucata e a remoção de impurezas nela contidas. Nesse tambor ainda há uma separação magnética que retira um percentual metálico que ainda esteja agregado as impurezas.

O fluxo de processamento na prensa tesoura pode ser dividido em 4 etapas:

#### **1. Abastecimento:**

A prensa é abastecida por meio de uma escavadeira com implemento de garra ou por meio de um guindaste. A sucata é depositada na bandeja que deixa a sucata pré formatada para cair na caixa da prensa.

Figura 4 - Escavadeira com implemento de garra abastecendo bandeja da prensa



Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

## 2. Compactação:

A sucata é comprimida pelas laterais por meio das abas e também é comprimida por meio do cilindro empurrador que pressiona a sucata formando os pacotes.

## 3. Corte:

Um conjunto de navalhas, 2 superiores e 2 inferiores realizam o cisalhamento dos pacotes conforme tamanho previamente escolhido no sistema da máquina.

Figura 5 - Corte de sucata efetuada pelas navalhas da prensa.



Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

#### 4. Tambor Rotativo:

A sucata após cortada é transportada para o tambor rotativo, como pode-se ver na Figura 6, por meio de esteiras. O sistema de limpeza consta com camisa interna dotada de aletas e furos que possibilitam a queda da sucata e a remoção das impurezas nela contidas.

Figura 6 - Esteira transportadora de sucata e tambor rotativo.



Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

A sucata despejada no tambor no qual gira e faz que as impurezas ainda agregadas a superfície caiam e os finos de sucata sejam despejados no fundo do tambor. O sistema de limpeza pode ser dotado de separação magnética para separar os metálicos aproveitáveis que estejam junto com as impurezas (terra). A Figura 7 a seguir representa uma visão geral do fluxo de processamento da prensa tesoura.

Figura 7 - Prensa tesoura Harris BSH 1123



Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

#### 2.2.2.2.1 Sucata Tesourada

A prensa tesoura processa diversos tipos de sucata como: Obsolescência mista, Pacote de Mista e Miúda de obsolescência. Todas essas sucatas após passarem pelo fluxo da prensa são chamadas de Sucata Tesourada. Ela é uma sucata que apresenta algumas vantagens em relação à sucata que foi colocada inicialmente no processo como:

Densidade (Valor médio de 0,60t/m<sup>3</sup>)

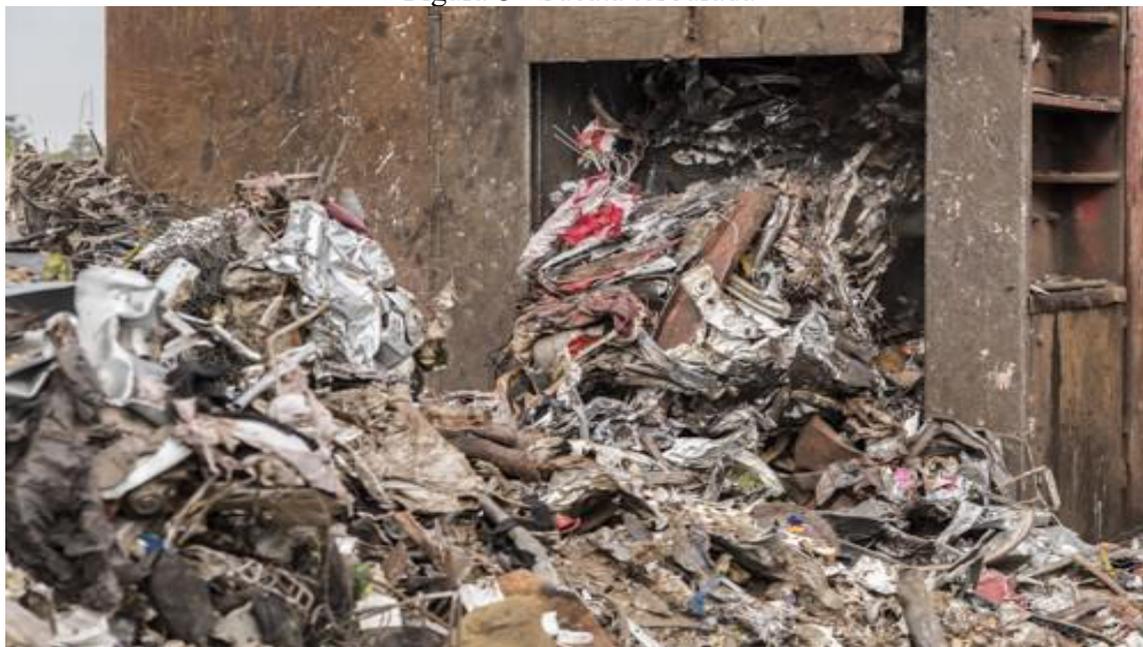
Menor nível de impurezas

Dimensões

Facilidade de transporte em relação a sucata mista

A sucata tesourada, como pode-se ver na Figura 8, por possuir maior densidade, possibilita a utilização de um menor número de cestões de carregamento, o que reduz as perdas de energia e reduz o consumo de insumos do forno e refratários. Além disso, a redução do teor de impurezas favorece queda consumo de energia, eletrodos e de tijolos refratários presentes no forno e maior produção devido a ganho de rendimento. (Módulo de treinamento Gerdau)

Figura 8 - Sucata tesourada



Fonte: <https://www.sucataaeroporto.com.br/sucata-industrial>

#### 2.2.3 Pátio de Preparação de Cestão (PPC)

O PPC é um elo entre o pátio de sucatas e Forno Elétrico a Arco. Esse local é dividido em baias onde estão estocadas as sucatas prontas para abastecimento, seguindo todas as normas de segurança exigidas pelo forno, como ausência de pressurizados, ausência de mistura de materiais carburantes das demais sucatas e sucata em tamanho limite padrão. Esse local ainda

possui pontes de carregamento de sucatas dotadas de eletroímã ou garra. O objetivo principal do PPC é abastecer os cestões com sucata pronta para consumo, seguindo uma formatação de cestão específica com quantidades e tipos de sucata pré estabelecidos para garantir a integridade do FEA e da operação.

#### **2.2.4 Impurezas e Rendimento Metálico**

O rendimento metálico e impurezas estão diretamente relacionados no processo de fabricação de aço. Quanto maior o nível de impurezas presente na sucata, menor será o peso vazado para uma mesma quantidade de sucata colocada no cestão. Impurezas como: terra, plástico, borracha não contribuem para fabricar tarugos, vergalhões e cantoneiras de aço. Esses elementos são indesejáveis para o processo e são incorporados à escória. Um alto nível de impurezas agregado na sucata representa aumento de custo para o processo.

A sucata é o insumo empregado em maior quantidade e com grande valor agregado, é de interesse que ela chegue ao forno com um baixo nível de impurezas e dimensões adequadas para evitar a ocorrência de interrupções no processo de fusão (GUNN, 2006; RECKZIEGEL, 2012).

A principal influência da sucata no rendimento metálico é a quantidade de impureza contida nela. As impurezas podem ser classificadas como intrínsecas e extrínsecas (NASCIMENTO, 2008):

- Impureza intrínseca - Está agregada à sucata e faz parte da natureza da mesma. Desde que não esteja em quantidades acima do normal, é um fator conhecido e levado em conta no processo. Ferrugem e revestimentos superficiais são exemplos de impureza intrínseca;
- Impureza extrínseca - é aquela que pode estar agregada ou solta no meio da sucata. Terra, papel e plástico são exemplos de impureza extrínseca. As impurezas extrínsecas geram gases, poeira de aciaria, e podem acabar na escória do FEA e, por isso, pode causar quedas no rendimento metálico. Muitas sucatas passam por processamento para que esta impureza possa ser retirada e o uso desta sucata seja possível no FEA(VIEIRA, 2017).

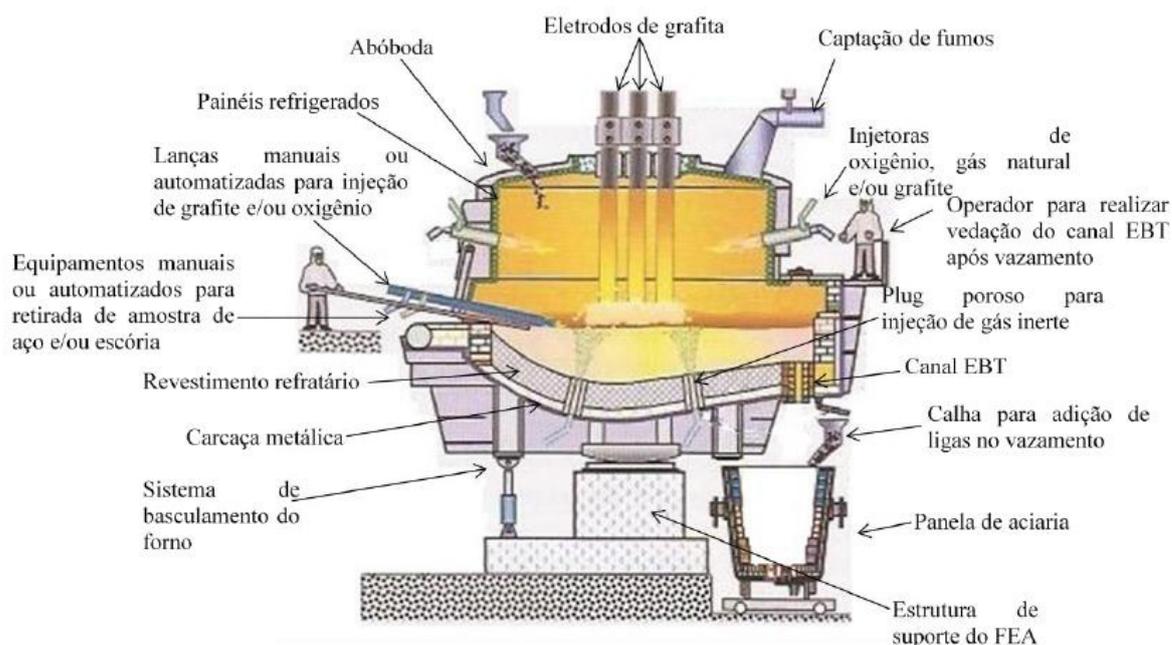
### **2.3 Forno Elétrico a Arco (FEA)**

O Forno elétrico a arco é a primeira etapa do refino. Seus principais objetivos são a fusão da carga, a descarburização e a desfosforação. A maior parte da energia para a fusão é transmitida através de um arco voltaico estabelecido entre a carga metálica e os eletrodos de

grafita do forno, sendo o restante da energia proveniente das diversas reações químicas atuantes. Durante esta etapa ocorre a injeção de oxigênio para criar uma condição oxidante. O aço líquido é então vazado do forno para uma panela siderúrgica com revestimento refratário para dar seguimento ao processo de refino secundário (MOURÃO 2007).

Os equipamentos e estrutura principal de um FEA são ilustrados na Figura 9. O equipamento é formado por uma carcaça metálica revestida por material refratário na parte inferior até a metade da estrutura, e desse ponto em diante o FEA é composto por painéis refrigerados até a parte superior. A carcaça do forno ilustrado é recoberta pela abóbada, que é por onde os eletrodos de grafita condutores e geradores de eletricidade descem. Estes são os responsáveis pela formação do arco elétrico e pela transferência da energia elétrica para a sucata, promovendo a fusão. (ARAUJO, 2009).

Figura 9 - Ilustração dos equipamentos do FEA



Fonte: Adaptado de RIZZO,2005.

Na parte inferior da carcaça há o sistema de basculamento que inclina o forno para retirar escória ou para vaziar o aço líquido. No vazamento de aço, a operação é feita pelo Excentric Bottom Tapping (EBT), chamado de Canal EBT, que é um canal de vazamento excêntrico no qual vaza o aço para a panela de aciaria.

Há ainda um sistema de jato supersônico, que se encontram na parte superior da carcaça do forno. Seu objetivo é realizar o refino oxidante e auxiliar na fusão e derripar a sucata. Os gases geralmente utilizados são oxigênio e gás natural. A geometria que os gases são

lançados é bem definida, consiste em um jato principal supersônico de oxigênio é circundado por um jato de gás natural, o qual é novamente circundado por um jato de proteção de oxigênio. Esse design faz com que o jato permaneça concentrado por uma distância maior, aumentando a temperatura e o alcance do jato (MATHUR, 2001). Juntamente com o jato supersônico, são colocadas injetoras de carbono, geralmente na forma de grafita, ou carvão ou coque de petróleo para promover a formação de uma escória espumante durante o refino e redução dos óxidos de escória.

O Forno Elétrico a Arco basicamente consiste em 5 etapas: Carregamento, Fusão, Refino oxidante, retirada de escória e vazamento respectivamente.

O carregamento é feito ao abrir o fundo do cestão com este centralizado no FEA de abóbada aberta. A sucata é despejada, abóbada é fechada e o processo de fusão é iniciado. Um importante ponto é a densidade da sucata. Quanto menor a densidade média da sucata utilizada, mais carregamentos serão necessários para atingir a carga de trabalho do forno. Um carregamento adicional pode gerar o custo da perda de tempo, menor rendimento metálico (devido à oxidação), maior consumo de eletrodos e de energia elétrica. Para cada carregamento há um gasto adicional estimado de 10 – 20 KWh/t. (BARKER et al, 1998).

Logo após o carregamento, os eletrodos de grafita descem e a fusão é iniciada. A fusão segue até que quase toda sucata esteja fundida. A fusão é interrompida assim que houver espaço suficiente para receber o próximo carregamento de sucata.

Após todos os cestões serem descarregados no FEA e após toda a sucata estar fundida, é iniciado o refino oxidante. Nesse momento também é iniciado a geração da escória espumante. O objetivo principal dessa etapa é promover descarburização e desfoforação por meio da oxidação. O produto do processo é o monóxido de carbono, captado pelo sistema de captação de pós de aciaria. O fósforo, elemento que fica retido na escória, é removido com a prática de remoção de escória durante o refino, preferencialmente nos momentos iniciais do refino, pois a reação de desfoforação é favorecida por baixas temperaturas (BARKER et al, 1998).

Por fim, assim que a temperatura pré estabelecida é alcançada, é realizado o vazamento, no qual o aço passa pelo canal EBT. Após o vazamento do aço na panela de aciaria, são adicionados ferroligas, desoxidantes e fluxantes, sendo o ajuste fino de composição química e temperatura realizados no Forno Panela.

## **2.4 Forno Panela (FP)**

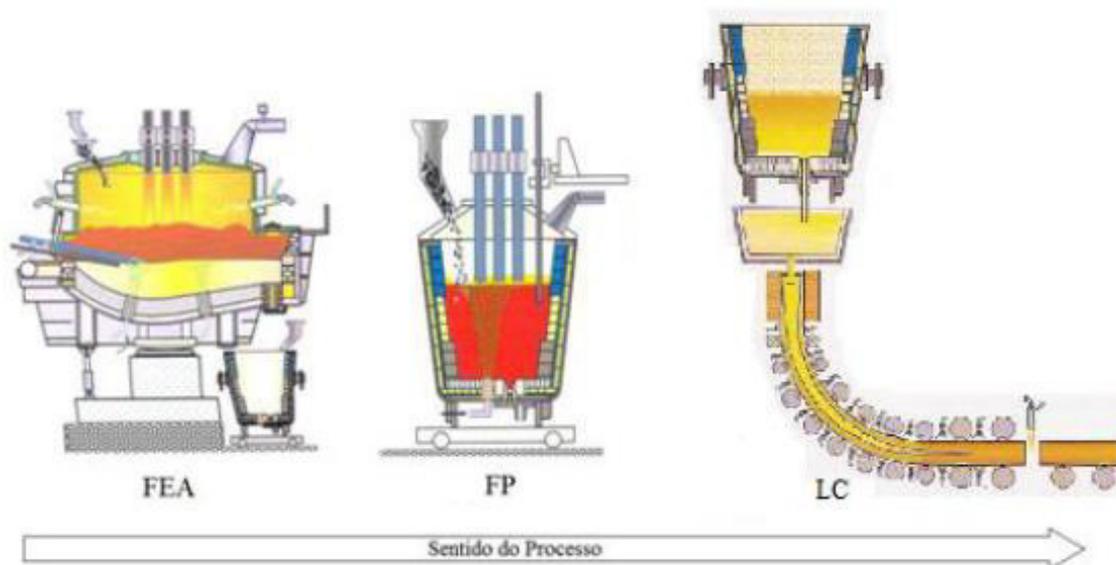
Local onde ocorre o refino secundário cujo objetivo é a desoxidação e a dessulfuração através de uma escória redutora. O objetivo principal do Forno Panela é entregar

o aço para o lingotamento contínuo com composição química e temperatura correta (Bittencourt 2015) . O ajuste de composição química é feito por adição de ferroligas, e o ajuste de temperatura é feito por aquecimento via arco elétrico, semelhante ao FEA. Ao contrário do FEA, o refino secundário não tem caráter oxidante, mas sim, redutor, o que promove desoxidação do aço. Nessa etapa também ocorre a dessulfuração e correção da composição química do aço (RIZZO, 2005). No FP ainda há um processo de rinsagem, que pode ser realizado com nitrogênio ou argônio, cujo objetivo é manter a mistura de aço líquido homogênea.

## 2.5 Lingotamento Contínuo

A etapa de lingotamento contínuo é responsável pela solidificação do aço na forma de produtos semiacabados chamado de tarugos. A panela que vem do refino secundário é posicionada acima do distribuidor que recebe o aço oriundo do FP e agora tem a função de distribuir o aço nos moldes para ocorrer a solidificação. Outro objetivo do distribuidor é agir de forma intermediária para tornar o processo contínuo. Do distribuidor o aço vai para o molde, onde ocorre o resfriamento primário que forma uma fina camada sólida nas extremidades do tarugo. Logo em seguida, o tarugo passa para um resfriamento através da projeção de água na superfície, conhecido por resfriamento secundário, e então para o resfriamento de irradiação livre (MOURÃO, 2007) (RIZZO, 2005). A Figura 10 abaixo representa um esquema dos processos até a chegada no lingotamento contínuo, desde o FEA até o posicionamento do FP em cima do distribuidor para passagem do aço líquido que será lingotado.

Figura 10 - Exemplo esquemático de equipamentos da aciaria considerada. Diagrama do processo de produção de aços via aciaria elétrica

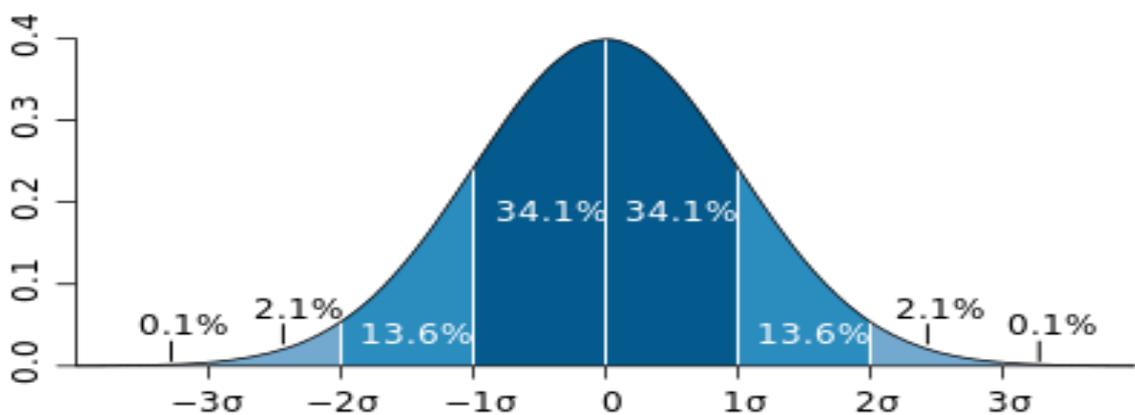


Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005

## 2.6 Análise Estatística

A análise estatística é de suma importância para a solução de problemas. A abordagem envolve conceitos estatísticos e matemáticos, como a curva de distribuição normal, conhecida também por distribuição Gaussiana, vista na Figura 11. Muitos fenômenos naturais demonstram um padrão chamado “Curva de Distribuição Normal. Um exemplo disso é tentar medir a altura de todos os seus colegas no trabalho, ou o tempo que eles levam para tomar uma xícara de café e você encontrará uma curva de distribuição normal padrão que se assemelha à forma de um sino.

Figura 11 - Gráfico de distribuição normal



Fonte: <https://www.monolitonimbus.com.br/distribuicao-normal/>

O desvio padrão,  $\sigma$ , é uma medida de quão estreitamente agrupado ou quão espaçado aparece um conjunto de dados. É uma das medidas de dispersão. Uma distribuição normal padrão tem uma média de zero e um desvio padrão de um. A média identifica a posição do centro e o desvio padrão determina a altura e largura do sino.

A curva é um dos conceitos estatísticos mais importantes dessa abordagem orientada por dados, principalmente em processos que geram bastante dados de processo. Se bem utilizado, o Lean Seis Sigma pode resolver problemas onde o número de defeitos é muito alto, que, estatisticamente, representam alta variação no processo.

Para fabricar aço em uma usina siderúrgica que utiliza diversos tipos sucatas como matéria prima faz-se o uso dessa abordagem como forma de análise. Uma análise bem realizada com os dados bem tratados pode gerar informações importantes que auxiliam na tomada de decisão, como usar mais de uma sucata X porque melhora o rendimento metálico, ou reduzir o uso de uma sucata Y porque a mesma aumenta o consumo de energia, por exemplo.

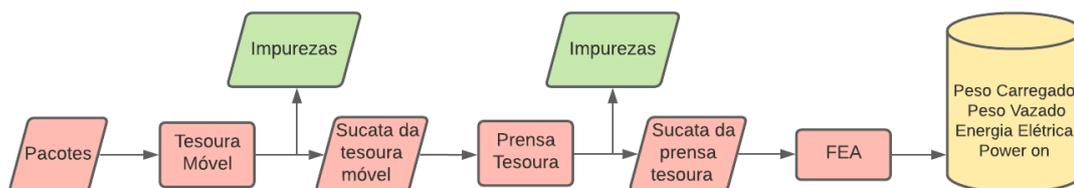
Se os dados seguem uma curva de distribuição normal, significa que os dados são elegíveis para determinados testes estatísticos que são usados no estágio de análise do processo

Seis Sigma. Geralmente é preciso tratar os dados para eliminar aqueles que podem atrapalhar na análise do fenômeno em questão. Geralmente, esse tipo de dado é chamado de outlier, ou seja, são dados ruins ou de valores atípicos, ou uma observação que apresenta um grande afastamento das demais da série (Ramos R. A). Por isso, é interessante considerar amostras que possuam um afastamento de até 3 desvios padrão da média, pois a representatividade e a segurança desses dados representarem verdadeiramente o processo é bem maior.

### 3 METODOLOGIA

O primeiro passo foi definir uma sequência de ações para garantir a integridade do teste. Inicialmente, a tesoura móvel processou os pacotes de mista durante um dia, e uma amostra foi retirada para avaliar as perdas desse processamento. Após a produção ter sido finalizada, a sucata foi transportada para a prensa tesoura iniciar o seu processamento. Também foi realizado cálculo de rendimento para mensurar um valor médio de limpeza que a prensa ainda consegue retirar da sucata processada pela tesoura móvel. Após a sucata ser processada pela prensa tesoura, esta foi utilizada no FEA da mesma forma que a sucata processada pela tesoura móvel é utilizada, tanto na posição do cestão quanto em quantidade. Os dados gerados pelo sistema do FEA foram captados e então foi possível realizar uma análise comparativa entre método tradicional de processamento com a combinação das tesoura móvel e prensa tesoura.. A figura 12 representa um fluxograma que resume as atividades realizadas para o teste.

Figura 12 - Fluxograma de atividades



Fonte: Próprio Autor

A sucata de pacotes será primeiramente processada pela Tesoura Móvel, conforme projeto original. Após o primeiro processamento é produzida uma quantidade de sucata da tesoura móvel, bem como uma quantidade de impurezas. Este primeiro processo pode ser representado pela Equação 1 abaixo:

$$W_{TM} = W_P - W_{TM}^I \quad (1)$$

Em seguida, a sucata de tesoura móvel é submetida a outro processo de maior agregação metálica, que é a rota proposta do presente estudo, pela prensa tesoura. Novamente, um novo par de materiais será produzido, a sucata da prensa tesoura e as impurezas dela extraídas. A equação 2 abaixo expressa a rota descrita anteriormente:

$$W_{PT} = W_{TM} - W_{PT}^I \quad (2)$$

Para ambas as máquinas, pode-se determinar a fração mássica de impurezas, para as Impurezas de Tesoura Móvel:

$$Y_{TM}^I = \frac{W_P}{W_{TM}} \quad (3)$$

E para as impurezas da Prensa Tesoura,  $Y_{PT}^I$ :

$$Y_{PT}^I = \frac{W_{PT}}{W_{TM}} \quad (5)$$

É importante mencionar que, por razões logísticas e econômicas,  $Y_{TM}^I$ , é medido apenas para uma amostra de pacotes de mista, depois extrapolado para todos os processos de Tesoura Móvel. A medição de produção da tesoura móvel é feita por um procedimento padrão que não está no escopo do presente estudo (que envolve a escala de pesos conhecidos de caminhões que viajam carregados com a sucata). Como tal, tomou-se a preocupação de utilizar pacotes com forma e tamanho semelhantes. Por fim, a sucata de teste é submetida ao processo FEA, e os dados coletados são posteriormente analisados.

### 3.1 Produção de Pacote Fragmentado por Tesoura Móvel

Inicialmente a sucata de pacote de mista foi carregada de um caminhão de fornecedor externo para dentro de um outro caminhão, utilizado na movimentação interna de sucatas. Após o carregamento, a sucata foi pesada. A Figura 13 mostra o carregamento sendo realizado por escavadeira com implemento de garra.

Figura 13 - Carregamento de pacote de mista



Fonte: Próprio Autor

O objetivo dessa atividade é ter conhecimento do peso inicial dos pacotes, antes do corte por tesoura móvel. Após processamento dessa sucata pela tesoura móvel é realizada uma nova pesagem e então é feita uma divisão do peso carregado, após processamento, pelo peso inicial para obter o percentual de impurezas contido nos pacotes. A diferença de peso carregado representa o montante de impureza que ficou no chão após a escavadeira com implemento de imã efetuar o carregamento de produção no caminhão. A sequência de Figuras 14, 15, 16, 17 e 18 mostram o antes e depois da sucata após processamento.

Figura 14 - Imagem do pacote de mista antes do corte



Fonte: Próprio Autor

Figura 15 - Imagem de tesoura móvel fragmentando pacote de mista



Fonte: Próprio Autor

Figura 16 - Sucata de pacote fragmentado após corte dos pacotes de mista



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 - Impurezas contida nos pacotes de sucata mista após carregamento com eletroímã



Fonte: Próprio Autor

Figura 18 - Escavadeira com implemento de imã utilizado para carregar a sucata para teste



Fonte: Próprio Autor

### 3.2 Processamento de Sucata da Tesoura Móvel utilizando Prensa Tesoura

Após um dia inteiro de produção, a sucata de pacote fragmentado pela tesoura móvel foi carregada para uma área isolada, próxima à prensa móvel, figura 18, e então foi iniciado o processamento. A sucata processada é depositada diretamente no PPC, sendo estocada e carregada com auxílio de eletroímã. As Figuras 19 e 20 mostram a sucata teste já pronta para utilização

Figura 19 - Produção da tesoura móvel estocada ao lado da prensa



Fonte: Próprio Autor

Durante a passagem dessa sucata pela prensa tesoura, toda a impureza gerada foi recolhida em uma caixa que estava inicialmente vazia. No final do processamento, a caixa foi retirada do local de descarga de impurezas da prensa e foi pesada para realização de cálculos de rendimento. A Figura 19 mostra uma representação da Prensa Tesoura em operação

Figura 20 - Representação do processamento da Prensa Tesoura



Fonte: Próprio Autor

### 3.3 Abastecimento do FEA com Sucata gerada pela Nova Rota de Processamento

Na usina em questão, a sucata processada na prensa é descarregada diretamente no pátio de preparação de cestão. Os operadores de ponte com eletroímã têm função de recolher essa sucata e estocar em um local pre determinado, seguindo um layout padrão. Como se tratava de uma sucata para teste, o local de estoque foi bem separado para não haver possibilidade de mistura de materiais. A Figura 20 mostra Eletroímã de Ponte estacionado próximo a sucata teste.

Figura 21 - Eletroímã de ponte estacionado ao lado de sucata teste



Fonte: Próprio Autor

A sucata de pacote fragmentado pela tesoura móvel é geralmente utilizada na primeira camada do primeiro cestão a ser carregado. Como o objetivo do teste é comparar essa sucata, que apenas é cortada pela tesoura móvel, com essa mesma sucata com um adicional de processamento da prensa, que possui um sistema de limpeza, foi substituído da receita tanto em posicionamento do cestão, quanto em quantidade, a sucata de pacote processada por rota e metodologia tradicional, pela sucata processada mediante a nova rota proposta. Os lotes e dados dessas corridas foram coletadas para efetuar as análises e comparações.

### 3.4 Processamento de Dados

Para evitar grandes discrepâncias nos resultados durante a fase de análise dos dados, foram excluídas as corridas com base nos seguintes critérios:

- Peso de aço produzido por corridas menores que 16t
  - Esse refere-se a um procedimento não comum ao processo que são corridas em que o forno foi esgotado. A média de aço produzido por corrida referente ao mês de testes é de 21t e de desvio padrão de 1,8t. Corridas menores que 16t estão fora de 3 desvio padrão da média do processo, por isso estão sendo excluídas da análise.
- Corridas em que não foram utilizados os mesmos tipos e quantidades de sucata.
- Alto Power Off (tempo de forno desligado) operacional;
  - Inicialmente foi avaliado 30 para teste e 30 para base. Após análise da média de power off, foram excluídos alguns outliers e aquelas corridas com 3 desvio padrão acima da média foram excluídas.
- Corridas que não estavam no mesmo período de tempo (mesma semana);
  - O período para realizar o teste e coleta de dados durou 7 dias, para evitar maiores variações e transtornos.

A Tabela 1 abaixo descreve os principais dados utilizados no presente estudo. Após a implementação dos filtros, o número de corridas para realizar a análise comparativa caiu para 12 amostras para base e 17 para teste. A tabela 1 mostra um resumo de alguns dados avaliados.

Tabela 1 - Resumo dos dados utilizados entre base e teste

Método	Nº de corridas	Sucata utilizada no carregamento [kg]	Rendimento médio [%]
Média Mês	399	24,8	86,9
Base	12	24,7	87,5
Teste	17	24,0	88,6

Fonte: Próprio Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A próxima seção abordará os resultados coletados durante as corridas de teste usando o processamento de sucata proposto, visando filtrar as impurezas intrínsecas dos pacotes de sucata mista. Os resultados serão discutidos como: Resultados do processamento de sucata e resultados do processo EAF separadamente.

### 4.1 Resultados de Remoção de Impurezas da sucata

A Tabela 2 abaixo descreve os resultados após amostra de pacotes ser submetida ao processamento da Tesoura móvel.

Tabela 2 - Resultados do processamento de sucata após Tesoura Móvel

Passos	Unit	Peso	Variável
Pacotes antes do processamento	[kg]	5770	$W_P$
Pacotes após processamento	[kg]	5210	$W_{TM}$
Impurezas contidas nos pacotes	[kg]	560	$W_{TM}^I$
Média percentual de impurezas dos pacotes	[%]	9,71%	$Y_{TM}^I$

Fonte: Próprio Autor

Conforme mencionado na seção de metodologia, uma amostra de pacotes foi utilizada para calcular a fração de impureza devido a questões logísticas e econômicas. Após processamento de todos os pacotes de sucata que se destinavam a ser testados, toda a massa de sucata foi então submetida à prensa de cisalhamento para avaliação mais uma vez de sua impureza intrínseca. A massa total de sucata processada pela tesoura móvel foi de 78.020 kg, medida enquanto era transportada pelos caminhões até a prensa de tesoura.

A Tabela 3 representa os resultados após processar os 78.020kg de sucata da Tesoura Móvel na Prensa Tesoura

Tabela 3 - Resultados do processamento de sucata após Prensa Tesoura

Passos	Unidade	Peso	Variável
Sucata de Tesoura móvel antes de ser processada na Prensa Tesoura	[kg]	78020	$W_{TM}$
Peso da sucata após processamento na Prensa	[kg]	74026	$W_{PT}$
Quantidade de impurezas retiradas da sucata pela Prensa Tesoura	[kg]	3994	$W_{PT}^I$
Percentual de Impurezas	[%]	5,12%	$Y_{PT}^I$

Fonte: Próprio Autor

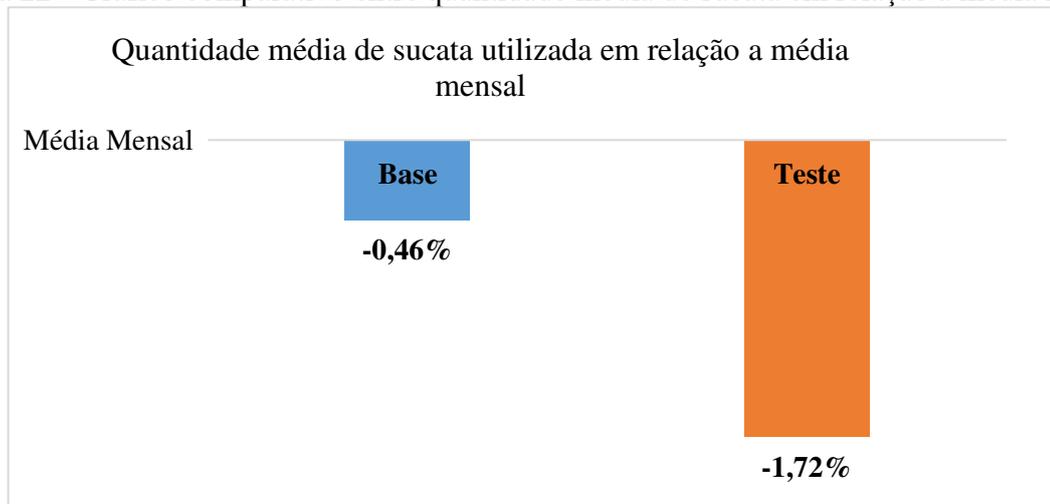
Como se pode observar na tabela anterior, um total de 3.994 kg de impurezas ainda estava intrinsecamente composto da sucata em feixe já processada, o que sustenta a evidência

dessa sucata ser altamente inadequada para ser utilizada sem um método prévio apropriado de agregação metálica.

#### 4.2 Resultados do processo do Forno Elétrico a Arco utilizando a sucata teste

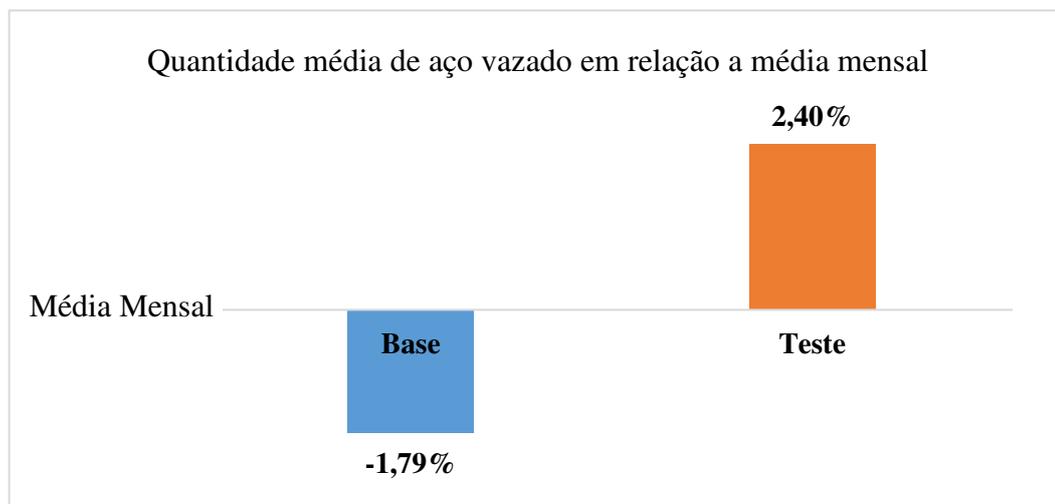
Com a sucata de teste produzida pela tesoura móvel e pela prensa de tesoura, iniciou-se a fase de utilização in loco como matéria-prima no FEA. As Figuras 22, 23, 24 e 25 abaixo ilustram os resultados usando duas categorias de corridas, aquelas que usam a sucata de teste e aquelas que usam o padrão, com suposições de filtro em relação à média mensal.

Figura 22 - Gráfico comparativo entre quantidade média de sucata em relação à média mensal



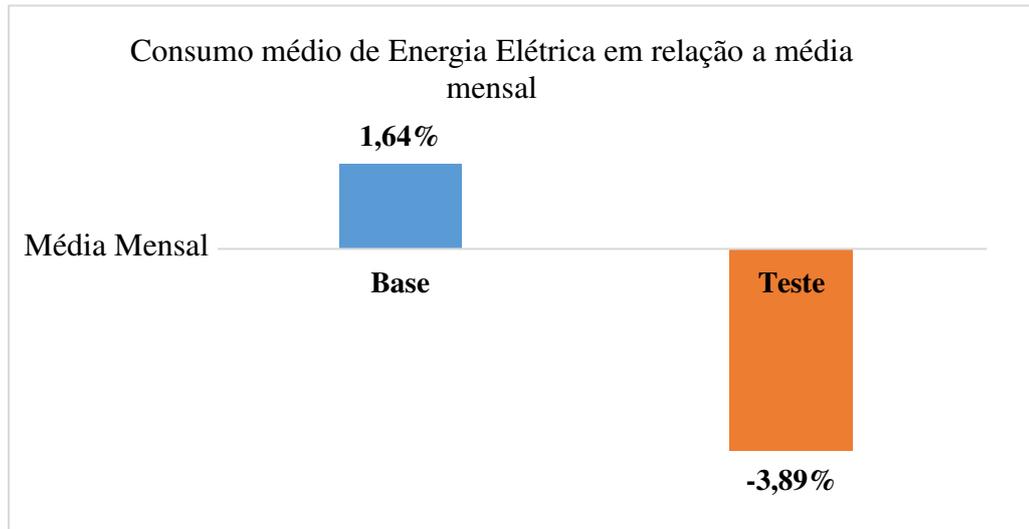
Fonte: Próprio Autor

Figura 23 - Gráfico comparativo entre quantidade média de aço vazado em relação à média mensal.



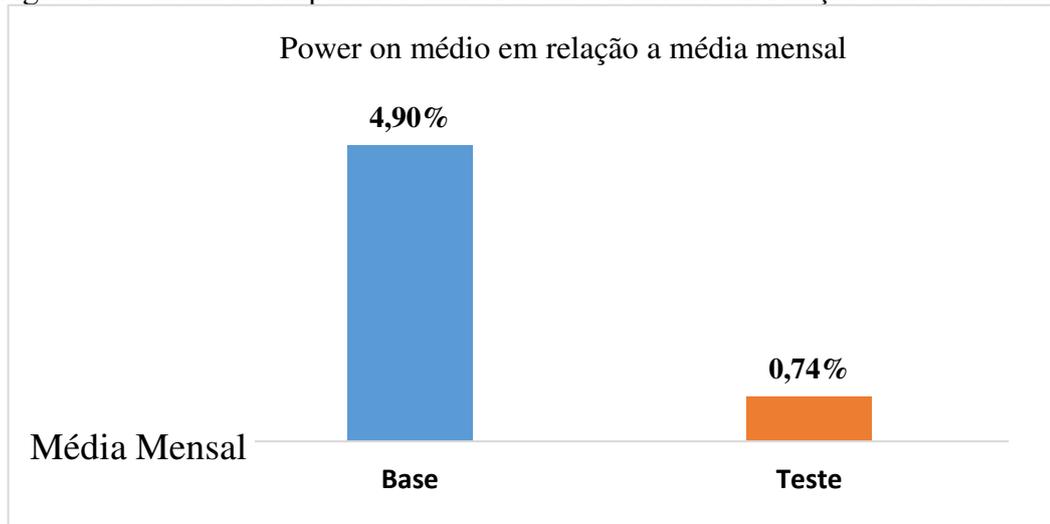
Fonte: Próprio Autor

Figura 24 - Gráfico comparativo entre quantidade média de aço vazado em relação à média mensal



Fonte: Próprio Autor

Figura 25 - Gráfico comparativo entre Power on médio em relação à média mensal



Fonte: Próprio Autor

Como pode ser visto na Figura 22 a quantidade de peso de sucata utilizado para carregar os cestões foi 1,72% menor utilizando a sucata submetida a combinação de processamentos em relação à média mensal, enquanto o meio tradicional teve uma redução de apenas 0,46%. Essa variável pode ser interpretada como parte da própria tolerância do processo de carregamento (1,72 % da média de peso carregado representa 0,43t, considerando a média mensal de operação de 24,8 t sendo utilizado em cada corrida). Porém, se observados os percentuais de impurezas que foram removidos pelo processamento, esse valor de 0,43 t, que em operação normal seria considerado como tolerância do processo, pode ser exatamente a quantidade de sujeira e material não metálico que normalmente é colocado na preparação do

cestão pela operação. Ademais, mais testes devem ser feitos, para extrair a verdade sobre este valor, considerado como valor de tolerância ou não.

Além disso, quando se observam os demais resultados do processo FEA, a tendência positiva levantada anteriormente é reforçada, pelo aumento de aço vazado, indicando aumento do rendimento metálico total, diminuição da energia elétrica específica consumida, indicando uma possível diminuição na fração mássica de fases com alto ponto de encontro na escória (Cristobalita, SiO<sub>2</sub>, por exemplo, que se deve principalmente à areia), e por último o Power On, que está ligado à justificativa de consumo de energia. A hipótese de ganho com a sucata de teste, embora ainda não possua o número adequado de amostras para ser considerada estatisticamente relevante, ainda é pertinente, pois 9,71% e 5,12% das impurezas foram filtradas pela Tesoura Móvel e Prensa Tesoura respectivamente.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo aplicar uma combinação de processamentos de sucata para um tipo específico, Pacote de sucata de obsolescência mista, para investigar a fração mássica de impurezas intrínsecas e propor uma solução, utilizando uma etapa adicional ao processamento original com a Tesoura Móvel. Os resultados da investigação mostraram que as hipóteses iniciais, de que de fato os pacotes de sucata mista possuem impurezas se forem mantidos a rota tradicional. Apenas com o processamento da Tesoura Móvel, foi confirmado uma retirada de resultado de 9,12% de impurezas além de uma retirada de mais 5,12% com o processamento adicional da Prensa Tesoura. Quanto ao uso da sucata teste, os resultados do processo FEA mostraram que há uma tendência positiva quando comparado com as corridas de base, sendo o peso de carga a principal variável a corroborar para tal conclusão. Dado o baixo número de amostras usadas para entregar os resultados do presente estudo, mais testes são necessários para investigar a relevância estatística do processamento de sucata adicional proposto. Além disso, o objetivo preliminar foi cumprido, que era a verificação de que os pacotes devem ser tratados com cuidado, do ponto de vista das impurezas intrínsecas, ou os indicadores do forno podem ser afetados negativamente. Alguns ajustes podem ser feitos no processamento da sucata proposta, como a substituição da sucata teste por outro tipo, e nos resultados do EAF, análise detalhada da escória (difração de raios X e fluorescência), para caracterizar qualitativa e quantitativamente, a fases produzidas com e sem a sucata de teste.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, P. C. **Análise do Rendimento Metálico do FEA Devido ao Uso do Sistema de Despoeiramento do Shredder**. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia: UFRGS, 2016.
- ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo, Arte & Ciência, 2009.
- BITTENCOURT, J. P. V. **Influência de Diferentes Vazões de Oxigênio e Tempos de Lança nos Parâmetros de Processo de um Forno Elétrico a Arco**. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia: UFRGS, 2015.
- BARKER, K. J. et al **The making, shaping and treating of steel: steelmaking and refining volume**. The AISE Steel Foundation: Pittsburgh, 1998.
- CHEVRAND, L. J. S. **Aciaria Elétrica - Situação Elétrica e Tendência 2025**. Rio de Janeiro: ABM, 2007.
- GUNN, P. **Shear Power: Learning how Scrap Shears Work is the Best First Step in the Shopping Process**. Revista Recycling Today, o. 284-90, Gunn Phillips Associates LLC, a Dade City, Fla. USA, 2005.
- JOHN, LA. **Melhoria no desempenho nos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. Dissertação de mestrado profissional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
- KOHMANN, T. M. **Modelos de eficiência metálica, carregamento e otimização de composição química para ligas ferrosas em fundições**. Dissertação de mestrado profissional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- MALFA, E. et al. **Cost and Energy Effective Management of EAF with Flexible Charge Material Mix**. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, v. 158, n. 1, p. 3–12, 2013.
- MATHUR, P., MESSINA, C. Praxair CoJet™ technology – **principles and actual results from recent installations**. AISE Steel Technology, Vol. 28, p. 21-25, 2001.
- MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à siderurgia**. 2ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- MOREIRA, M. F. **Apostila de siderurgia**. Rio de Janeiro, 2012.
- NASCIMENTO, C. C. **Modelamento do Rendimento Metálico em Fornos Elétricos a Arco**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Fluminense. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro, 2008.
- RAMOS, R. A. **Otimização do processo de fusão e refino primário através de análises estatísticas de parâmetros elétricos e de processos em forno elétrico a arco**. Dissertação de mestrado profissional, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

RECKZIEGEL, V. N. **Caracterização para Aproveitamento do Resíduos de um Triturador de Sucata em Usina Siderúrgica**. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGM3. Porto Alegre. 2012.

RIZZO, E. M. S. **Curso de Introdução aos Processos Siderúrgicos**. São Paulo: ABM, 2005.

SANDBERG, E. **Energy and scrap optimisation of electric arc furnaces by statistical analysis of process data**. [s.l.] Lulea University of Technology, 2005.

SANDBERG, E.; LENNOX, B.; UNDVALL, P. **Scrap management by statistical evaluation of EAF process data**. Control Engineering Practice, v. 15, n. 9, p. 1063–1075, 2007.

TORRES, R. G.; LULE, R. G.; LOPEZ, F. A.; CONEJO, A. N. **Analysis of Yield Losses in Steel Production in EAF of IMEXSA**. 14th IAS Steelmaking Conference, Argentina: 2003.

VIEIRA, D. (2017). **Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um FEA entre parâmetros de carregamento e injeções distintos**. WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel Statistical Yearbook. Brussels, 2015.