

**SIDNEY CARLOS BARBOSA JUNIOR**

**Estudo do efeito da utilização de sucata de baixo teor de ferro na produção  
de aço em fornos elétricos a Arco**

**Sidney Carlos Barbosa Junior**

**Estudo do efeito da utilização de sucata de baixo teor de ferro na produção de aço em fornos elétricos a Arco**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

B238e      Barbosa Junior, Sidney Carlos  
              Estudo do efeito da utilização de sucata de baixo teor de ferro na produção de aço em fornos elétricos a arco / Sidney Carlos Barbosa Junior – Guaratinguetá, 2019.  
              36 f. : il.  
              Bibliografia: f. 36

              Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.  
              Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

              1. Aço. 2. Sucata - reaproveitamento. 3. Siderurgia. 4. Escória. I.  
              Título.

CDU 669.14


Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

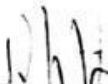
**Sidney Carlos Barbosa Junior**

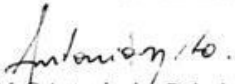
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM NOME DO CURSO"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

  
Prof. Dr. Miguel Ángel Ramirez Gil  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini  
Orientador/UNESP-FEG

  
Eng. MSc Antonio dos Reis de Faria Neto  
UNESP-FEG

  
Eng. MSc. Felipe Gianiselle  
CBA / VOTORANTIM

Novembro de 2019

Dedico este trabalho de modo especial, a  
minha família e a todos que acreditaram em  
mim.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof Dr. Peterson Luiz Ferrandini* que jamais deixou de me incentivar e de me motivar, além de estar presente na FEG sempre que necessitava de ajuda, até mesmo em feriados. Sem a sua orientação, auxílio e grande paciência, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Marilda e Sidney*, que apesar da distância e saudades, sempre incentivaram meus estudos e me deram muito força nesse período tão difícil e de tanto crescimento.

aos meus irmãos *Rafael e Laura* por sempre estarem presentes quando precisava de conselhos ou apenas desabafar

a minha namorada *Fernanda* que esteve ao meu lado esses últimos 4 anos, sendo a melhor companheira possível, me fazendo ter juízo, além de me apoiar em todas as horas, nas aprovações e reprovações e sendo essencial para a conclusão desse trabalho e da minha formação acadêmica.

aos meus irmãos de república *Mau Mau, Guilherme (Cagada), Yury (Margot), Guilherme (Bruna) Raphael (Bronha), Jonas (GB), Raphael (Idoso), Luiz (Prima), Igor (Trinca), Vinicius (Drama), Celso (Jeff), João (Tega), Matheus (Florinda), Victor (Gandhi)* e os bixos, com quem tive o prazer de conviver todos os dias, durante 6 anos, e pudemos festejar, curtir, beber e além de brigar muito, mas que me proporcionaram um crescimento que eu não poderia adquirir em nenhum outro lugar.

ao *Felipe Gianiselle (Nego)*, que hoje faz parte dessa banca, mas com quem também tive o prazer de morar junto durante um ano na república e se tornou um irmão.

A *Gerdau*, que me deu esse projeto tão incrível, que trouxe um conhecimento e desenvolvimento pessoal gigantesco.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

“Cuide bem da escória e o metal cuidará de si próprio”

Autor desconhecido

## RESUMO

O Aço é um símbolo de desenvolvimento da sociedade moderna. Assim para transformar o metal em algo útil para o dia-dia da sociedade existe a metalurgia, ou seja, é a ciência que está por trás de todas as transformações ligadas a metais. A China vem se destacando ultimamente pela produção de aço em relação aos outros países do mundo, devido a sua capacidade produtiva, investimentos pesados na área e preço de produção decisivamente mais baixo em relação aos seus concorrentes. As usinas semi-integradas chegam como uma promessa para a redução do custo da produção de aço, além de apresentarem forte apelo ecológico, já que utilizam sucata como matéria prima para a produção de aço. Como quase todos os processos industriais, a produção de aço também gera resíduos. Nas aciarias, os maiores volumes de resíduos são os particulados que vão para o sistema de coleta de pó e a escória gerada durante o processo de fusão. Essa escória além de conter óxidos, contém teores consideráveis de ferro metálico, assim esse material é levado para beneficiamento, para otimizar a quantidade de ferro contido e posteriormente ser usado como sucata novamente. Porém, grande quantidade de material era descartado, devido ao baixo teor de ferro contido. Assim, foi proposto um projeto para verificar a viabilização do uso desse material, e se viável, qual ganho financeiro ele traria. Os resultados mostraram que o uso desse material é viável tanto técnica como financeiramente, porém com restrições de quantidade, devido aos altos valores de elementos químicos, indesejados na produção de aço.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aciaria. Escória. Sucata. Aço. Siderurgia



## **ABSTRACT**

Steel is a symbol of modern society. Thus, to transform the metal into something useful for everyday society there is metallurgy to wit, is the science behind all metal-related transformations. China has been recently standing out for its steel production compared to other countries in the world due to its production capacity, with intense investments in the area and a decisively lower production price compared to its competitors. Semi-integrated mills come as a promise to reduce the cost of steel production in addition to represent strong ecological appeal as they use scrap as a raw material for steel production. The same as almost all industrial processes, steel production also generates waste. In the steelworks, the largest volumes of residues are the particulates that go to the dust collection system and the slag generated during the fusion process. This slag, besides containing oxides, contains considerable contents of metallic iron, so this material is taken for processing to optimize the amount of iron contained and later to be used as a scrap again. However, a large amount of material was discarded due to the low iron content. Thus, a project was proposed to verify the viability of using this material, and if viable, what financial gain it would bring. The results showed that the use of this material is viable both technically and financially, nevertheless with quantity restrictions, due to the high values of unwanted chemical elements in steel production.

**KEYWORDS:** Melt shop. Slag. Scrap. Steel. Siderurgy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de aço no mundo por país .....	13
Figura 2 – Capacidade produtiva de aço no Brasil.....	14
Figura 3 – Fluxo das usinas integradas e semi-integradas .....	16
Figura 4 – Sucata de cavaco .....	17
Figura 5 – Ferro gusa sólido .....	17
Figura 6 – Sucata gerada no processo de fabricação do aço .....	17
Figura 7 – Aço e escória na panela entrando no FP .....	18
Figura 8 – Escória sendo retirada do FEA antes do vazamento ( <i>slag off</i> ).....	19
Figura 9 – Retirada de escória da panela .....	20
Figura 10 – Virada de Panela.....	21
Figura 11 – Escória sendo levada para o beneficiamento .....	22
Figura 12 – Abastecimento da planta de beneficiamento .....	23
Figura 13 – Material graudo separado no início do processo .....	24
Figura 14 – Sucata recuperada de baixo teor de ferro .....	24
Figura 15 – Processo de boleamento .....	25
Figura 16 – Balança de metalização .....	27
Figura 17 – Planilha para determinação do teor de ferro no material.....	28
Figura 18 – Custo médio da tonelada de sucata .....	31
Figura 19 – Custo médio da receita energética do FEA .....	32
Figura 20 – Custo médio da tonelada de aço .....	32
Figura 21 – Utilização de SUCC por mês .....	33
Figura 22 – financeiro previsto com a utilização de SUCC .....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produtividade de usinas integradas e semi-integradas.....	15
Tabela 2 – Receita de sucata sem SUCC .....	29
Tabela 3 – Receita de sucata com SUCC .....	30
Tabela 4 – Receita energética de FEA sem SUCC .....	31
Tabela 5 – Receita energética do FEA com SUCC.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEA	Forno Elétrico a Arco
RoW	Rest of the World
FP	Forno Panela
SOS	Sistema Otimizador de Sucata
PPC	Pátio de Preparação de Carga
ESP	Estamparia Solta
FBA	Sobras de Sucata e Terra no PPC
GR60	Sucata Interna
FORCIL	Cilindro Forjado
GUS	Gusa Solido
PEP	Pacote de Estamparia
ARP	Arame de Pneu
CAV	Cavaco de Aço
FORJ	Peças Forjadas
SHR	Shredder
MST	Sucata Mista
OXI	Sucata Oxicortada Industrial
OXT	Sucata Oxicortada de Obsolescência
REC	Sucata Recuperada de Alto Teor de Ferro
SUGG	Sucata de Gusa
SUCC	Sucata Recuperada de Baixo Teor de Ferro

## LISTA DE SÍMBOLOS

t	Toneladas
cm	Centímetros
mm	Milímetros
Kg	Kilogramas
g	Gramas

## SUMÁRIO

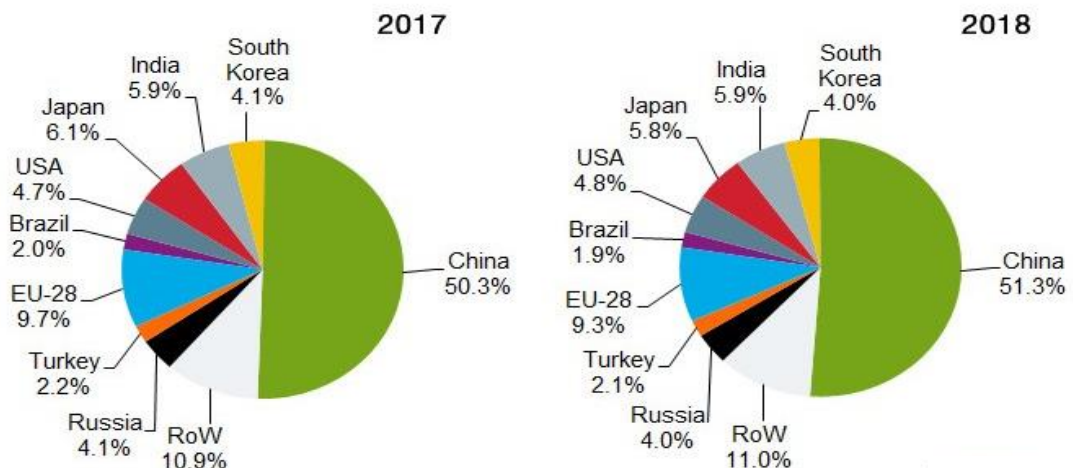
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	15
2.1	SUCATA .....	16
<b>3</b>	<b>ORIGENS DA ESCÓRIA</b> .....	18
3.1	PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO.....	22
<b>3.1.1</b>	<b>Planta de beneficiamento</b> .....	23
<b>3.1.2</b>	<b>Processo de boleamento</b> .....	25
<b>4</b>	<b>METALIZAÇÃO</b> .....	26
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	29
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	34
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	34

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de aço sempre foi um forte indicador do desenvolvimento econômico de um país, ela está ligada diretamente a construção civil, as industriais automobilísticas, estruturas de meio de comunicação, geração de energia e equipamentos industriais e domésticos. Assim, não conseguimos imaginar uma sociedade em crescimento ou já desenvolvida sem o uso do aço.

Esse material possui infinitas aplicações em razão das suas propriedades que não podem ser encontrados em nenhum outro material de custo semelhante, sendo assim o material metálico mais produzido e consumido no mundo. Pode-se citar o fato de que a produção mundial de aço bruto em 2018 foi de 1,8 bilhões de toneladas, sendo a China responsável por mais da metade dessa produção e a Ásia por 70%.

Figura 1- Produção de aço no mundo por país



Fonte: WORLDSTEEL (2019).

A indústria brasileira de aço produz em média 30 milhões de toneladas de aço bruto por ano, em 2018 chegamos a produzir 34,7 milhões de toneladas. Porém sua capacidade instalada é de cerca de 50 milhões de toneladas por ano, assim produzimos apenas cerca de 70% da nossa capacidade máxima.

Figura 2 – Capacidade produtiva de aço no Brasil



Fonte: INSTITUTOAÇOBRASIL (2019).

Com o protecionismo americano em relação ao aço importado, o mercado chinês se virou para outros países e um deles foi o Brasil. O mercado nacional de laminados foi um dos mais afetados. As importações, que antes eram de apenas 8% do consumo do mercado interno, hoje já representam 13%.

Mas por que um país que tem capacidade de produzir 15 milhões de toneladas de aço a mais do que já produz anualmente, importa aço? A resposta é simples, mesmo com as taxas de importação, o aço que vem de fora é cerca de 10% mais barato que o aço nacional.

Isso mostra mais do que nunca que o custo do aço é essencial para que sua produção seja viável. Pode-se otimizar a produção melhorando ao máximo o processo ou otimizando ao máximo a utilização da matéria prima. Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar um estudo da utilização de sucata na produção de aço, visando tornar um rejeito do processo em matéria prima, reduzindo o custo final do produto.



## 2 DESENVOLVIMENTO

A maior parte do aço é produzido nas grandes siderúrgicas, em alto-fornos, a partir de minério de ferro, também chamadas de usinas integradas. No entanto existem *mini Mills*, que produzem aço a partir de sucata e ferro gusa em fornos elétricos.

O surgimento e a rápida ascensão das mini-mills prepararam as bases para uma verdadeira revolução no ambiente siderúrgico. Seu crescimento tem afetado mais do que apenas os produtos e a tecnologia. Na verdade, tem alterado também a realidade da indústria siderúrgica, tornando-a menos intensiva em capital e mão-de-obra, diminuindo as barreiras de entrada ao negócio e viabilizando às empresas a atuação global e o atendimento flexível a nichos específicos de mercado. (ANDRADE, CUNHA E GANDRA, p.53, 200)

A produção de aço nas usinas semi integradas ou *mini mills* vem crescendo, devido ao seu novo modelo de operação e organização, reduzindo os custos. Um dos fatores vantajosos financeiramente nas usinas semi integradas é o investimento estrutural, as usinas integradas são muito mais complexas, contando com muito mais equipamentos e tecnologias.

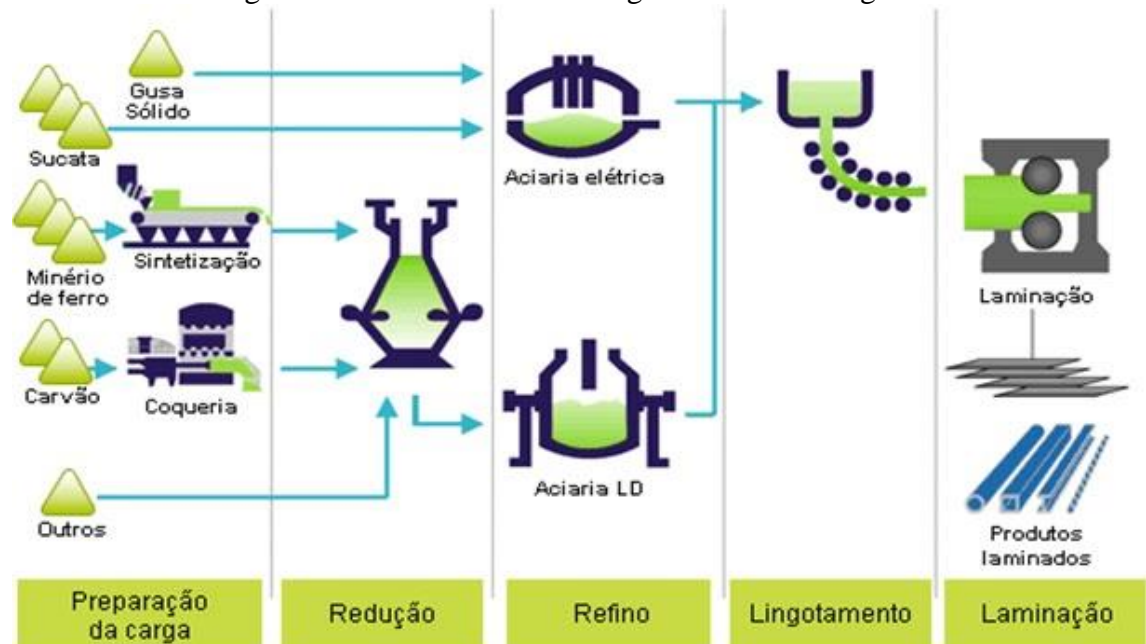
De acordo com Andrade, Cunha e Gandra (2000) “A produtividade de mão-de-obra garante poderosas vantagens em custo em relação aos competidores integrados.” (ANDRADE, CUNHA E GANDRA, p.57, 200), apresentada pelos mesmos, a imagem a seguir, mostra a eficiência conseguida pelas *mini-mills* no aproveitamento de sua força de trabalho, comparando 10 usinas siderúrgicas norte-americanas.

Tabela 1 – Produtividade de usinas integradas e semi-integradas

	COMPANHIA/UNIDADE	CAPACIDADE (Mil t)	NÚMERO DE FUNCIONÁRIOS	t INSTALADA/ EMPREGADO
<i>Mini-Mills</i>	Trico	2.200	285	7.720
	Ipsco	1.250	224	5.580
	North Star BHP	1.700	350	4.860
	Nucor Berkeley	1.800	400	4.500
	Nucor	1.800	490	3.670
	Crawfordsville	1.800	591	3.046
	Steel Dynamics			
Integradas	Geneva	2.550	2.700	940
	Gulf States	1.300	1.800	720
	Weirton	3.100	4.800	650
	Wheeling-Pittsburgh	2.400	4.000	600

Fonte: Andrade, Cunha e Gandra (2000).

Figura 3 – Fluxo das usinas integradas e semi-integradas



Fonte: Gerdau (2012).

Assim o modelo das semi-integradas vem simplificando e deixando mais barato a processo de produção de aço, além da parte logística, que pode ser construída perto dos grandes centros consumidores de aço que também são os maiores geradores de sucata de aço.

## 2.1 SUCATA

O principal custo do aço produzido numa *mini mill* vem da sucata, cerca de 70% e o responsável por recebê-la, separá-la e disponibiliza-la para o uso no forno elétrico é o Pátio de Sucata.

As sucatas de mercado, como estamparia, cavaco, trituradas (*shredder*), rebarbas, entre outras, tem um preço de mercado já pré-estabelecido e está aumentando cada vez mais, pela alta procura das aciarias. Assim o uso de sucatas alternativas é uma das vertentes para a diminuição do custo final do aço.

Figura 4 – Sucata de cavaco



Fonte: Gerdau (2019).

Figura 5 – Ferro gusa sólido



Fonte: Gerdau (2019).

Figura 6 – Sucata gerada no processo de fabricação do aço



Fonte: Gerdau (2019).

### 3 ORIGENS DA ESCÓRIA

Um item fundamental da produção do aço nas aciarias é a escória. Ela é responsável por proteger aço líquido da atmosfera, pela proteção do refratário do forno, do arco elétrico gerado pelos eletrodos, além de retirar elementos químicos indesejados do aço.

Figura 7 – Aço e escória na panela entrando no FP



Fonte: Gerdau (2019).

Na escoria proveniente do forno elétrico, temos a presença de ferro em duas formas, pela oxidação do Ferro no banho metálico (FeO) ou por partículas de ferro metálico.

Assim, temos a escória proveniente do *slag-off*, do “deslag”, do depósito (cascão) que muitas vezes se forma na borda da panela e a escória que fica depositada no fundo da panela sobre o resíduo de aço remanescente do lingotamento.

A escória proveniente do *slag-off* é uma escória rica em FeO, CaO, SiO<sub>2</sub>, ela é retirada do FEA no fim da corrida<sup>1</sup>, em pouco antes do vazamento. É necessária a retirada dessa escória antes do vazamento, pois como normalmente são utilizados fornos do tipo bica, pode-se ter a passagem de escória para a panela, e posteriormente uma reversão dos elementos da escória para o aço.

---

<sup>1</sup> Corrida – Expressão que se refere à preparação um tipo de aço, englobando desde a parte da confecção da sucata que será fundida, passando pela fusão e refino e terminando com o lingotamento.

Figura 8 – Escória sendo retirada do FEA antes do vazamento (*slag off*)



Fonte: Gerdau (2019).

A operação de *slag-off* não retira 100% da escória, e no momento do vazamento certa quantidade de escória passa do FEA para a panela, formando um filme de cerca de 3 a 5 cm de escória sobre o banho. Essa escória, como dito anteriormente, protege o aço da atmosfera rica em nitrogênio e oxigênio. Porém, quando quantidade excessiva de escória passa do FEA para a Panela, se faz necessário a retirada mecânica do excesso. Porém, essa operação causa perda considerável de aço, pois o equipamento não consegue retirar apenas escória da panela. A figura 9 mostra a operação de retirada do excesso de escória da panela



Figura 9 – Retirada de escória da panela



Fonte: Gerdau (2019).

Ao final do lingotamento, toda a escória que estava cobrindo o aço líquido fica no fundo da panela, juntamente com o restante de aço, que garante que não houve passagem de escória para o processo de lingotamento. A panela é então virada sobre uma baia, para a panela seja “limpa” e retorne ao processo e o resíduo do lingotamento (escória + aço) caia e seja levado para beneficiamento. Essa escória/aço retirada do fundo da panela tem uma composição diferente da escória do FEA, pois no forno panela (FP) ocorre a adição de elementos de liga no aço, e uma pequena parte desses elementos vai para a escória.

Figura 10 – Virada de Panela



Fonte: Gerdau (2019).

O cascão formado na borda da panela também é uma mistura de aço e escória. Este se forma devido ao aço que cai na borda da panela no momento do vazamento ou ao aço e/ou escória que se solidifica devido à perda de calor da panela durante o lingotamento.

Sempre que uma corrida de aço é finalizada, e a panela é cambada, verifica-se se houve a formação do cascão. Caso este tenha se formado procede-se à sua retirada por meio de um gancho acionado por uma ponte rolante.

Figura 11 – Cascão sendo levado para o boleamento



Fonte: Gerdau (2019).

### 3.1 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO

A escória proveniente dos processos da aciaria, é transportada para a empresa que faz o beneficiamento em potes (escoria do Slag-off do FEA e da panela), ou por caminhões que são carregados do material por uma pá carregadeira.

O material que na maioria das vezes está quente, é então virado em uma baia, para que ocorra o resfriamento. O resfriamento da escória é um processo muito importante no beneficiamento desse material, pois nesse momento que ocorre o choque térmico, e o ferro metálico que está na escória se desprende do material de natureza refratária, devido a diferença na dilatação térmica.

Com esse choque térmico, o material metálico é separado mais facilmente do restante, independente se ele for levado para a planta de beneficiamento ou para o boleamento.

Depois que a escória é resfriada ela pode seguir para duas diferentes rotas, boleamento ou planta de beneficiamento. A operação de boleamento é explicada a frente.

Um resfriamento deficiente, não auxilia na separação, causando dois tipos de problema. O primeiro é o material recuperada com uma grande presença de material não metálico, causando uma diminuição na porcentagem de metalização da sucata recuperada entregue.



Outro problema é a perda de material metálico junto ao agregado siderúrgico. Os rolos magnéticos da planta, não conseguem capturar os agregados com pequenas gotículas de ferro, assim o material é descartado junto ao agregado e fica estocado em aterros, até que o material seja vendido, ou usado com pavimentação de ruas e estradas

### 3.1.1 Planta de Beneficiamento

A planta de beneficiamento é responsável pelo beneficiamento da escória, ou seja, a separação da parte ferrosa e da parte não ferrosa.

O processo se inicia pela britagem da escória, que se rompe em particulados menores, para uma melhor seleção do material. Depois de britada, o material é levado para uma série de peneiras, onde é separado por diversas granulometrias

Pedaços do material particulado maiores que 800 mm que não passam por nenhuma peneira são separados já no início do processo, para posteriormente serem boleados. (será explicado mais para frente)

Figura 12 – Abastecimento da planta de beneficiamento



Fonte: Gerdau (2019).

Figura 13 – Material graúdo separado no início do processo



Fonte: Gerdau (2019).

Depois de peneirados os materiais passam por rolos magnéticos, para serem separados entre sucata recuperada e agregado siderúrgico.

Assim se origina as sucatas recuperadas com diferentes quantidades de ferro contido.

Figura 14 – Sucata recuperada de baixo teor de ferro



Fonte: Gerdau (2019).

### 3.1.2 Processo de boleamento

O material particulado com dimensões maiores que 800 mm, que não passa pela peneira, vai para outro processo de recuperação. Eles são boleados, ou seja, uma bola de aço é jogada de uma certa altura, por um guindaste para quebrar os pedaços maiores de escória/aço, para que assim o *body* se quebre em pedaços menores, e a escória presa nas peças se soltem do aço.

Depois com os pedaços já em dimensões reduzidas um eletroímã faz a separação do que é ferroso e não ferroso, dando origem a sucata recuperada, muitas vezes com peças com quase 100% de ferro.

Figura 15 – Processo de boleamento



Fonte: Gerdau (2019).

## 4 METALIZAÇÃO

Todo material proveniente de escória recuperada, passa por um processo de metalização. Esse processo segue o princípio de Arquimedes, de deslocamento de massa, que segundo Barbosa e Breitschaft (2005).

Em termos atuais, Arquimedes deveria realizar um teste não destrutivo. Segundo a estória, ele encontrou a solução para este problema em uma casa de banho, quando observou que quanto mais seu corpo entrava na água contida numa tina mais água vazava para fora dela. Percebendo que isto era o caminho para solucionar o caso em questão, conta a estória que ele pulou para fora da tina e, nu, correu de volta para casa gritando repetidamente para si mesmo, em grego, Eureka, eureka. (que significa encontrei, encontrei.). Com esta observação, Arquimedes teria descoberto como determinar o volume de qualquer objeto, mergulhando-o totalmente na água contida em um recipiente e medindo o volume de água deslocado por ele (BARBOSA e BREITSCHAFT, p. 116, 2005)

Assim, de todos os carregamentos, com massa de cerca de 15 a 20 ton de material, que são recebidos no pátio de sucata, retira-se uma amostra de cerca de 70 Kg para análise e determinação da quantidade de Ferro contida.

Depois que o material é separado ele é colocado em uma caixa, com um volume determinado, de  $0,06 \text{ m}^3$ . Essa caixa fica alocada em cima de uma balança, assim já é possível obter a massa exata desse material.

Com o material pesado, é colocado a água até completar todo o volume de 60 litros da caixa, e novamente o peso, sucata recuperada, mais água é obtido com exatidão. Com o volume total da caixa e agora a massa de material, a massa de água e o volume de água (considerando a densidade da água de  $1 \text{ g/cm}^3$ , conseguimos obter o volume total de material.

Figura 16 – Balança de metalização



Fonte: Gerdau (2019).

Figura 17 – Planilha para determinação do teor de ferro no material

Tara da caixa	0,350 Kg.
Peso da caixa e amostra	86,100 Kg.
Peso da caixa, amostra e água	125,850 Kg.
Volume da amostra e água	0,06 m <sup>3</sup>
Volume da água	0,040 m <sup>3</sup>
Peso da amostra	85,750 Kg.
Volume da amostra	0,020 m <sup>3</sup>
Peso da amostra, se considerada totalmente metálica	139,523 Kg.
Diferença entre o peso da amostra e o peso da amostra metálica	53,773 Kg.
Volume da escória	0,012 m <sup>3</sup>
Peso da escória	31,792 Kg.
Peso do metal	53,958 Kg.
Peso do ferro metálico	52,879 Kg.
Peso do ferro contido na escória	4,451 Kg.
Teor do total de ferro	66,86%

Fonte: Harsco Metals & Minerals (2018)

Assim no final temos a massa e o volume de material, conseqüentemente temos a densidade do material.

Já que o material é formado por escória e ferro, quanto maior a densidade do material, maior a quantidade de ferro contido. Note-se que este método é extremamente prático e aproximado, e permite uma estimativa grosseira da quantidade de ferro contida na sucata.

## 5 RESULTADOS

Com o auxílio de um software que simula vários parâmetros de um forno elétrico, o Sistema Otimizador de Sucata (SOS), foi possível chegar na quantidade ideal de sucata recuperada de baixo teor de Ferro, na carga que entrará para ser fundida no FEA.

Segundo o Software, 2% por carga é a quantidade ideal para se colocar no forno elétrico, assim se tem um ganho com o valor reduzido da sucata recuperada e não se afeta a qualidade do aço devido aos altos residuais de Fósforo e Silício, contidos no material.

O comparativo no custo da produção do aço usando a sucata de baixa metalização se divide em dois grupos. O primeiro é o custo da sucata usada na confecção da carga, ou seja, qual o preço médio gasto para se produzir 100 toneladas de aço líquido, usando sucatas e gusa.

O outro grupo são os gastos denominados energéticos, neles além do custo com energia elétrica, temos o custo com oxigênio, gás natural, coque e cal.

Assim, levando em consideração todos esses parâmetros, podemos fazer a comparação do custo real entre a utilização da sucata de baixa metalização e o custo sem sua utilização.

Tabela 2 – Receita de sucata sem SUCC

Sucata	t por corrida [t]	Preço da tonelada [R\$/t]	Preço Total (R\$)
ESP	9,23	1044,00	9636,12
FBA	3,44	100,00	344,00
GR60	25,24	861,00	21731,64
FORCIL	3,51	852,00	2990,52
GUS	18,93	1140,00	21580,20
PEP	0,90	1093,00	983,70
ARP	2,12	523,00	1108,76
CAV	15,31	733,00	11222,23
FORJ	10,28	989,00	10166,92
SHR	6,81	1312,00	8934,72
MST	0,66	954,00	629,64
OXI	0,25	1068,00	267,00
OXT	4,01	1100,00	4411,00
REC	2,10	745,00	1564,50
SUCG	1,64	916,00	1502,24
<b><i>SUB-TOTAL</i></b>	<b><i>104,43</i></b>		<b><i>97073,19</i></b>

Fonte: SOS (2018).

A tabela 2 apresenta a composição do custo de fabricação de aço carbono, utilizando vários tipos de sucata, as quantidades de cada tipo, os respectivos preços unitários por tonelada, assim como os preços totais.

Nessa corrida foram utilizadas cerca de 104,5 toneladas, para um volume teórico de 94,5 toneladas de aço líquido. Esse volume é dito como teórico pois o rendimento da sucata no forno elétrico sempre resulta em valores que variam entre 89% e 91%, mas é impossível determinar com precisão.

Tabela 3 – Receita de sucata com SUCC

Sucata	t por corrida [t]	Preço da tonelada [R\$/t]	Preço Total (R\$)
ESP	9,28	1044,00	9688,32
FBA	3,46	100,00	346,00
GR58	25,38	861,00	21852,18
FORCIL	3,53	852,00	3007,56
GUS	19,04	1140,00	21705,60
PEP	0,90	1093,00	983,70
ARP	2,13	523,00	1113,99
CAV	15,40	733,00	11288,20
FORJ	10,34	989,00	10226,26
SHR	6,85	1312,00	8987,20
MST	0,66	954,00	629,64
OXI	0,25	1068,00	267,00
OXT	2,59	1100,00	2818,00
REC	2,11	745,00	1571,95
SUCG	1,65	916,00	1511,40
SUCC	2,00	174,30	287,60
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>105,01</b>		<b>96084,60</b>

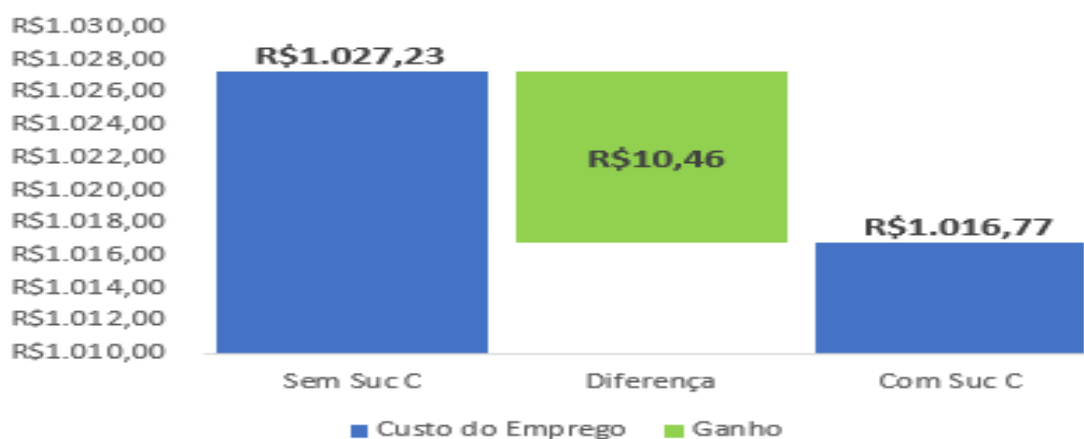
Fonte: SOS (2018).

Na tabela 3, temos a adição de 2 ton de SUCC e é retirada cerca de 1,5 ton de OXT, assim é utilizada uma quantidade maior de sucata para se obter um mesmo volume final de aço líquido. Isso é necessário devido ao menor teor de ferro contido na SUCC em relação a OXT.

Mesmo utilizando uma maior quantidade de sucata, o preço final da segunda corrida é menor, e é nesse ponto que aparece o ganho do projeto, o montante de sucata utilizada determina um custo final da corrida próximo de R\$ 1000,00 mais baixo com o uso da sucata de baixo teor de ferro.



Figura 18 – Custo médio da tonelada de sucata



Fonte: SOS (2018).

Na figura 19, temos a diferença do valor da tonelada de aço, produzida com e sem o uso de SUCC.

Tabela 4 – Receita energética do forno sem SUCC

Material	Unidade	Preço Unitário	Custo por tonelada [R\$/t]
Energia	kWh/t	0,17	72,48
Eletrodo	kg/t	54,00	149,64
Oxigênio	m3/ton	0,50	16,94
Gás Natural	m3/ton	1,50	9,17
Coque	kg/t	1,50	2,98
Calcítica	kg/t	0,39	9,60
Dolomítica	kg/t	0,39	4,23
<b>SUB-TOTAL</b>			<b>265,04</b>

Fonte: SOS (2018).

Tabela 5 - Receita energética do forno com SUCC

Material	Unidade	Preço Unitário	Custo por tonelada [R\$/t]
Energia	kWh/t	0,17	73,23
Eletrodo	kg/t	54,00	151,20
Oxigênio	m3/ton	0,50	17,13
Gás Natural	m3/ton	1,50	9,17
Coque	kg/t	1,50	2,95
Calcítica	kg/t	0,39	10,39
Dolomítica	kg/t	0,39	4,58
<b>SUB-TOTAL</b>			<b>268,65</b>

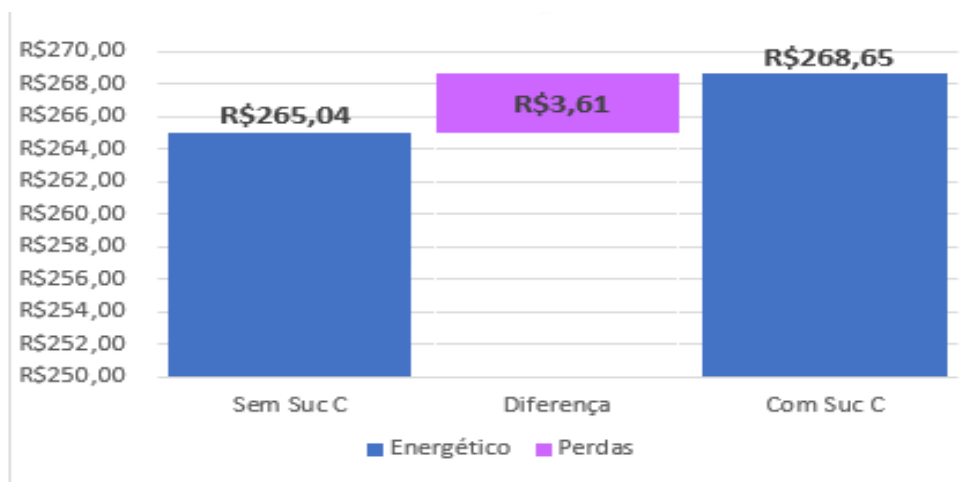
Fonte: SOS (2018).

Como na tabela 2 e 3, o FEA também segue uma receita energética, com uso de energia elétrica, oxigênio, coque, dentre outros.

Assim com uma maior quantidade de sucata no forno é necessário usar uma maior quantidade desses itens.

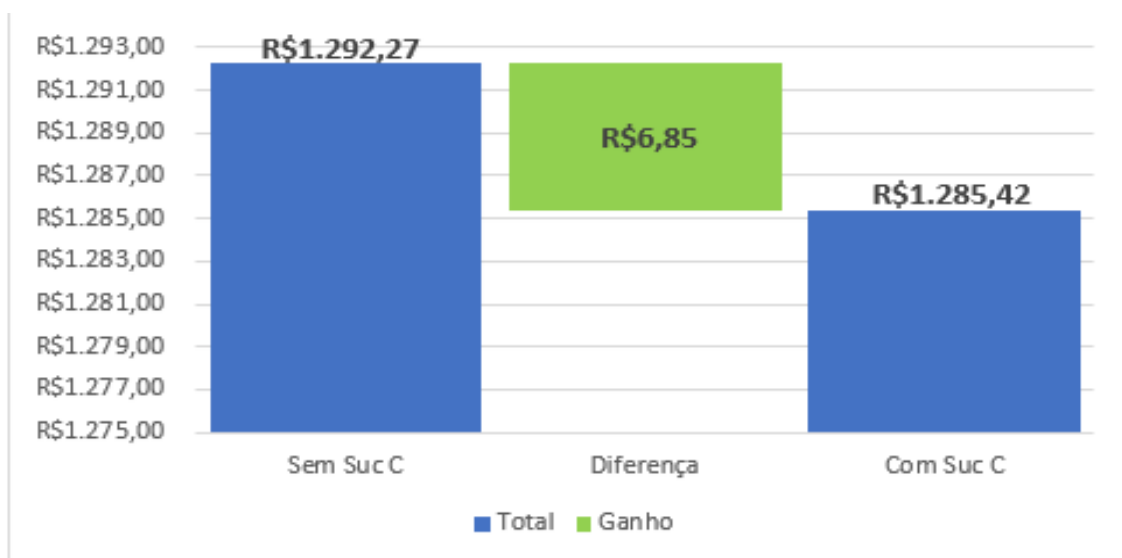
Para exemplificar esse aumento, podemos pegar a energia elétrica. Para fundir 104,43 toneladas de sucata é necessária uma quantidade menor de energia, do que para fundir 105,01 ton. Mesmo que no final do processo, tenhamos as mesmas 94,5 t de aço líquido.

Figura 19 – Custo médio da receita energética do FEA



Fonte: SOS (2018).

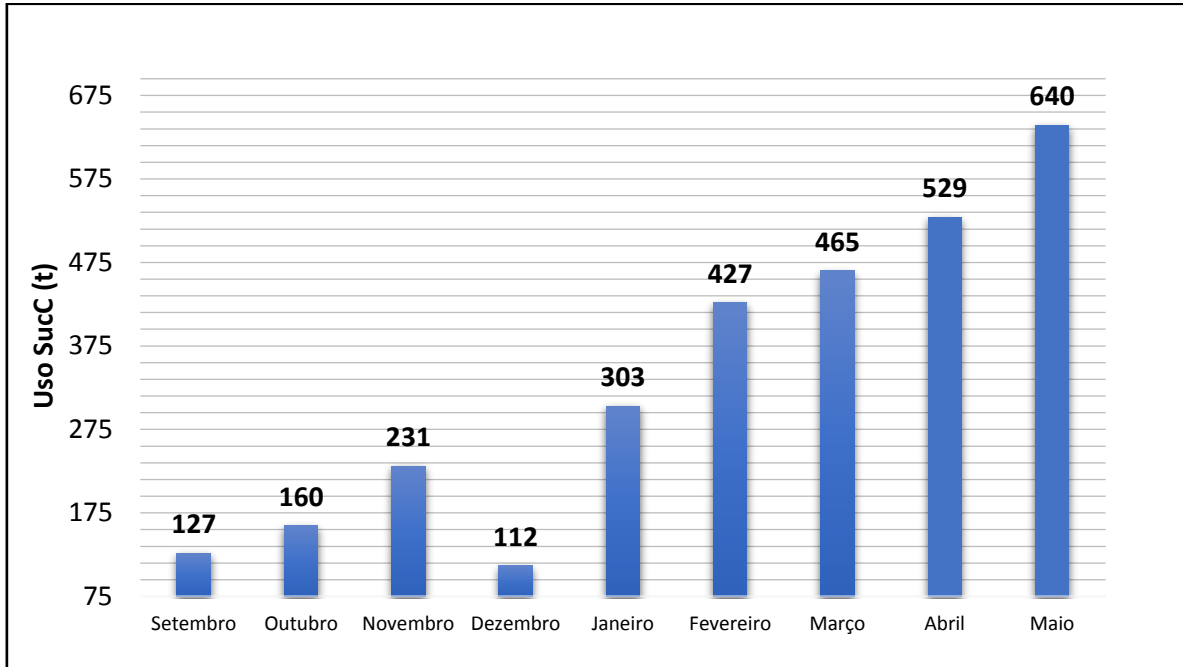
Figura 20- Custo médio da tonelada de aço



Fonte: SOS (2018).

Colocando o custo total da fusão do aço líquido (Sucata + Energéticos), temos um ganho de 6,85 reais por toneladas de aço produzido com a utilização de 2 toneladas de SUCC

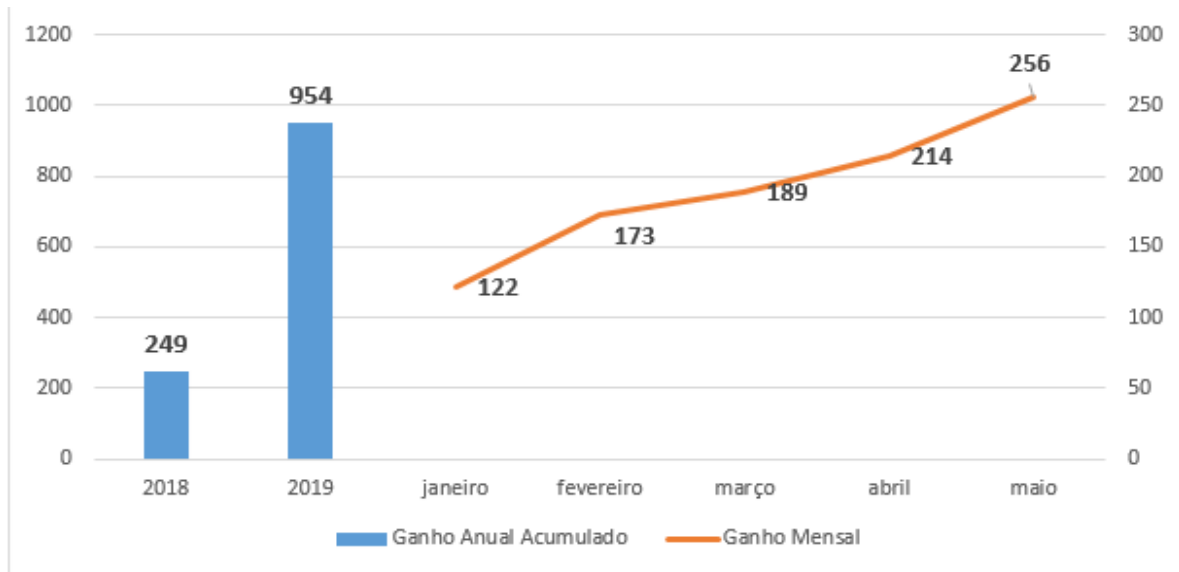
Figura 21 – Utilização de SUCC por mês



Fonte: Gerdau (2019).

Como pode ser observado na figura 21, o início dos testes de utilização da sucata SUCC se deu em setembro de 2018. Observa-se que a partir de então a utilização desse tipo de sucata tem aumentado continuamente. Este aumento observado se deve a vários fatores, que são a melhor qualidade da sucata recebida, o know how adquirido sobre a sua utilização e o consequente aproveitamento de todas as corridas realizadas utilizando o material.

Figura 22 – Ganho financeiro previsto com a utilização de SUCC (em mil R\$)



Fonte: Gerdau (2019).

A Figura 22 apresenta o ganho financeiro obtido com a crescente utilização da sucata SUCC. Note-se que a relação entre o volume de sucata utilizado e o correspondente ganho financeiro é linear.

## 6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que o uso da sucata recuperada de baixo teor de ferro, é viável em fornos elétricos a arco, porém com restrições de quantidade, devido aos altos teores de Fósforo e Silício contido no material, já que tais elementos são extremamente prejudiciais a qualidade do aço, em especial na produção de aços especiais produzidos na aciaria onde ocorreram os testes.

A necessidade do acompanhamento da qualidade da sucata recuperada recebida do beneficiamento também é essencial para bons resultados do processo, já que a porcentagem de ferro contido é extremamente importante para manter as bases de cálculo do rendimento metálico do FEA, e muitas vezes vários fatores podem influenciar na metalização do material, como resfriamento ineficiente da escoria, problemas mecânicos na planta de beneficiamento e excesso de terra junto ao material.

Os testes utilizando sucata recuperada de baixo teor de ferro, mostraram resultados satisfatórios, mas ainda existe espaço para maiores ganhos com esse material, como aumento da utilização em aços com maiores teores de Fósforo e Silício, além de variados momentos de adição do material no processo de fusão.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Maria Lúcia Amarante de; CUNHA, Luiz Maurício da Silva; GANDRA, Guilherme Tavares. A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 12, p. [51]-76, set. 2000. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3182/>. Acesso em: 09 set. 2019.

ASSOCIATION WORLD STEEL. **Crude steel production**. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/about-steel/>. Acesso em: 27 out. 2019.

BARBOSA, V. C.; BREITSCHAFT, A. M. S. Um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes. **Revista Brasileira de Ensino Física**, São Paulo, v. 28 n. 1, 2006. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010247442006000100014&script=sci\\_arttext/](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010247442006000100014&script=sci_arttext/). Acesso em: 02 set. 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo siderúrgico**. Disponível em <https://institutoacobrasil.net.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 20 out. 2019.