



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

EMERSON EDILSON BARROS DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DE SUCATA RECUPERADA A PARTIR DE ESCÓRIAS
SIDERÚRGICAS E SUA UTILIZAÇÃO EM UM FORNO ELÉTRICO A ARCO**

FORTALEZA

2017

EMERSON EDILSON BARROS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO DE SUCATA RECUPERADA A PARTIR DE ESCÓRIAS
SIDERÚRGICAS E SUA UTILIZAÇÃO EM UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

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

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug

Coorientador: MSc Tiago Seixas Bittencourt

Fortaleza

2017

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)

S237c Souza, Emerson Edilson Barros de.

Caracterização de Sucata Recuperada a partir de escórias siderúrgicas e sua utilização em um Forno Elétrico A Arco / Emerson Edilson Barros de Souza. – 2017.

72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson L. Klug.

Coorientação: Me. Tiago Seixas Bittencourt.

1. Sucata Recuperada. 2. FEA. 3. Passivo Ambiental.

CDD 669

EMERSON EDILSON BARROS DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO DE SUCATA RECUPERADA A PARTIR DE ESCÓRIAS
SIDERÚRGICAS E SUA UTILIZAÇÃO EM UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

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: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

MSc Tiago Seixas Bittencourt (Coorientador)
Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

MSc Miguel Bentes
Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP)

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Francisca e Francisco,
Aos meus irmãos, Everton e Eduardo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisca Ribeiro Barros de Souza e Francisco Ediuson Luciano de Souza, pelo amor, carinho, dedicação, educação, cuidado e sabedoria que me fazem percorrer os caminhos da vida.

A minha namorada, companheira e amiga, Ana Olívia Batista Viana, que sempre esteve comigo desde o início desta jornada, aconselhando-me, guiando-me, fortalecendo-me, para alcançar todos os meus objetivos, seja qual for o momento.

A todos os meus familiares, em especial minha tia, Maria Zilma Veras, que sempre me apoiou e aconselhou em todas as fases de minha vida.

Aos meus primos Leonardo Barros Veras, Rogério Ribeiro, Meire Zattoni e Evandro Ribeiro, que sempre estiveram comigo, mesmo que distantes, e com quem sempre pude contar para todas as horas.

Aos meus amigos de infância, juventude e fase adulta, com quem tive e tenho o prazer de uma amizade verdadeira, duradoura, com valiosos momentos insubstituíveis, em especial aos companheiros Auri Junior, Marques Mattos, Wesley Rodrigues, Petterson Girão.

Aos meus amigos e companheiros de universidade, com quem tive a honra de caminhar junto nesta jornada. Fillipe Moraes, José Raphael, Jeffeson Vieira, Cláudio Brasil, Darley Lima, Emanuel Seixas, Francisco Antônio, Francisco Diego, Héctor Picarte, Hédipo Pereira, Ivon Lourenço, Lincoln Guimarães, Lucas Uchôa, Marcelo Angelotto, Natan Lima, Raimundo Luís, Ruy Alves, Stefano Augusto, Thiago Freitas, Ed Massay, Petrônio Freitas, Delaney Gomes, Alessandro Gums, Ângelo Bezerra, Bruno Minelly, Davi Ribeiro, Caio Robson, Francisco Olimpio, Fabiano Lima, Sergio Junior, Raoni Alves, Gabriel Almeida, Geovani Gonçalves, Gustavo Saboia, Narain Brito, Guilherme Gadelha e Raphaella Hermont.

Aos meus professores de universidade Elineudo Moura, Marcelo José, Cleiton Carvalho, Igor Frota, Walney Silva, Ricardo Emílio, Francisco Marcondes, Hamilton Ferreira, Ênio Pontes e Marcelo Motta, que foram demasiado importantes para minha formação como engenheiro, não somente acadêmica como também na fibra moral e caráter necessários para exercer a profissão.

Ao professor Lindberg Gonçalves, encarregado maior pelo convênio CSN/UFC.

Aos servidores do departamento, Antônio Bandeira, Camila Moniz e Francisco Junior, 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 orientador de estágio, coorientador de TCC e amigo, Tiago Bittencourt, por apresentar-me e ensinar-me o papel de um engenheiro em uma sociedade. Pela paciência, incentivo, conselhos e orientação durante todo o período de estágio, sempre à disposição. E pelo companheirismo, amizade e camaradagem a todo momento.

A Companhia Siderúrgica Nacional onde pude estagiar na GGNP, especialmente a GNT, onde pude conhecer não só profissionais excelentes, mas pessoas ótimas com quem tive a oportunidade e o prazer de conviver, e que levarei para o resto de minha vida.

Ao Gerente Geral Aços Longos, Fernando Candido, por fornecer a visão de um profissional cativante, líder e agente transformador.

Ao Gerente da área Técnica da Aços Longos, Yuri Nardelli, que acreditou em minhas habilidades e garantiu o início e a conclusão de meu estágio.

Aos profissionais da CSN que contribuíram fortemente para a realização deste trabalho. Alex Fonseca, Márcio Augusto, Rodrigo Braga, Marcela Delespostis, Silvana Menezes, Esdras Melo, Jouseberson Miguel, Ademir Junior, Elvis Granado, Patrícia Rodrigues, Ricardo Nardur, Walter Santiago, Júlio Cesar, Gabriele Molica, Wilton Santiago, Fabrício Reis, Aline Miranda, Heloisa Machado, Pítias Eduardo, Thiago Nicolau, Gustavo Pereira, Zenizar Corrêa, Amarildo Silva, Leone Mattos, Raquel Santos, Thiago Martins e Sidiney Nascimento.

Aos meus amigos Paulo Fonseca e Rafael Moraes com quem tive a oportunidade de trabalhar, aprender e conviver, sempre sugerindo ideias e conselhos para o trabalho, construindo um forte laço de amizade e momentos imprescindíveis.

Aos meus amigos e companheiros de estágio, que me ajudaram e com quem pude partilhar maravilhosos momentos e experiências. Flávia Meira, Úrsula Cid, Lucas Rezende, Samuel Costa, Hugo Portugal e Fabiano Ferraz.

A minha família de amigos enquanto estagiário da CSN, com quem tive a oportunidade de conviver sob o mesmo teto e ter momentos únicos e insubstituíveis. Walisson Gomes, Jamil Nobre, Pablo Leão, Alexandre Jatai, Diego Dias e Marcos Paulo.

A minha segunda família de Volta Redonda que me acolheu de braços abertos como um filho. Jose Bezerra, Maria Bezerra, Patrícia Rios e Ricardo Rios.

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

RESUMO

Como subproduto da siderurgia, a escória tem uma ampla gama de aplicações, como na construção civil, construção de estradas, como pedras de armadura para construções de engenharia hidráulica ou fertilizantes para fins agrícolas. No entanto, considerando o alto teor de ferro que a escória de refino primário possui, este material pode tornar-se um recurso de lucro interessante. Neste trabalho, foram caracterizadas três sucatas (sucatas recuperadas A, B e C) oriundas do processamento mineral de perdas metálicas do processo de aciaria e o uso de uma das sucatas (sucata recuperada A) foi avaliada como matéria prima em um Forno Elétrico a Arco. As sucatas recuperadas foram caracterizadas usando técnicas laboratoriais para a avaliação de suas composições elementares, fases presentes e rendimentos metálicos. Uma das sucatas recuperadas foi adicionada gradualmente como carga inicial no FEA e alguns de seus principais pontos de desempenho (*Key Performance Points – KPI's*) analisados. Como um de seus resultados, notou-se uma redução de custos significativa, dado que ao final do trabalho, cerca de 25% da carga fria do FEA foi substituída pela sucata recuperada, que tem custo quase zero. O projeto refletiu também no passivo ambiental da empresa, haja vista que uma vasta área de armazenamento de resíduos foi reduzida, e como consequência, reduziu-se a probabilidade de ocorrência de poluição da água dos lençóis freáticos, contaminação do solo, arrasto do vento e dissipação por água da chuva.

Palavras-chave: Sucata Recuperada. FEA. Passivo Ambiental.

ABSTRACT

As a by-product from the steelmaking, the steelmaking slag has a wide application range, like in civil construction, road construction, as armor stones for hydraulic engineering constructions or fertilizers for agricultural purposes. However, given the fact that the steelmaking slag has a high iron content, its recovery potential from the slag can become an interesting profit resource. In this paper, three metallic scraps originated from mineral processing were characterized and its operational results as a raw material for an Electric Arc Furnace analyzed. The materials were characterized as their compositions, metallic yields and molecular phases. One of the scraps was gradually added as raw material in the EAF and its operational results per heat were analyzed. The financial result was a significant cost reduction, given the fact that at the end of the experiments, about twenty-five percent of the metallic charge at the EAF was substituted for the recovered scrap with approximately zero cost. For the environmental side, storage waste area, water pollution, soil contamination, wind drag and dissipation in rainwater were reduced.

Keywords: Recovered Scrap. EAF. Environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de aço de segunda categoria	22
Figura 2 – Exemplos de sucatas de ferro-gusa e sucatas de ferro fundido	23
Figura 3 – Exemplos de matérias primas metálicas pré reduzidas	23
Figura 4 – Exemplos de perdas metálicas intrínsecas dos processos em uma aciaria.....	24
Figura 5 – Planta de beneficiamento de resíduos siderúrgicos.....	24
Figura 6 – Forno Elétrico a Arco de corrente alternada	25
Figura 7 – Carcaça Inferior.....	25
Figura 8 – Carcaça Superior	26
Figura 9 – Abobada	26
Figura 10 – Queimadores em operação	27
Figura 11 – Manipulador de Lança de Carbono/Oxigênio	27
Figura 12 – Localização do Canal EBT e detalhe	28
Figura 13 – Sistema de basculamento do FEA.....	28
Figura 14 – Conjunto de movimentação dos eletrodos	29
Figura 15 – Aplicações da escória de aciaria.....	33
Figura 16 – Esquema do processamento da escória de aciaria.....	34
Figura 17 – Processo de espumação da escória em um FEA	36
Figura 18 – Vazamento do FEA para a panela refratária	37
Figura 19 – Pilha das sucatas recuperadas ao fim de processamento.....	39
Figura 20 – Vagões de sucata e eletroímã.....	40
Figura 21 – Coleta e armazenamento	40
Figura 22 – Etapa de quarteamento no centro de pesquisas da CSN	41
Figura 23 – Amostras em baldes e postas para secar em estufa	41
Figura 24 – Etapas da obtenção das amostras pulverizadas de sucata recuperada.....	42
Figura 25 – Componentes do MEV	45
Figura 26 – Esquema de obtenção do sinal em um EDS.....	46
Figura 27 – Sucata recuperada analisada no MEV	46
Figura 28 – Esquema geral do Forno Tammann.....	47
Figura 29 – Procedimento de fusão das sucatas recuperadas	47
Figura 30 – Procedimento de fusão, material fundido vazado e resfriado	48
Figura 31 – Metálico e escória produzidas no ensaio de fusão	55
Figura 32 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada A	56

Figura 33 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada B	56
Figura 34 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada C	56
Figura 35 – Micrografia de fragmentos de escória.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico do uso de sucata recuperada A ao longo de um ano no FEA	59
Gráfico 2 – Consumo de energia elétrica durante o uso de sucata recuperada A.....	60
Gráfico 3 – Consumo de oxigênio durante o uso de sucata recuperada A	61
Gráfico 4 – Consumo de cal dolomítica durante o uso de sucata recuperada A.....	61
Gráfico 5 – Consumo de cal calcítica durante o uso de sucata recuperada A	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de escória em diferentes regiões	30
Tabela 2 – Composição química de escórias de refino primário do aço (% peso)	31
Tabela 3 – Propriedades das escórias de aciaria em comparação com agregados naturais	32
Tabela 4 – Resultado do beneficiamento das perdas metálicas	39
Tabela 5 – Resultado da análise via espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente e via úmida.....	53
Tabela 6 – Resultado da EDS em MEV	54
Tabela 7 – Resultado do ensaio de fusão	54
Tabela 8 – Fases encontradas usando DRX nas escórias produzidas no ensaio de fusão	56
Tabela 9 – Composição das escórias geradas	57
Tabela 10 – Composição química da fração metálica	58
Tabela 11 – Programa do uso de sucata recuperada A.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Gerais	19
2.2	Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Aciaria Elétrica.....	21
3.1.1	<i>Matérias-primas e insumos</i>	21
3.1.2	<i>Carga metálica</i>	22
3.1.3	<i>Forno Elétrico a Arco Tipo Corrente Alternada</i>	25
3.2	Sucatas Recuperadas de Escória	30
3.2.1	<i>Algumas características das escórias de aciaria</i>	30
3.2.2	<i>Propriedades técnicas das escórias de aciaria</i>	32
3.2.3	<i>Aplicações das escórias de aciaria</i>	32
3.2.4	<i>Recuperação de metais a partir de escórias</i>	33
3.3	Processo de elaboração do aço em um FEA	34
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	39
4.1	Coleta e preparação das amostras de sucata recuperada	39
4.2	Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente	42
4.3	Microanálise elementar em microscópio eletrônico de varredura	43
4.4	Ensaio de Fusão	46
4.5	Difração de raios-X da fração escória.....	48
4.6	Fluorescência de raios-X da fração escória.....	49
4.7	Espectrometria de emissão ótica da fração metálica.....	50
4.8	Análise do uso da sucata recuperada A no FEA	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	Resultados das análises das sucatas recuperadas como recebidas	53

5.2	Resultado das análises dos produtos do ensaio de fusão	55
5.3	Acompanhamento dos indicadores com o uso da sucata recuperada A no FEA ..	59
6	CONCLUSÃO	63
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A escória de aciaria é um produto sólido proveniente da produção de aço [2]. Não mais considerado um subproduto, mas um coproduto por conta de suas diversas aplicações, a escória de aciaria é nos dias atuais, se processada de forma adequada, uma ótima oportunidade de economia na indústria e fonte de matéria-prima para a infraestrutura do país por conta de sua alta produtividade e ampla gama de aplicações.

Segundo Shen [1], várias escórias são produzidas como coprodutos em processos metalúrgicos ou como resíduos de processos de incineração e podem ser classificadas como escórias ferrosas, escórias não-ferrosas, e escórias de incineração, onde cada uma destas apresenta determinadas características segundo sua origem, quantidade de metais recicláveis e como matérias-primas em processos fora da siderurgia [1]. Ainda no quesito de classificação, Huang e Wang em 2012 as classificaram como escórias de aços carbono, escórias de aços inoxidáveis ou escórias sintéticas. Os autores também as classificaram de acordo com o processo siderúrgico de origem, como escórias de conversor a oxigênio, escórias de aciaria elétrica, escórias de refino secundário e resíduos de fundo de distribuidores no lingotamento contínuo [2].

As pesquisas de utilização das escórias vêm de longa data. Geiseler já relatou que em 1880, a escória de alto-forno já era utilizada como fertilizante [3]. Como característica intrínseca do material, a escória de Alto Forno, não possui um alto teor de ferro, o que a torna um produto muito usado em aplicações fora da siderurgia, como na produção de cimentos, construção de estradas, manutenção do solo, dentre outras. Portanto, por conter um alto percentual de ferro, a escória de aciaria normalmente é submetida a processos de recuperação antes de ser utilizada fora da siderurgia. Tais processos resultam em matérias-primas chave para outras áreas chave na siderurgia, como concentrado de ferro para a sinterização e sucata para a aciaria.

Autores relataram que o uso de escórias recicladas como fonte de ferro não só adicionava valor ao processo no âmbito econômico como também pelo fato de as mesmas possuírem quantidades significativas de Mn^0 , CaO e MgO. Estes óxidos podem retornar a cadeia produtiva como elementos de liga, fundentes e proteção aos refratários do forno [4, 5].

Dolgorukov [6] relatou que o uso de sucata oriunda do processamento de escórias siderúrgicas é efetivo com relação ao custo benefício. Em 1988, plantas na Ucrânia usaram 487 mil toneladas de sucata recuperada de escórias siderúrgicas. Dado o preço médio de 10 rublos/t

para a sucata recuperada (0,16 US\$/t), houve uma economia aproximada de 3,9 milhões de rublos (61 mil US\$) [6].

Ren Q. e autores [7] relataram que na China, em 2012, para uma produção de 626,7 milhões de toneladas de aço, com 90 milhões de toneladas de escória de aciaria, apenas 22% do subproduto é utilizada, muito diferente em países como EUA, Japão, Alemanha e França, que alcançam reutilizações próximas a 100%, espalhadas nas mais diversas aplicações, como na construção de estradas, até como parte integrante na cadeia siderúrgica [7].

Contudo, a disposição deste agregado ainda resulta em problemas ambientais. O método convencional é o despejo em grandes porções de terra. Com isso, não somente uma grande área que poderia servir para o plantio é ocupada, mas fontes de recursos naturais podem ser potencialmente impactadas devido a contaminação de águas subterrâneas, do solo, arraste pelo vento, dentre outras formas [8].

Como podemos observar, as escórias estão presentes em toda a cadeia de uma aciaria, com amplo potencial de aplicação, sendo um produto com caráter tão importante como o produto principal na aciaria, o aço líquido.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

1. Desenvolver uma metodologia para caracterização de sucatas recuperadas;
2. Avaliar a adição de sucata recuperada A em um Forno Elétrico a Arco.

2.2 Específicos

1. Caracterizar 3 sucatas recuperadas a usando as técnicas de espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente, análise via úmida, microanálise elementar em MEV, ensaio de fusão, difração de raio-X, fluorescência de raio-X e espectrometria de emissão ótica;
2. Analisar alguns dos principais KPI's de um Forno Elétrico a Arco quando foi adicionada uma das sucatas recuperadas, gradativamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aciaria Elétrica

Conhecida como uma das grandes revoluções das últimas décadas e presente em quase todas as grandes indústrias de transformação de metais líquidos a alta temperatura, os fornos que utilizam eletricidade como principal fonte de energia já tem amplo espaço no mercado.

Diversos são os fornos que utilizam energia elétrica, exemplo são os fornos de resistência elétrica e fornos de indução, este segundo mais utilizado que o primeiro. Mas, sem dúvida, os Fornos Elétricos a Arco (FEA) lideram em utilização para fins de produção de aço em aciarias elétricas.

Devido a sua versatilidade, o FEA pode se adaptar, com as devidas modificações, aos mais diversos cenários de carregamento, planejamento de produção (tempo de fusão e produto final), mantendo alta eficiência energética. Além disso, podem produzir praticamente qualquer tipo de aço, devido a sua fusão ser controlada, sem depender inteiramente de reações químicas, essas que auxiliam no processo. No quesito de carregamento, podem trabalhar com carga 100% sólida ou até mesmo serem adaptados para usarem ferro gusa líquido [9].

3.1.1 *Matérias-primas e insumos*

As matérias-primas fundamentais para as operações rotineiras em uma aciaria elétrica podem ser divididas em:

- Carga metálica;
- Gases industriais;
- Fundentes;
- Ferro-ligas;
- Desoxidantes;
- Adições Complementares.

Devido ao foco do presente trabalho, somente as características das cargas metálicas em um FEA serão cobertas.

3.1.2 Carga metálica

As cargas metálicas utilizadas para transformação dos metais sólidos (ou líquidos) em aço em um FEA podem ser basicamente divididas em [10]:

- Sucata de aço;
- Sucata de ferro gusa;
- Ferro–gusa líquido;
- Sucata de ferro fundido;
- Materiais pré reduzidos (ferro esponja DRI, briquete HBI);
- Briquete de resíduos siderúrgicos.

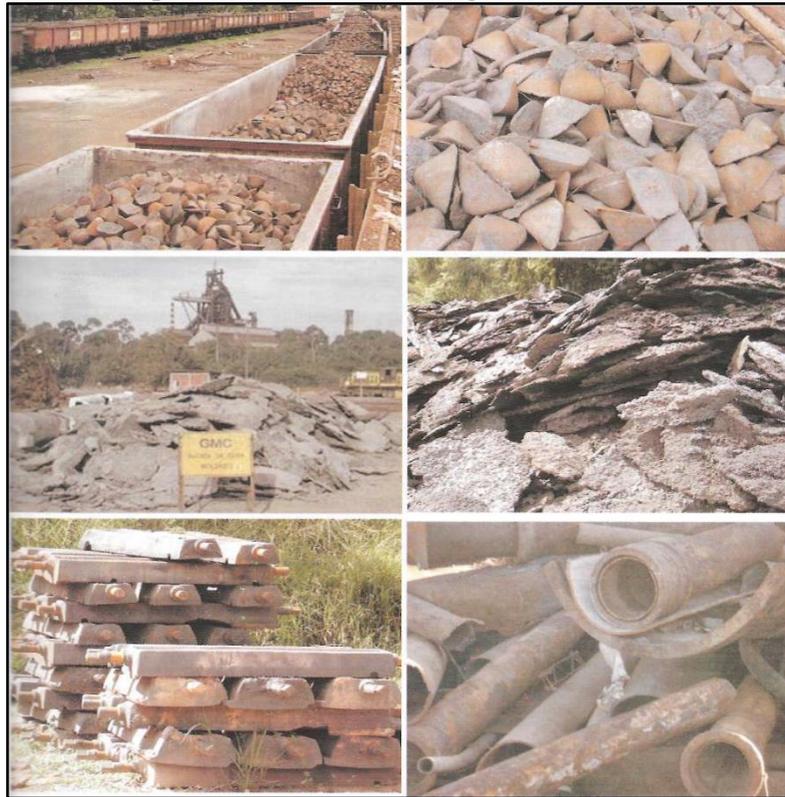
As Figuras 1, 2 e 3 a seguir ilustram alguns exemplos de sucatas utilizadas.

Figura 1 – Exemplos de aço de segunda categoria



Fonte: [11].

Figura 2 – Exemplos de sucatas de ferro-gusa e sucatas de ferro fundido



Fonte: [11].

Figura 3 – Exemplos de matérias primas metálicas pré reduzidas



Fonte: [11]

(a) ferro esponja DRI^(a) e (b) ferro esponja HBI^(b).

^(a) DRI: direct reduct iron

^(b) HBI: hot briquetted iron, ferro esponja briquetado a quente

Ainda há as sucatas recuperadas a partir de perdas metálicas intrínsecas de processos em aciaria. Tais perdas metálicas podem ser oriundas de cascão de fornos, fundo de distribuidores e bordas de painéis de transporte de aço líquido. Com isso, também temos as perdas metálicas em decorrência da escória gerada durante o processo de refino primário do aço. Normalmente a escória, junto às demais perdas metálicas, são dispostas longe das aciarias, basculadas e estocadas em plantas de beneficiamento gerenciadas por empresas especializadas em tratamento de resíduos siderúrgicos. Esta sucata será o foco do presente trabalho. A Figura 4 ilustra tais perdas metálicas em uma aciaria.

Figura 4 – Exemplos de perdas metálicas intrínsecas dos processos em uma aciaria



Fonte: [11].

Com as perdas metálicas, a empresa de beneficiamento realiza operações de britagem, peneiramento e separação da parte metálica através de meios magnéticos para a obtenção de uma sucata com a maior porcentagem metálica possível e para a retirada de impurezas, que podem interferir na composição química final do aço [11]. A Figura 5 ilustra uma unidade de beneficiamento de resíduos.

Figura 5 – Planta de beneficiamento de resíduos siderúrgicos

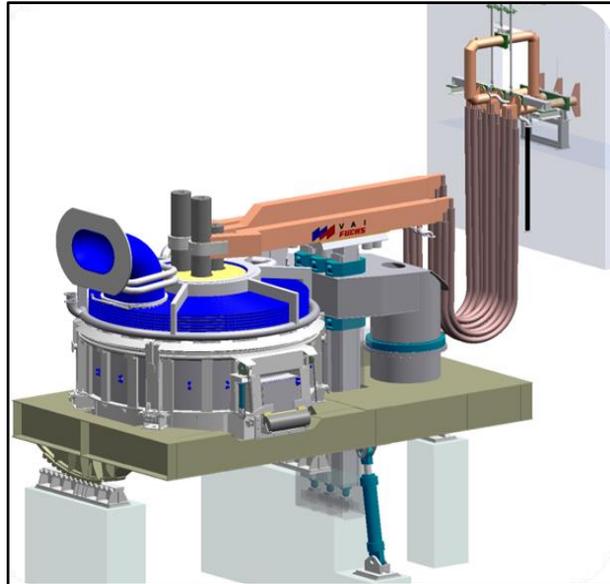


Fonte: [12].

3.1.3 Forno Elétrico a Arco Tipo Corrente Alternada

Este é o tipo de FEA utilizado nas aciarias elétricas brasileiras. Neste tipo específico de FEA (ilustrado na Figura 6), a corrente elétrica passa de um eletrodo através do arco elétrico para a carga e da carga sobe através do arco para o outro eletrodo. A polaridade destes dois pontos quentes se inverte a cada semi-ciclo da corrente segundo a frequência da rede. Os eletrodos estão instalados através da abóbada do forno [10]. Na maioria dos fornos deste tipo, são usados 3 eletrodos de grafite.

Figura 6 – Forno Elétrico a Arco de corrente alternada

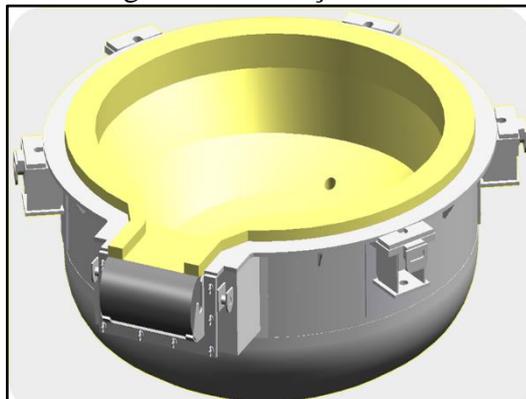


Fonte: [12].

Podemos descrever os principais componentes de um FEA como sendo:

- Carcaça Inferior: conforme Figura 7 a seguir, tem o objetivo de conter o aço líquido durante as etapas de fusão e refino primário. Esta carcaça é revestida com tijolos e massas refratárias para suportar as temperaturas elevadas [12].

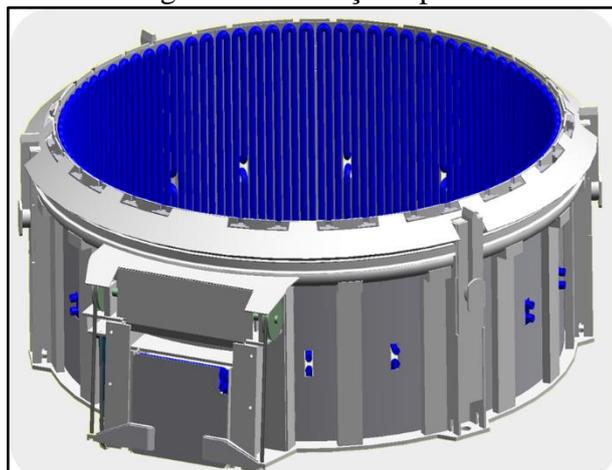
Figura 7 – Carcaça Inferior



Fonte: [12].

- Carcaça Superior: ilustrada na Figura 8, o conjunto carcaça superior é constituído de uma estrutura tubular reforçada contendo painéis tubulares em aço carbono, refrigerados a água. Pelo uso de tais painéis refrigerados, houve um aumento considerável no volume útil do FEA, haja vista a retirada da proteção refratária lateral, não sendo mais necessária, pois, além dos painéis refrigerados, há ainda a formação da escória espumante, que estabiliza o arco e protege o interior do forno da radiação [12].

Figura 8 – Carcaça Superior



Fonte: [12].

- Abóbada: constituída por painéis tubulares interligados com vazão de água que mantêm a refrigeração e preservam o equipamento. É responsável por evitar a projeção de material para fora do FEA pela parte superior durante o processo de fusão e refino e age como isolante afim de manter a temperatura elevada dentro do forno. A Figura 9 a seguir ilustra um perfil de abobada.

Figura 9 – Abobada

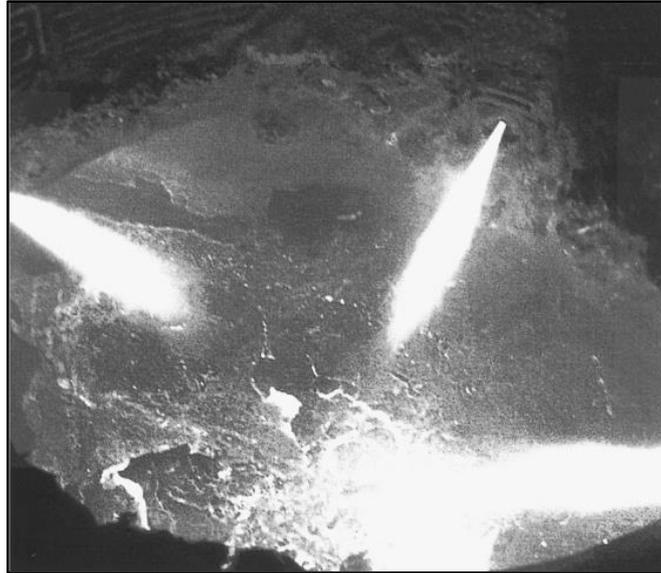


Fonte: [12].

- Queimadores: instalados ao redor da carcaça do FEA (Figura 10) nos pontos em que a radiação provida pelo arco elétrico é ineficiente, geralmente entre os eletrodos, chamados pontos frios. São responsáveis pela fusão da sucata no começo de corrida para alcançar uma

uniformidade do banho metálico (*flat bath*). Podem também ter a função de injetores de carbono para auxiliar na formação da escória espumante. São uma alternativa interessante, pois reduzem os custos com energia elétrica e consumo dos eletrodos [12].

Figura 10 – Queimadores em operação



Fonte [13].

- Manipulador de Lança de Oxigênio/Carbono: o robô manipulador é um sistema mecânico de fácil controle que dispensa a operação manual e perigosa de injeção de oxigênio e carbono pela porta do FEA. Um manipulador pode ser observado na Figura 11. É constituído de tubos metálicos refrigerados a água com tubos de entrada de oxigênio, carbono e gás de arraste. É responsável pela maior quantidade de oxigênio e carbono injetados no FEA durante a fase de refino primário e manutenção da escória espumante [12].

Figura 11 – Manipulador de Lança de Carbono/Oxigênio

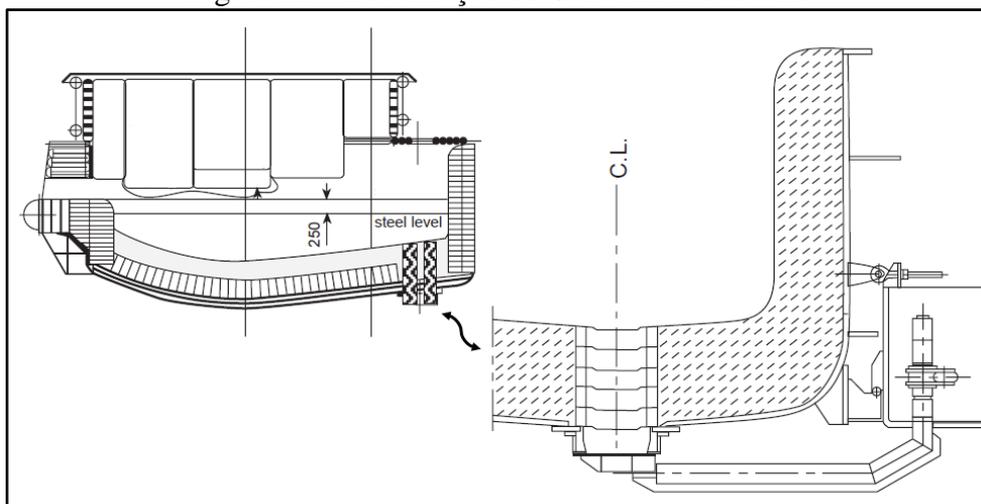


Fonte: [12].

- Canal de Vazamento do Aço EBT: o canal EBT (*Eccentric bottom tapping*) é por onde efetua-se o vazamento do aço líquido ao final de uma corrida. Um desenho esquemático

pode ser observado na Figura 12. É composto por um conjunto mecânico de abertura e fechamento e um canal refratário composto por uma massa refratária que se desgasta e aumenta de diâmetro conforme o vazamento das corridas. O canal EBT influencia no tempo de vazamento de corrida e na passagem ou não de escória para a panela de aço, sendo esta passagem bastante minimizada, haja vista a densidade da escória ser menor que a do aço líquido, este tende a permanecer abaixo da escória, facilitando o seu escoamento pelo fundo, evitando a passagem da escória de refino primário, facilitando o refino secundário [12].

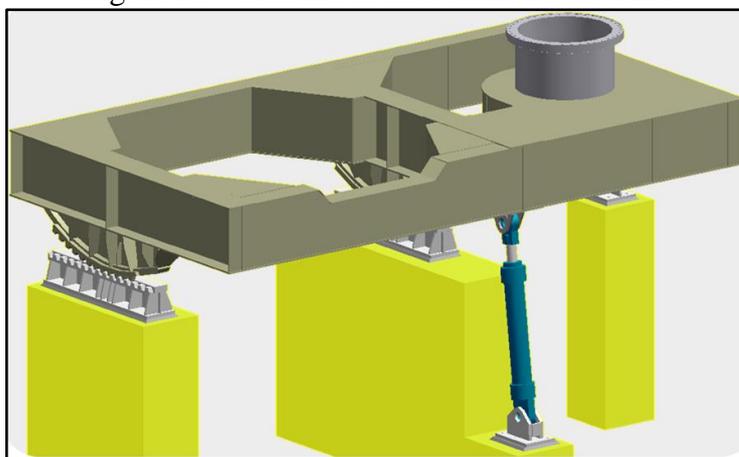
Figura 12 – Localização do Canal EBT e detalhe



Fonte: [13].

- Sistema de Basculamento do FEA: responsável pela sustentação, basculamento/inclinação nos sentidos horário e anti-horário para vazamento do aço e retirada de escória, e estabilização de todo o conjunto FEA. É constituído basicamente pela plataforma, cilindros hidráulicos e trilhos, em esquema ilustrado na Figura 13 [12].

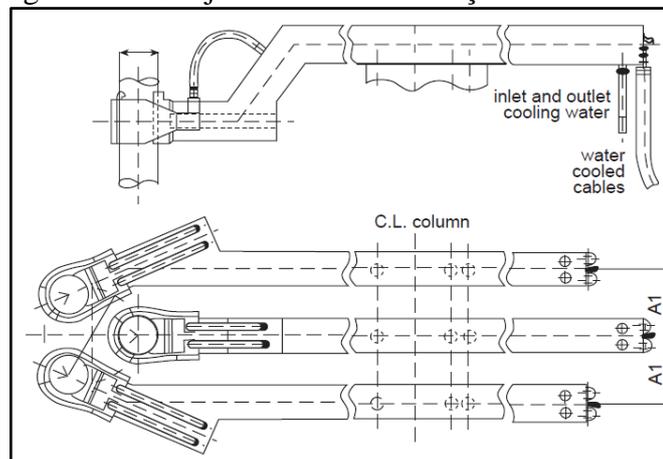
Figura 13 – Sistema de basculamento do FEA



Fonte: [12].

- Conjunto eletrodos/braços: equipamento responsável por permitir a movimentação dos eletrodos do FEA (ilustrado na Figura 14 a seguir). Para um FEA trifásico, 3 colunas e 3 braços condutores de cobre ligados a cabos condutores refrigerados são usados. Para a fixação dos eletrodos, são usadas garras em aço refrigeradas que agem também na regulagem dos gomos conforme consumo durante processo. Os eletrodos são feitos de grafita pura para permitir a passagem de corrente com elevada resistência à temperatura. Representam um elevado custo na aciaria, por isso muitas vezes são alvo de grandes estudos e melhorias para a redução de seu consumo. Uma das formas mais simples e eficazes de se combater o elevado consumo dos eletrodos é através da instalação de bicos nas garras fixadoras. Estes direcionam água para os eletrodos e reduzem as perdas por sublimação [12].

Figura 14 – Conjunto de movimentação dos eletrodos



Fonte: [13].

- Transformador do FEA: o transformador tem a finalidade de baixar o nível de tensão do primário de acordo com a relação de transformação no secundário, que definem a razão de transformação primário/secundário. Os transformadores são dimensionados para resistir a vários segundos de sobre corrente, para garantir a eficiência do forno [12].

3.2 Sucatas Recuperadas de Escória

As escórias de aciaria são produzidas basicamente pelos processos de Conversores à Oxigênio (*Basic Oxygen Furnance – BOF*) e em Fornos Elétricos a Arco (*Electric Arc Furnace – EAF*). A Tabela 1 a seguir apresenta a quantidade de escória produzida em determinadas regiões.

Tabela 1 – Produção de escória em diferentes regiões

Região	Quantidade de escória (BOF+EAF) (em milhões de toneladas)	Referência
Europa	12	Motz and Geiseler (2001)
EUA	8	Proctor et al. (2000)
China	14,07	Huang and Wang (2001)
Japão	12,6	Okumura (1993)

Fonte: [1].

3.2.1 Algumas características das escórias de aciaria

É bem sabido que as escórias representam um estudo relativamente recente se comparadas com outras áreas em siderurgia. Por exemplo, até o começo da década de 1930, essencialmente nada sabia-se acerca das propriedades termodinâmicas das escórias. Isso era advindo da complexa natureza iônica das escórias que impedia a representação das constantes de equilíbrio das reações metal-escória pelos modelos clássicos das leis de ação das massas [17]. Tal problema foi de certa forma solucionado pela aplicação de uma abordagem empírica de representação da composição das escórias como uma mistura estequiométrica de vários compostos (silicatos, fosfatos, dentre outros óxidos livres) [17]. Um outro fator que influencia significativamente neste quesito é que cada aciaria detém sua escória característica, influenciada por diversos fatores, como pela disponibilidade e composição das matérias-primas (sucatas, fundentes, refratários, ferro ligas, etc.), práticas operacionais (uso de escórias sintéticas, padrão de confecção dos carregamentos, padrões operacionais, etc.) e muitos outros. Neste sentido, temos que o estudo das escórias é quase sempre acompanhado de novas abordagens e descobertas que com o avanço das técnicas de caracterização, tem se tornado um importante ramo de pesquisas no mundo.

A Tabela 2 expõe diferentes composições de escórias de aciaria para diferentes processos de refino primário (conversor e FEA) com determinadas práticas operacionais para determinadas regiões.

Tabela 2 – Composição química de escórias de refino primário do aço (% peso)

Região	Escória	Fe _{total}	CaO	MnO	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	S
Europa	BOF ^a	14-20	45-55	<5	<3	12-18	<2	<3	-
	BOF ^b	15-20	42-50	<5	5-8	12-15	<2	<3	-
	FEA ^a	18-28	30-40	<6	4-8	12-17	<1,5	4-7	-
	FEA ^b	20-29	25-35	<6	8-15	10-15	<1,5	4-7	-
Japão	BOF	17,5	44,3	5,3	6,4	13,8	-	1,5	0,07
	FEA	15,2	38	6,0	6	19	-	7,0	0,38
China	BOF	17-27	34-48	1,5-6	2,5-10	9-15	0,9	0,9-2,8	0,2
EUA	BOF	15-30	40-50	5-10	5-10	10-15	1-3	2	-

Fonte: [1], adaptado.

^a Escória com baixa porcentagem de MgO.

^b Escória com alta porcentagem de MgO.

Como pode ser observado, os principais óxidos das escórias são CaO, Fe (FeO e Fe₂O₃), SiO₂, MgO e MnO. O Fe nas escórias de refino primário normalmente é encontrado na forma de aço (7-10%) e na forma de óxidos que por sua vez, pode ser separado da escória por meio de processamento mineral e usado como matéria-prima diretamente nos processos de sinterização, alto forno e aciaria. Alguns pesquisadores ainda ressaltam que devido a sua elevada composição em óxidos, após processada, a escória de refino primário também pode agir como fonte adicional de fundentes (Cales calcítica e dolomítica) devido às suas concentrações de CaO e MgO, bem como minério de manganês devido ao MnO. Tais práticas acabam por reduzir significativamente os custos de produção. Mas deve-se atentar-se que algumas escórias também possuem porcentagens de S e P₂O₅ elevadas, que podem afetar negativamente os processos [1].

As principais fases mineralógicas das escórias de refino primário são o ferro metálico, disilicato de cálcio (2CaO.SiO₂) ferrita dicálcica (2CaO.Fe₂O₃) e wustita (FeO) [14]. Contudo, a composição mineralógica assim como características morfológicas da escória são variáveis dependentes da composição química, método de resfriamento, dentre outras. Por exemplo, escórias com resfriamento mais rápido (a água) produzem fases com grãos menores do que aquelas com resfriamento lento (ao ar) [15]. Em basicidades superiores a 2,5, sendo basicidade a razão entre os óxidos básicos e óxidos ácidos, trissilicato de cálcio e cal tornam-se predominantes na escória [7]. Outros minerais encontrados nas escórias incluem a periclase (MgO), mangasita (MnO), monticelita com Fe e Mn (CaMgSiO₄), cordierita com Mn (Mg₂Al₄Si₅O₁₈), quartzo (SiO₂) e óxidos em solução sólida [4].

3.2.2 Propriedades técnicas das escórias de aciaria

Na Tabela 3 abaixo apresenta algumas propriedades das escórias de aciaria comparadas a dois agregados naturais.

Tabela 3 – Propriedades das escórias de aciaria em comparação com agregados naturais

Propriedade	Unidade	BOF	FEA	Basalto	Granito
Densidade	g/cm ³	3,1-3,7	3,2-3,8	2,8-3,1	2,6-2,8
Resistência a abrasão	% peso	9-18	8-15	-	15-20
Absorção de água	% peso	0,2-1,0	0,2-10	<0,5	0,3-1,2
Resistência ao congelamento	% peso	<1	<1	<1	0,8-2
Resistência a compressão	N/mm ²	>100	>100	>250	>120

Fonte: [1], adaptado.

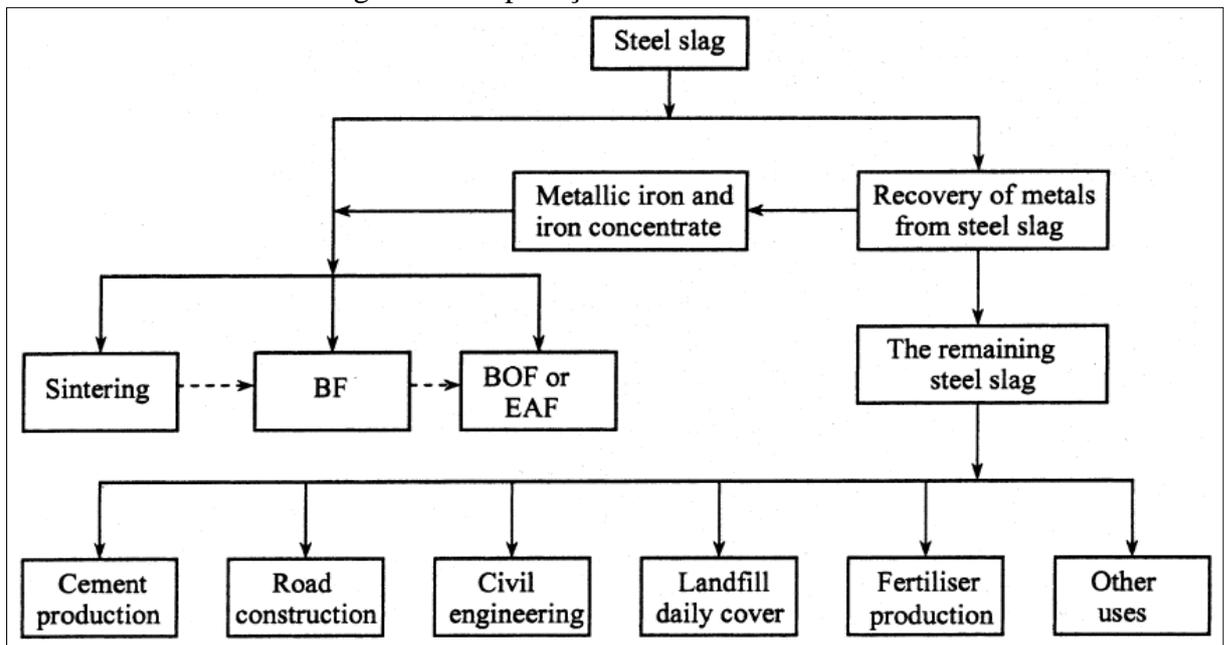
Observando a Tabela 3, pode-se observar que a densidade das escórias é maior que as do basalto e granito (devido ao seu teor de ferro), tem uma resistência a compressão considerável, próxima a do granito e possuem resistência a abrasão próxima ao limite inferior do granito. [1, 3].

Podemos citar também que as escórias possuem minerais reativos ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, CaO e MgO) que são endurecíveis com água [7]. Também, devida a essa reatividade, a cal livre e óxido de magnésio se hidratam conferindo uma não estabilização do volume das escórias [3, 7].

3.2.3 Aplicações das escórias de aciaria

A Figura 15 a seguir apresenta algumas aplicações das escórias de aciaria.

Figura 15 – Aplicações da escória de aciaria



Fonte: [3, 5, 7].

Da Figura 15 podemos observar que antes das aplicações diretas em outras áreas que não sejam voltadas para a siderurgia, há uma recuperação de metais a partir da escória e somente a parte remanescente é aplicada nas demais áreas.

Da Tabela 2, como visto anteriormente, 30-50% da escória contém CaO e 3-10% de MgO que pode ser usada como matéria prima para os processos de sinterização, alto-forno, e aciaria como substitutos cales calcítica e dolomítica. Nota-se também o percentual de MnO que pode ser reaproveitado como matéria-prima, como já exposto. Contudo, deve-se ter precaução com o seu uso devido as quantidades de S, P e SiO₂ em aplicações na aciaria [1].

Com a escória submetida a reciclagem para recuperação de metálicos (50-90% do total da massa de escória), a fração não metálica separada desta operação pode ser usada em diversas outras áreas, como ilustra a Figura 15.

3.2.4 Recuperação de metais a partir de escórias

Para a liberação do Fe nas escórias de aciaria que produzem aços ao carbono, são usados métodos que incluem cominuição por britagem, classificação granulométrica (peneiramento industrial), separação magnética e algumas vezes remoção do fosforo. A utilização de tais métodos irá depender de como ocorreu o resfriamento da escória, sua composição química e aplicação [4, 7, 15].

Normalmente, os equipamentos utilizados para a cominuição da escória são britadores. São usados britadores tipo mandíbula para uma separação primária, seguidos de

- Preparação = 10 minutos
- Total = 60 minutos.

O carregamento é o primeiro passo no ciclo de fabricação do aço (*tap-to-tap cycle*). Primeiramente, os eletrodos e abobada do forno são elevados. Após, é feita a abertura do forno, onde os eletrodos e abobada rotacionam para fora do forno, permitindo que o cestão de sucata seja posicionado pela ponte rolante acima do FEA. O cestão é aberto, e a sucata cai no forno pela ação da gravidade. Após, a ponte remove o cestão enquanto os operadores posicionam novamente os eletrodos e a abobada. Com os eletrodos elevados, a abobada é abaixada e depois os eletrodos são descidos. É importante frisar que o tempo onde o FEA está fora de operação, o chamado *power-off* do forno, deve ser minimizado, haja vista que a principal função do FEA é a fusão da carga, portanto, este tempo que o forno está desligado é controlado e representa um importante indicador de performance da aciaria (*Key Performance Indicator - KPI*). Processos usuais de operação usam 2 carregamentos por corrida. Um dos avanços para a redução do *power-off* em carregamentos foi a eliminação do cestão pelo sistema de CONSTEEL que utiliza esteiras que realizam a alimentação de matéria prima no forno continuamente [13].

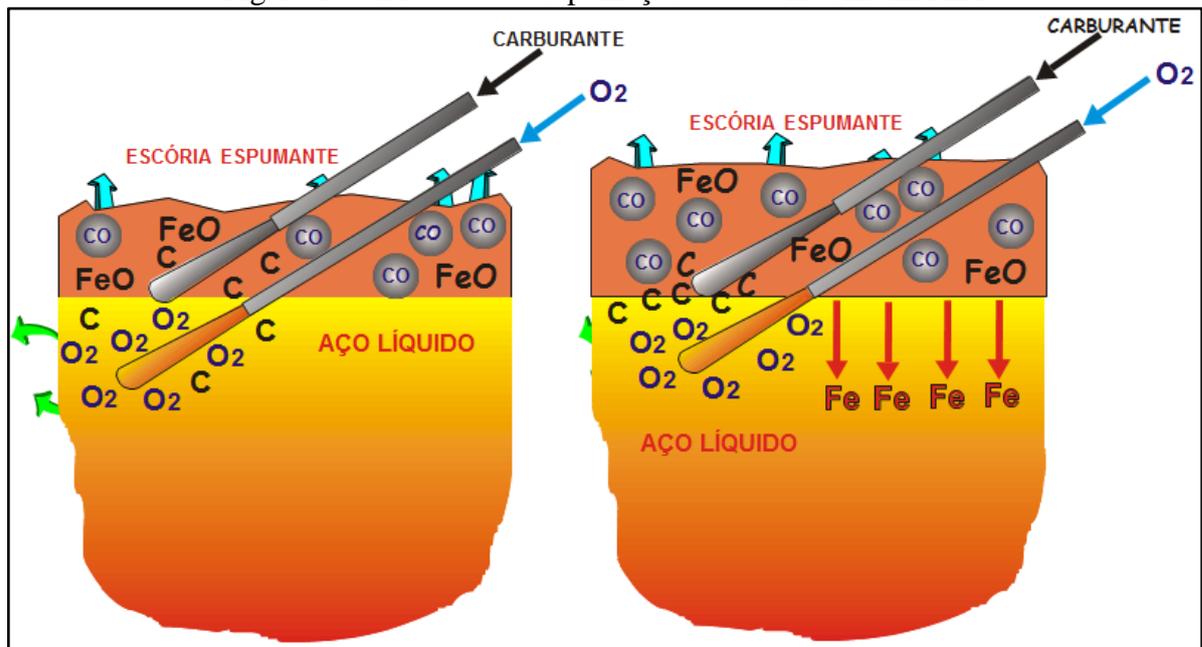
Imediatamente encerrada a etapa de carregamento, dar-se início a etapa seguinte, a fusão. O tempo de fusão começa a ser contado da primeira transferência de energia dos eletrodos para a carga metálica. A energia necessária para a fusão é em parte elétrica, provida pelos eletrodos, maior suplente, e em parte química, provida por várias fontes, como pelos queimadores que queimam uma mistura de gás natural, oxigênio e ar, pela injeção de oxigênio através de lanças consumíveis ou lanças automáticas diretamente na sucata aquecida, onde o oxigênio reage com o ferro liberando energia pela reação exotérmica. A energia química também é provida por reações exotérmicas que ocorrem quando se atinge um estado de aço líquido no forno, onde o oxigênio reage com alumínio, silício, manganês, fosforo, carbono e ferro de forma exotérmica que produz óxidos que irão integrar-se a escória. A reação do oxigênio com o carbono do banho gera monóxido de carbono, $\text{CO}_{(g)}$, que pode reagir no forno se houver oxigênio disponível e gerar mais energia no fenômeno chamado de pós-combustão (*post-combustion*). Uma vez que toda a sucata do primeiro carregamento seja fundida, segue-se então para o segundo carregamento, onde o processo de fusão basicamente se repete até que a condição de banho plano tenha sido alcançada. Com isso, as laterais internas do forno irão ser expostas a radiação. Para contornar este problema, é usada a escória espumante. Tal prática requer que a lança de carbono/oxigênio seja introduzida no forno para que o oxigênio reaja com

o ferro do banho produzindo $\text{FeO}_{(l)}$, e que carbono reaja com o FeO produzindo $\text{CO}_{(g)}$ inflando-a. Basicamente, deve-se progredir tais reações em balanço [18]:



Tais reações devem seguir controladas para que não se ultrapasse os limites de rendimento metálico do processo [18]. Com isso, o arco gerado pelos eletrodos é submerso na escória, protegendo os painéis refrigerados e abóbada do forno, permitindo uma operação com arco longo. A submersão do arco na escória espumante também evita que o nitrogênio seja dissociado no arco, impedindo que seja dissolvido no aço líquido [13]. A Figura 17 ilustra o fenômeno de injeção de carbono e oxigênio no banho.

Figura 17 – Processo de espumação da escória em um FEA



Fonte: [12].

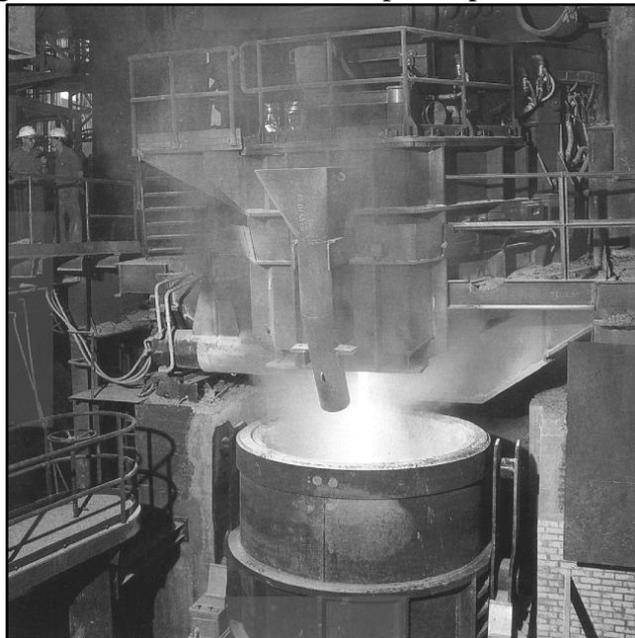
Com a condição *flat bath* atingida, há uma tomada de temperatura e ppm de O_2 do aço. Tal análise irá informar ao operador como está o estado do banho para a etapa seguinte do processo, o refino.

No refino, basicamente ocorre a remoção de elementos como P, S, Al, Si, e Mn através da adição de oxigênio supersônico no banho. Tais elementos formam óxidos e são incorporados a escória [13]. Também ocorre a descarburização com a há formação de gás ($\text{CO}_{(g)}$ principalmente) que promove a agitação do banho, resultando em troca de calor,

homogeneização de composição química, interação metal escória e eliminação de gases dissolvidos [18]. A remoção do fósforo é facilitada por baixas temperaturas e estado oxidado do banho, por isso é feita no refino primário [13, 18]. Já a dessulfuração é mais comumente realizada em ambientes desoxidados, no refino secundário do aço, na metalurgia de panela [13, 18]. Além de temperatura e oxidação (%FeO), fluidez da escória, basicidade adequada e composição do banho devem ser atingidas para que se possa obter a maior performance de cada reação. Com a escória de refino já formada, operações de retirada de escória são realizadas durante o refino para evitar possíveis reversões do fósforo da escória para o aço [13]. Após, o operador irá checar novamente a temperatura e ppm de O do banho, fazendo possíveis aquecimentos e injeções se necessário. Atingida a temperatura requerida, o FEA é desligado e dar-se início ao vazamento do aço para a panela.

O início do vazamento (Figura 18) é feito com o basculamento do FEA para o lado onde a panela de aço está posicionada. Após, é feita a abertura do canal EBT por onde o aço líquido escoou pela ação da gravidade. Durante o vazamento do aço para a panela, são feitas adições que geralmente tem o objetivo de desoxidar o aço assim como a formação de uma nova camada de escória sobre o banho para o tratamento posterior do aço (forno panela ou estação de panela) [13, 18]. As adições são feitas preferencialmente enquanto o jato de aço está fluindo do FEA para a panela, justamente para aproveitar a alta movimentação do aço na panela e obter uma homogeneização de composição química [13].

Figura 18 – Vazamento do FEA para a panela refratária



Fonte: [13].

Terminado o vazamento, os operadores realizam a desobstrução e preenchimento do canal EBT com areia refratária [13]. O FEA então é retornado para sua posição de carregamento. Entre o final e o início do novo ciclo *tap-to-tap*, os operadores realizam uma observação geral do FEA para prevenir quaisquer complicações na corrida seguinte (preparação) [13].

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Coleta e preparação das amostras de sucata recuperada

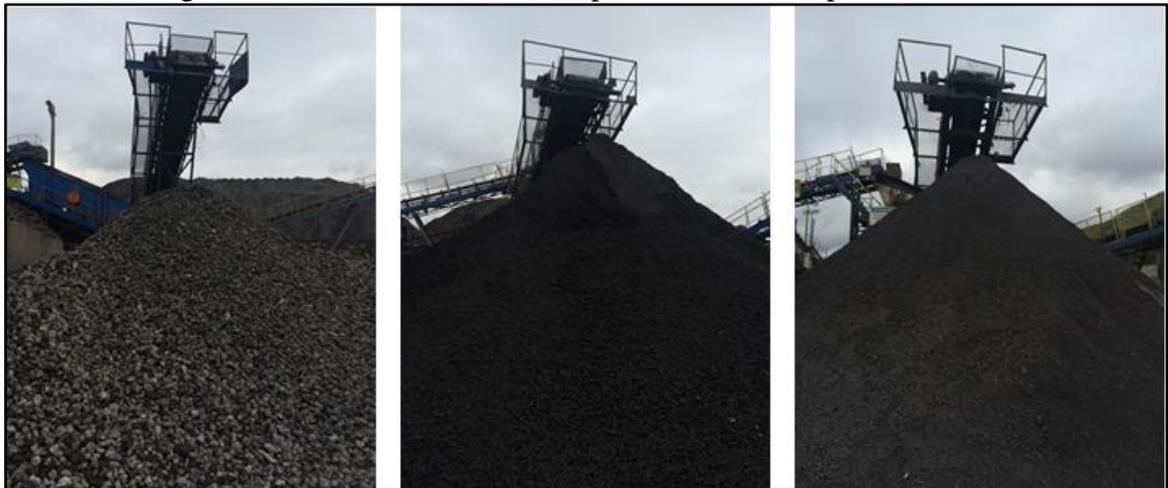
Ao final da rota de processamento anteriormente descrita, são produzidas 3 sucatas com diferentes granulometrias e teores de metálicos, como apresentado na Tabela 4 abaixo e ilustrado na Figura 19.

Tabela 4 – Resultado do beneficiamento das perdas metálicas

Sucata Recuperada	Teor Metálico (%)	Faixa granulometria (mm)
A	90	50 a 100
B	75	25 a 50
C	60	<25

Fonte: [12].

Figura 19 – Pilha das sucatas recuperadas ao fim de processamento

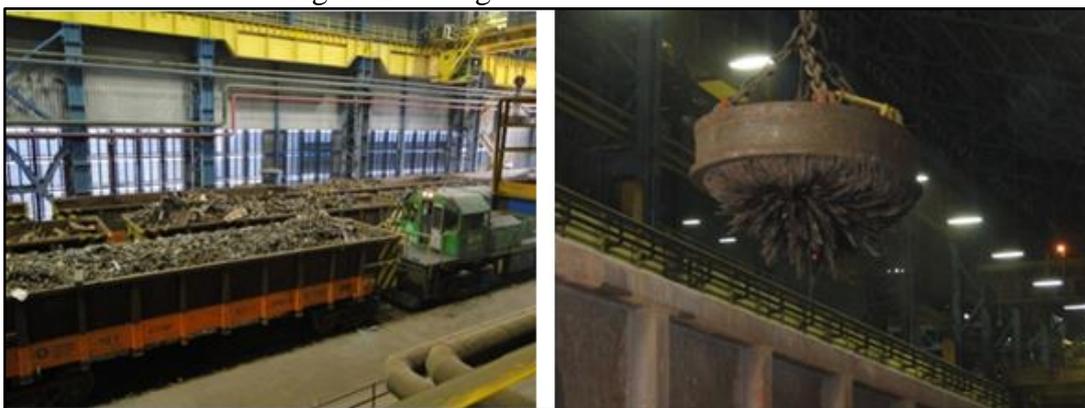


Fonte: [12].

A esquerda, sucata recuperada A, centro, B e direita C.

Efetuuou-se a coleta das amostras no pátio de sucatas da aciaria elétrica da CSN (Figura 20) com o uso de um eletroímã no vagão que transporta e armazena a matéria prima. As sucatas foram retiradas das extremidades e do meio do vagão.

Figura 20 – Vagões de sucata e eletroímã



Fonte: [12].

Com a retirada das sucatas, as mesmas foram quarteadas, armazenadas em tambores e bags, identificadas e transportadas para o centro de pesquisas da CSN, onde foram realizadas as análises. O procedimento é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Coleta e armazenamento



Fonte: autoria própria.

No centro de pesquisas, as sucatas foram homogeneizadas e novamente realizou-se o quarteamento (Figura 22) para a retirada das amostras finais de sucata recuperada no estado natural.

Figura 22 – Etapa de quarteamento no centro de pesquisas da CSN



Fonte: autoria própria.

Com o quarteamento final, as amostras foram armazenadas em baldes e postas em uma estufa para que se removesse qualquer vestígio de umidade (Figura 23).

Figura 23 – Amostras em baldes e postas para secar em estufa



Fonte: autoria própria.

Após a secagem de 24 horas, as sucatas foram submetidas aos processos de britagem, peneiramento e pulverização (ilustrados na Figura 24) no Laboratório de Matérias-Primas no centro de pesquisas da CSN para as posteriores análises. As peneiras usadas foram de 150 e 125 mesh.

Figura 24 – Etapas da obtenção das amostras pulverizadas de sucata recuperada



Fonte: autoria própria.

Primeiramente, as amostras pulverizadas de cada sucata recuperada (A, B e C) foram levadas ao Laboratório de Química Inorgânica da CSN para que fossem submetidas a análise química por Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente. Após isso, uma pequena parte da massa previamente britada de cada sucata recuperada foi submetida a uma microanálise elementar usando um Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de raios-X por espectrometria de dispersão de energia, EDS, (*energy dispersive X-ray spectrometer*) para a obtenção de outra análise química. As duas, posteriormente, foram comparadas. Após, as amostras de sucatas postas na estufa foram submetidas ao ensaio de fusão, onde procurou-se avaliar o rendimento das três sucatas recuperadas.

4.2 Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente

Historicamente, a espectrometria de emissão atômica baseou-se na atomização e excitação por chama, arco elétrico e centelha elétrica, e todos esses métodos continuam tendo aplicações importantes na análise de elementos metálicos. Atualmente, fontes de plasma têm se tornado o método mais importante e largamente utilizado para a espectrometria de emissão atômica [20]. Entre as vantagens que a espectrometria de emissão por plasma apresenta podemos citar:

1- Baixa interferência entre elementos, que é uma consequência direta de suas altas temperaturas;

2- Bons espectros de emissão são obtidos para a maioria dos elementos em um único conjunto de condições de excitação. Como consequência, os espectros para dúzias de elementos podem ser registrados simultaneamente. Essa propriedade tem particular importância para análises multielementares de amostras de tamanho reduzido;

3- Permitem a determinação de baixas concentrações de elementos que tendem a formar compostos refratários;

4- Permitem a determinação de não-metais, tais como enxofre e bromo;

5- Em princípio, todos os elementos metálicos podem ser determinados;

6- Elementos podem ser detectados ao nível de 10 partes por bilhão (ppb) ou menos.

As aplicações das fontes de plasma são úteis para a análise elementar qualitativa como quantitativa. A excelência dos resultados vem da sua alta estabilidade, baixo ruído, baixa radiação de fundo e por serem livres de interferências quando operadas em condições apropriadas [20].

As amostras usadas nesta técnica são dissolvidas ou suspensas em líquidos aquosos ou orgânicos, por isso, é necessário um tratamento preliminar para obtenção de uma solução do analito na forma pronta para a atomização. Alguns métodos mais comuns para a decomposição e dissolução das amostras incluem o tratamento com ácidos minerais quentes, oxidação com reagentes líquidos (ácido sulfúrico, nítrico ou perclórico), combustão em bomba de oxigênio ou outro recipiente fechado para evitar a perda do analito, incineração em altas temperaturas e fusão em altas temperaturas com reagentes como óxido bórico, carbonato de sódio, peróxido de sódio ou pirossulfato de potássio [20].

A análise com as sucatas recuperadas foi feita no Laboratório de Química Inorgânica da CSN usando um espectrômetro do fabricante Spectro, modelo Genesis. Os passos para a decomposição e dissolução das amostras pulverizadas de sucata recuperada almejam a detecção dos elementos, Fe, Al, Mg e Mn com padrão interno já estabelecido, feito pelo técnico especializado. A análise dos óxidos FeO, Fe₂O₃ foi realizada pela técnica via úmida (titulação).

4.3 Microanálise elementar em microscópio eletrônico de varredura

Paralelamente as análises feitas usando a espectrometria de emissão atômica, optou-se por realizar-se uma microanálise elementar usando um espectrômetro de identificação e

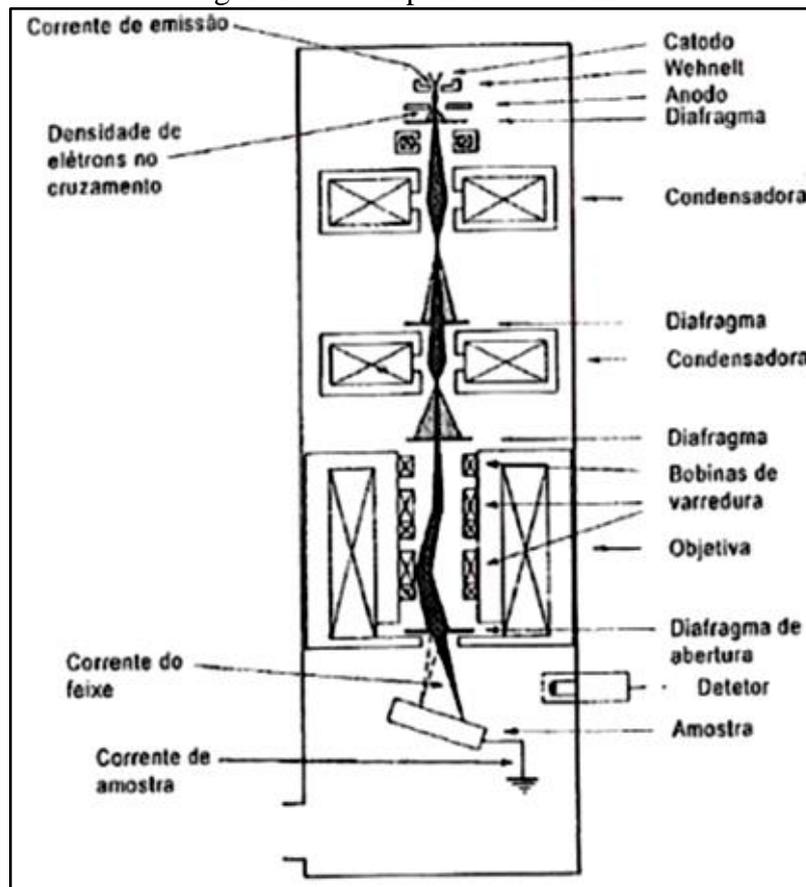
quantificação de raios-X tipo dispersão de energia, (*energy dispersive X-ray spectrometer – EDS*), acoplado a um MEV em uma parcela das amostras de sucata recuperada que foi britada.

Dentre as características de um MEV, podemos ressaltar [21]:

- Obtenção de imagens de superfícies polidas ou rugosas, com grande profundidade de campo e alta resolução;
- Fácil interpretação das imagens, com aparência tridimensional;
- Aquisição de sinal digital, possibilitando processamento dos sinais, e manipulação e processamento das imagens;
- Com o auxílio de acessórios, possibilidade de se realizar microanálise de elementos;

A imagem no MEV é o mapeamento das interações que ocorrem entre elétrons e a superfície da amostra. Os elétrons são gerados no canhão de elétrons que é a fonte de iluminação dos microscópios eletrônicos. Basicamente, a fonte de elétrons no MEV podem ser termoiônicas e de emissão de campo, em que ambas agem como cátodos emitindo elétrons que são focalizados em um ponto, denominado cruzamento, por um ânodo com potencial negativo, que é considerado como a origem virtual da fonte. Para a emissão dos elétrons com fonte termoiônicas, um material refratário é aquecido, geralmente filamentos de tungstênio (mais tradicional) ou um cristal afilado de hexaboreto de lantânio, LaB₆. A diferença das fontes está no brilho final produzido, sendo que o filamento de W tem um brilho menor que o cristal de LaB₆. Com a alta temperatura na fonte devido ao fornecimento de energia, a função trabalho de emissão de elétrons é superada por alguns elétrons-volt para que seja possível a emissão de elétrons térmicos. Os elétrons então são focalizados por uma lente eletrostática (cilindro de Wehnelt) no local denominado cruzamento. Após o canhão, os elétrons passam por uma série de lentes (duas condensadoras, uma objetiva) que tem como objetivo desmagnificar e focalizar o feixe de elétrons sobre a amostra, alterando distância de trabalho que influencia a qualidade da imagem. O MEV ainda conta com um conjunto de diafragmas que limitam a região da amostra observada. A Figura 25 a seguir ilustra um esquema de componentes de um MEV. A varredura da amostra pelo feixe de elétrons é executada pelas bobinas de varredura controladas em sincronismo com o tubo de raios catódicos (TRC) por diversos modos, sendo a varredura em X-Y mais utilizada para a obtenção de imagens [21].

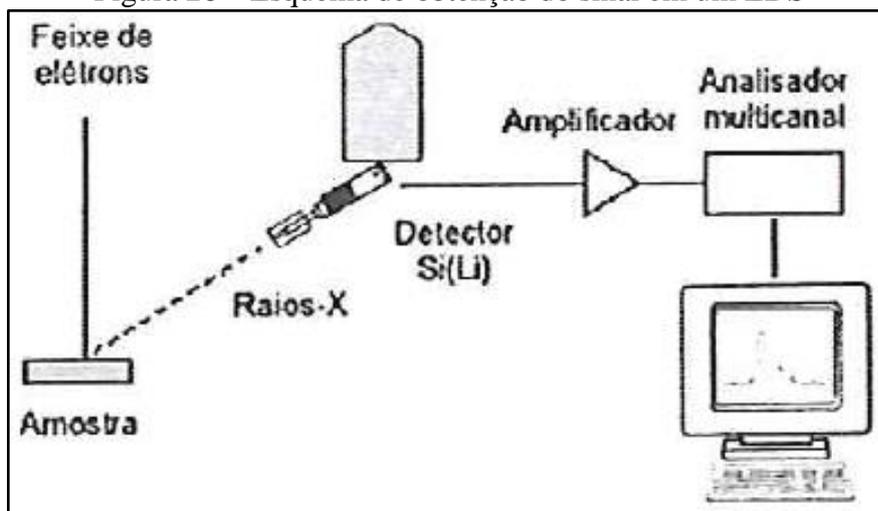
Figura 25 – Componentes do MEV



Fonte: [21].

Mediante a utilização dos múltiplos efeitos de interação entre os elétrons e a matéria, o MEV permite a aquisição de muitas informações, como a utilização dos raios-X característicos para mapear visualmente a composição dos elementos existentes em uma microrregião através da dispersão de energia ou comprimento de onda. Para o caso de dispersão de energia, são utilizados detectores semicondutores que emitem sinal proporcional à energia do fóton de raios-X incidente, que atravessam uma janela de berílio e se chocam em um cristal de silício dopado com lítio. Um esquema pode ser observado na Figura 26 a seguir [21].

Figura 26 – Esquema de obtenção do sinal em um EDS



Fonte: [21].

O MEV Zeiss modelo DSM962 e o detector EDS SDD Apollo X do laboratório de metalografia do centro de pesquisas da CSN foi utilizado para a análise da parte britada das sucatas recuperadas. A Figura 27 ilustra uma porção da sucata analisada.

Figura 27 – Sucata recuperada analisada no MEV



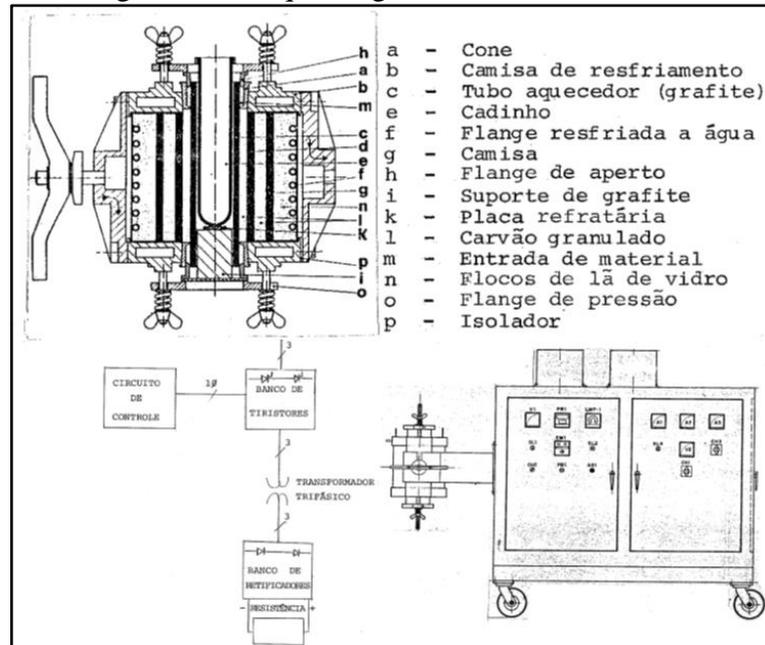
Fonte: autoria própria.

4.4 Ensaio de Fusão

Para a verificação e comparação do conteúdo metálico das sucatas recuperadas, optou-se por fundir o material, haja vista que a separação da fração metálica da fração não metálica seria mais eficiente. Foi utilizado um Forno Elétrico de Fusão Laboratorial tipo Tammann fabricante Combustol do Laboratório de Matérias Primas da CSN para a fusão das sucatas recuperadas.

O Forno Tammann basicamente utiliza corrente elétrica que passa por um banco de tiristores, transformador trifásico e banco de retificadores para aquecer um cadinho de grafite por resistência, podendo alcançar temperaturas da ordem de 2500°C [22]. A Figura 28 esquematiza o forno e seus principais componentes e circuito elétrico.

Figura 28 – Esquema geral do Forno Tammann



Fonte: [22].

Foram realizadas 3 fusões com cada sucata recuperada (A, B e C), totalizando 9 fusões. A massa de cada fusão foi de aproximadamente 2 kg. O procedimento pode ser observado nas Figuras 29 e 30 a seguir.

Figura 29 – Procedimento de fusão das sucatas recuperadas



Fonte: autoria própria.

Forno Tammann, amostra de sucata recuperada, cadinho de grafite.

Figura 30 – Procedimento de fusão, material fundido vazado e resfriado



Fonte: autoria própria.
Metal e escória agregados após a fusão.

Após cada fusão, foram obtidas uma massa de metal e escória, como pode ser observado na Figura 30. A separação foi possível graças a diferença de densidade entre o metal líquido e a escória, onde a escória sobrenada o banho, com menor densidade que o metal.

4.5 Difração de raios-X da fração escória

Os métodos de difração de raios-X são largamente utilizados para análise qualitativa e quantitativa de todos os elementos da tabela periódica que tem número atômico maior que o sódio [20]. O objetivo desta análise foi investigar quais iriam ser as fases encontradas na escória produzida após o ensaio de fusão das sucatas recuperadas A, B e C.

Os raios-X constituem uma radiação eletromagnética de comprimento de onda curto produzida pela aceleração ou desaceleração de elétrons de alta energia ou pelas transições de elétrons dos orbitais internos dos átomos. A interação entre o vetor campo elétrico dos raios-X e os elétrons da matéria que a radiação atravessa resulta no espalhamento. Quando os raios-X são espalhados pelo ambiente ordenado de um cristal, ocorrem interferências construtivas e destrutivas entre os raios espalhados porque as distâncias entre os planos cristalográficos são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação, resultando na difração. Para que a difração de raios-X ocorra, é necessário que um feixe de raios-X atinja a superfície de um cristal em um ângulo θ satisfazendo a Lei de Bragg. Quando tal radiação atinge o cristal, uma parte é espalhada pela camada dos átomos da superfície e uma parte do feixe penetra nas camadas de átomos posteriores a superfície (feixe não-espalhado). O efeito acumulativo desse

espalhamento pelos planos cristalográficos regularmente espaçados no cristal é a difração. As condições prévias para que a difração ocorra são [20]:

- O espaçamento entre as camadas de átomos devem ser aproximadamente o mesmo que o comprimento dos raios-X incidentes;
- Os planos cristalográficos devem ter um arranjo altamente regular.

O ensaio de raios-X realizado nas amostras de escória das 3 sucatas recuperadas após a fusão foi feito no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena –USP. O difratômetro utilizado foi da marca Paralytical modelo Emyrean, com tubo de Cobre (Cu) [23]. Os padrões de difração encontrados usaram o intervalo 2θ de 0° a 90° com passo de 1° .

4.6 Fluorescência de raios-X da fração escória

Para a identificação da composição química das escórias geradas no ensaio de fusão das sucatas recuperadas, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-X.

Assim como a difração, a fluorescência de raios-X é largamente utilizada para a caracterização de agregados siderúrgicos. A absorção de raios-X pela amostra produz íons eletronicamente excitados que retornam ao estado fundamental por transições que envolvem elétrons de níveis de energia mais alta. Tomando como o exemplo o chumbo, quando o raio-X é absorvido, um íon excitado com uma vacância na camada K é produzido quando o comprimento de onda da radiação menores que $0,14 \text{ \AA}$. Passado um curto instante, o íon retorna ao seu estado fundamental por meio de transições eletrônicas caracterizadas pela emissão de raios-X (fluorescência) de comprimento de onda idêntico àquele resultante da excitação produzida pelo choque com elétrons. No entanto, os comprimentos de onda das linhas de fluorescência são sempre um pouco maiores que os comprimentos de onda das arestas de absorção correspondentes, porque a absorção requer ionização (remoção completa do elétron), enquanto a emissão envolve transições de um elétron de um nível mais alto de energia do átomo. No caso da prata, a aresta de absorção K ocorre a $0,485 \text{ \AA}$, enquanto as linhas de emissão K tem comprimentos de onda de $0,497$ e $0,559 \text{ \AA}$ [20].

Antes da análise no espectrômetro, as escórias foram pulverizadas e tratadas com aglomerante inerte para a confecção de pastilhas adequadas para a inserção máquina de ensaios. O equipamento utilizado foi o espectrômetro ARL OPTMI'X da aciaria de Aços Longos da CSN UPV. Como o equipamento analisa somente a concentração dos elementos e não os compostos moleculares, a lógica do sistema converte a proporção do elemento analisado na sua

respectiva quantidade na forma de óxidos normalmente encontrados em escórias de aciaria, preestabelecidos pelo fornecedor do equipamento.

4.7 Espectrometria de emissão ótica da fração metálica

Para a caracterização da composição química elementar da fração metálica do produto da fusão das sucatas recuperadas, foi utilizada a técnica de análise via espectrometria de emissão baseada em fontes de arco e centelha.

Esses espectrômetros permitem a determinação qualitativa e quantitativa de elementos metálicos em diversos tipos de amostra, incluindo metais e ligas, solos, minerais e rochas. Contudo, quando dados quantitativos são necessários, essa técnica é substituída pelos métodos envolvendo plasma. Nas fontes de arco e centelha, a excitação das amostras ocorre no entre um par de eletrodos. A passagem da corrente dos eletrodos para o espaço entre os mesmos fornece a energia necessária para atomizar a amostra e produzir átomos ou íons em estados eletrônicos excitados [20].

O tipo de espectrômetro de emissão ótica mais utilizado nas indústrias de metais onde há a necessidade de determinação rápida da porcentagem elementos produto, haja vista o requerimento de ajuste de composição química final com precisão, são os espectrômetros fotoelétricos multicanal. Estes equipamentos, apesar de grandes e não versáteis, uma vez calibrados, são capazes de determinar, em poucos segundos, 20 ou mais elementos com precisão razoável. Ou seja, o uso deste tipo de espectrômetro é geralmente limitado a situações onde existe uma demanda por um grande número de análises de rotina em amostras similares [20].

O espectrômetro de emissão ótica utilizado para a análise da fração metálica produzida no ensaio de fusão das sucatas recuperadas foi um da marca ARL Metal Analyzer, da aciaria de Aços Longos da CSN UPV. Foram analisados um produto metálico de cada sucata.

4.8 Análise do uso da sucata recuperada A no FEA

Paralelamente aos ensaios laboratoriais, foi realizado um plano do uso de sucata recuperada no FEA. Devido as sucatas recuperadas terem um percentual metálico reduzido, podendo este fator interferir negativamente no rendimento metálico do FEA, conseqüentemente na produção final, a sucata recuperada com maior rendimento metálico, a priori, sucata recuperada A, foi a escolhida para a análise no FEA. Sua adição foi paulatina, e os resultados avaliados ao longo de um ano de produção. A porcentagem de adição de sucata recuperada variou de 5 a 35% da capacidade total do FEA. Os indicadores de desempenho operacionais avaliados por corrida foram:

- kWh de Energia Elétrica consumida por corrida;
- Nm³ de Oxigênio consumido por corrida;
- kg da massa dos fundentes consumidos (cales calcítica e dolomítica) por corrida;

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ordem de apresentação dos resultados e discussão no texto abaixo seguirá a mesma ordem com a qual foi exposta anteriormente na seção Procedimentos Experimentais. Contudo, a exposição das análises laboratoriais será dividida em resultados para as sucatas recuperadas **em estado natural** e em **frações metálica e escória** provenientes do ensaio de fusão das sucatas recuperadas.

5.1 Resultados das análises das sucatas recuperadas como recebidas

A Tabela 5 mostra o resultado da análise feita nas amostras pulverizadas das sucatas recuperadas. Os componentes encontrados foram previamente solicitados, ou seja, na análise não consta todos os elementos nem óxidos que compõem a amostra, somente aqueles que foram considerados interessantes do ponto de vista de aciaria.

Tabela 5 – Resultado da análise via espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente e via úmida.

Componente	Sucata Recuperada (%)		
	A	B	C
FeO	5,09	7,06	20,75
Fe ₂ O ₃	24,78	22,66	10,39
Fe ₀ (metálico)	9,8	4,468	1,336
Total Fe	31,15	25,79	24,69
Al	3,708	1,988	1,616
Mg	3,166	3,098	3,015
Mn	3,888	3,103	2,689

Fonte: autoria própria.

Entre os compostos que contem ferro, a sucata recuperada C obteve a maior porcentagem de FeO, enquanto a sucata A apresentou maiores porcentagens de Fe₂O₃ e ferro metálico do que as outras duas sucatas, como também no percentual de ferro total. Também foram encontrados os elementos Al, Mg e Mn em quantidades significativas.

Como podemos observar, a sucata recuperada A obteve maiores concentrações de ferro do que as outras sucatas, como já era esperado (pelo resultado anterior feita pela empresa de processamento de resíduos siderúrgicos). Quanto às porcentagens de Al, Mg e Mn, podemos perceber que um cuidado na adição das sucatas deve ser tomado, já que pode haver desvio de

composição química final do produto se uma demasiada percentagem desses elementos ultrapassar a faixa para determinado aço.

A Tabela 6 a seguir expõe o resultado da análise quantitativa usando o EDS do MEV. As percentagens de carbono e oxigênio devem ser questionadas devido a técnica de EDS ter um poder de resolução crítico para elementos com número atômico menor que 12 (no caso, carbono e oxigênio) [21].

Tabela 6 – Resultado da EDS em MEV

Elemento	Sucata Recuperada (% peso)		
	A	B	C
C	9,185	11,34	7,71
O	24,99	26,73	28,1
Mg	2,575	3,03	3,88
Al	1,655	1,845	3,91
Si	5,395	5,495	5,82
Ca	24,205	27,655	27,44
Mn	1,88	2,045	2,845
Fe	30,115	21,87	20,295

Fonte: autoria própria.

Observa-se que, novamente, a sucata recuperada A apresentou teores maiores de ferro em sua composição, seguida das sucatas recuperadas B e C. Podemos enfatizar também o teor de cálcio (Ca) encontrado na análise como sendo proveniente do tratamento recebido anteriormente pela escória enquanto fazia parte do processo em aciaria. Aqui vemos que as sucatas recuperadas ainda mantêm seu caráter de escória devido a sua composição química.

A Tabela 7 a seguir expõem o resultado da fusão das sucatas recuperadas. Consta na tabela o dado relativo a percentagem de ferro retirada da análise feita na fração metálica usando a espectrometria de emissão ótica (Tabela 11), que será abordada mais à frente no texto.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de fusão

Resultado	Sucata Recuperada (%)		
	A	B	C
Rendimento metálico	77	70	62
%Fe da fração metálica	95	92	94
Conteúdo de Fe	73	65	58
Rendimento metálico anterior	90	75	60

Fonte: autoria própria.

O rendimento metálico foi calculado como a média de 3 fusões para cada sucata recuperada, onde o rendimento é dado pela Equação 4.

$$\text{Rendimento metálico} = \frac{\text{Massa metálica após fusão}}{\text{Massa inicial fundida}} \times 100 \quad (4)$$

Pode-se observar que a sucata recuperada A apresentou o maior rendimento dentre as avaliadas. Se usarmos o valor da porcentagem de Fe da fração metálica do produto da fusão e multiplicarmos pelo valor do rendimento metálico, haja vista que a fração metálica apresenta outros elementos como veremos mais adiante no texto, podemos obter o valor do percentual do conteúdo de Fe presente na fração metálica de cada sucata recuperada. Os valores encontrados foram diferentes do banco de dados da empresa. Ao que o resultado indica, o teste realizado anteriormente (teste de deslocamento de água) superestima o valor do conteúdo metálico das sucatas recuperadas. Podemos atribuir este resultado ao fato de que para diferentes porções da pilha de sucata recuperada, a densidade da fração escória muda, em decorrência dos processos de produção e processamento mineral.

5.2 Resultado das análises dos produtos do ensaio de fusão

A Figura 31 abaixo ilustra os produtos do ensaio de fusão das sucatas recuperadas: metal e escória (envelope).

Figura 31 – Metálico e escória produzidas no ensaio de fusão



Fonte: autoria própria.

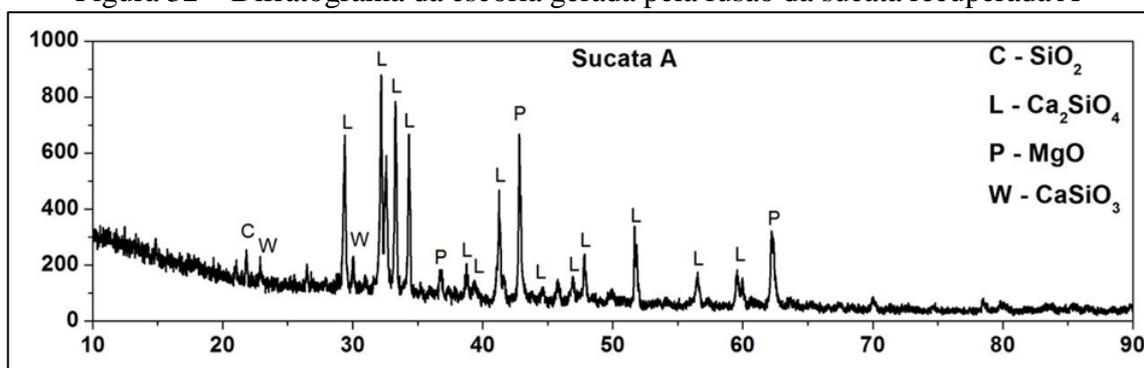
A Tabela 8 abaixo resume as fases encontradas usando a técnica de difração de raios-X da EEL-USP de Lorena, nas escórias produzidas no ensaio de fusão. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os difratogramas obtidos para as escórias A, B e C, respectivamente.

Tabela 8 – Fases encontradas usando DRX nas escórias produzidas no ensaio de fusão

Fase mineralógica	Formula	Escória		
		A	B	C
Cristobalita	SiO_2	X	X	X
Larnita	Ca_2SiO_4	X	X	X
Mayenita	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$		X	
Periclásio	MgO	X	X	X
Wollastonita	CaSiO_3	X		X

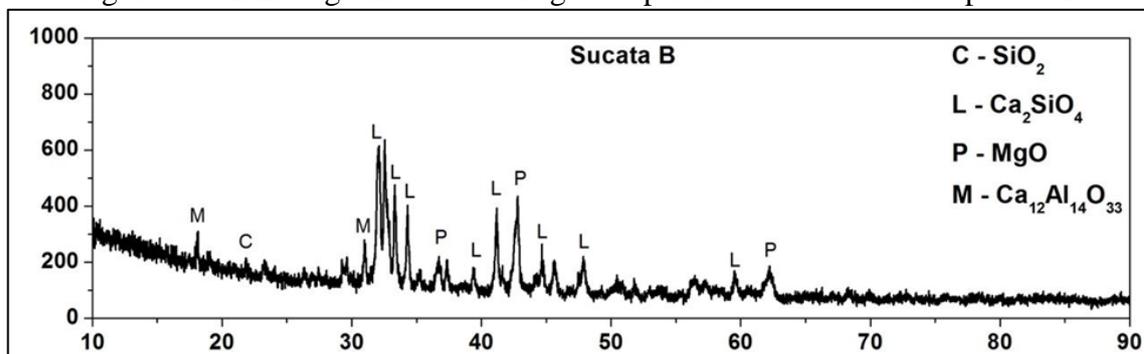
Fonte: USP-Lorena.

Figura 32 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada A



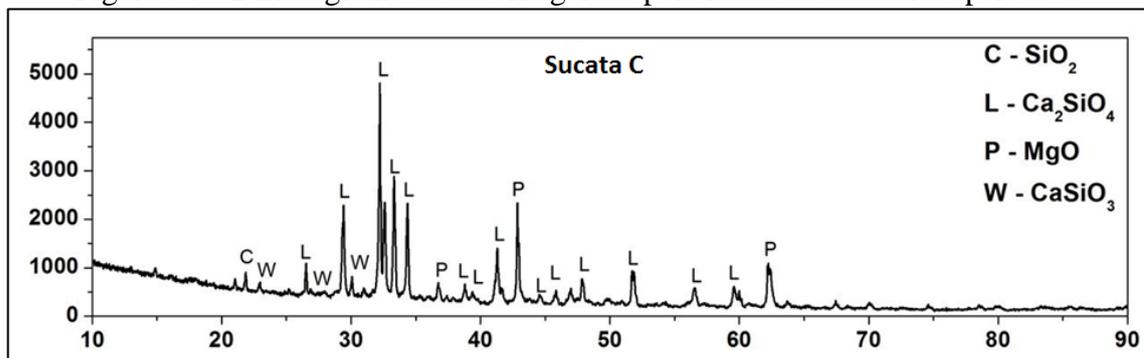
Fonte: USP-Lorena.

Figura 33 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada B



Fonte: USP-Lorena.

Figura 34 – Difratoograma da escória gerada pela fusão da sucata recuperada C



Fonte: USP-Lorena.

Como podemos observar, foram encontradas fases que basicamente possuem os óxidos MgO, SiO₂, e CaO, típicos de escórias de aciaria comuns. A presença de uma fase que contém Al somente na sucata recuperada B não foi totalmente compreendida. Geiseler (1996) [3] e Lim (2016) [24] em seus trabalhos sobre escórias de aciaria, identificaram as fases Ca₂SiO₄, MgO e SiO₂ e muitas outras fases. Podemos dizer que os resultados estão de certa forma coerentes, apesar de os autores citados terem encontrado diversas outras fases.

A Tabela 9 a seguir expõe a composição química das escórias geradas no ensaio de fusão obtidas pelo método de FRX.

Tabela 9 – Composição das escórias geradas

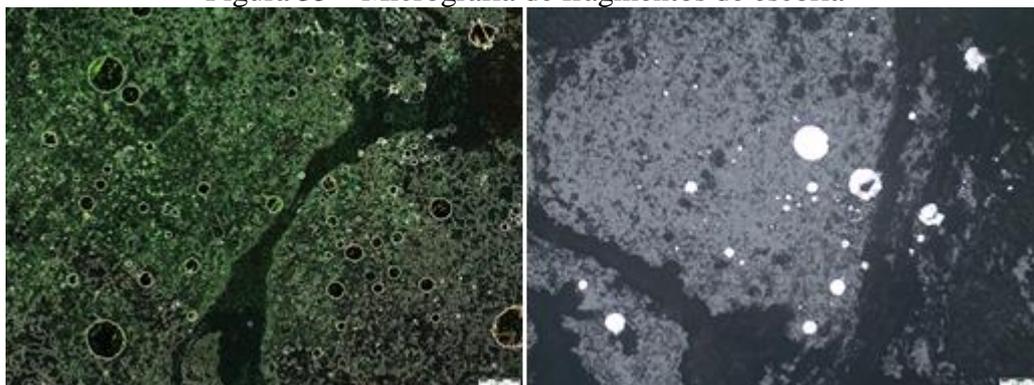
Composto	Fração escória gerada no ensaio de fusão (% peso)		
	A	B	C
CaO	55.94	41.41	50.63
SiO ₂	17.39	18.36	16.74
MnO	0.94	2.54	1.59
MgO	15.30	9.65	10.48
FeO	3.18	5.40	4.86
Al ₂ O ₃	4.25	9.98	5.50
Cr ₂ O ₃	0.01	0.19	0.02
P ₂ O ₅	0.34	0.35	0.35
S	0.24	0.23	0.23

Fonte: autoria própria.

Pode-se observar que as escórias possuem alta quantidade de CaO, SiO₂ e MgO em sua composição, reforçando os resultados encontrados no raio-X. Também pode-se verificar a presença de FeO e Al₂O₃ na análise, com a escória gerada pela sucata recuperada B apresentando o maior valor dentre as demais. Isso nos leva a crer que o raio-X não foi capaz de identificar outras fases, podendo ser por conta da baixa concentração destes na escória. Contudo a escória possui traços de outros óxidos em sua composição.

Na Figura 35 abaixo pode ser observada uma micrografia realizada em microscópio ótico de fragmentos da escória gerada pela fusão da sucata.

Figura 35 – Micrografia de fragmentos de escória



Fonte: autoria própria.

Pode-se observar na imagem que existem esferas depositadas em uma estrutura maior. Trata-se de gotas metálicas em meio aos fragmentos de escória. Pode-se supor que ainda há algum vestígio metálico na escória mesmo após a fusão das sucatas recuperadas, levando a conclusão que o método, apesar de separar as frações metal/escória, deixa resquícios metálicos.

A Tabela 10 abaixo apresenta a composição química da fração metálica oriunda da fusão das sucatas recuperadas pela técnica de espectrometria de emissão ótica.

Tabela 10 – Composição química da fração metálica

Elemento	Fração metálica produzida no ensaio de fusão (% peso)		
	A	B	C
C	3,85	6,88	5,31
Si	0,12	0,00	0,00
Mn	0,57	0,59	0,46
S	0,00	0,00	0,02
P	0,09	0,03	0,02
Cu	0,01	0,00	0,00
Ni	0,01	0,01	0,02
Cr	0,02	0,01	0,12
Sn	0,00	0,00	0,00
Mo	0,00	0,00	0,00
Nb	0,00	0,00	0,00
Ti	0,02	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00
V	0,01	0,01	0,00
B (ppm)	1	0	0
N (ppm)	18	99	35
Fe	95,30	92,49	94,06

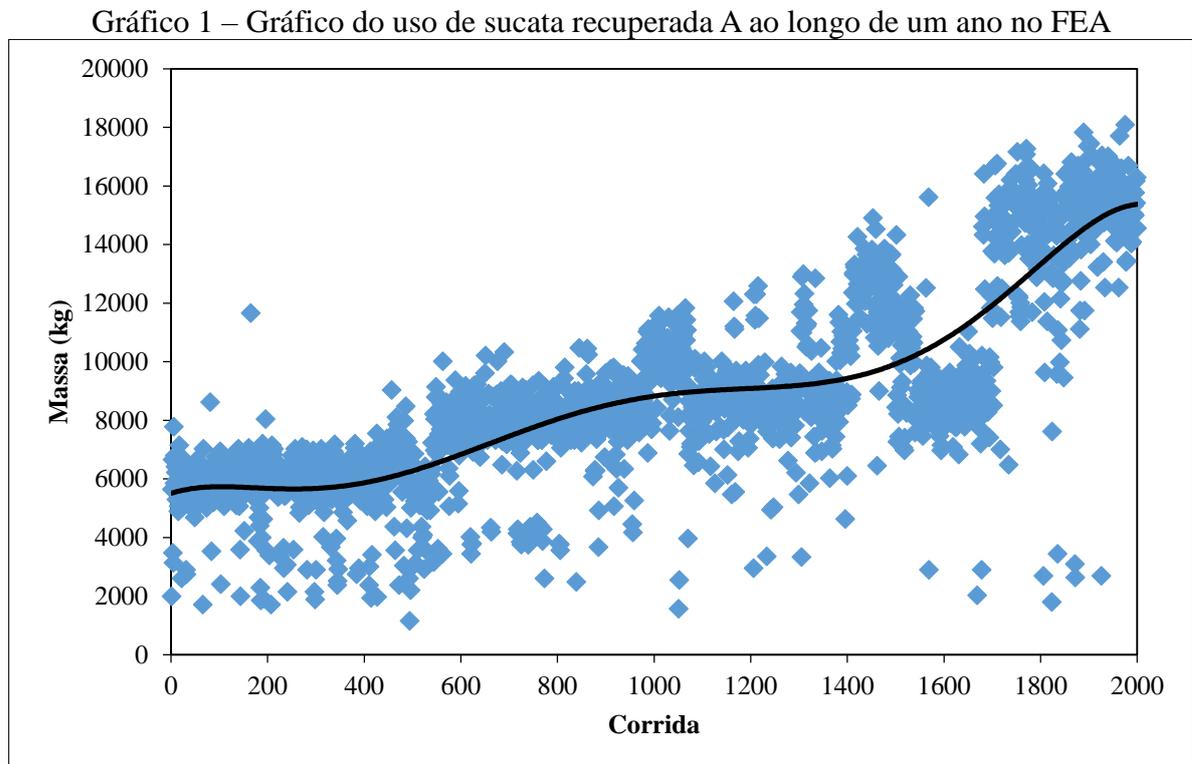
Fonte: autoria própria.

Os elementos cobre (Cu), níquel (Ni), estanho (Sn), molibdênio (Mo), nióbio (Nb), titânio (Ti), alumínio (Al), vanádio (V), apresentaram quantidades menores ou iguais a 0,02%.

O teor dos elementos deletérios, enxofre (S) e fosforo (P), não apresentou valores altos. O manganês (Mn) foi encontrado em certa quantidade, entre 0,46 a 0,59%, indicando que a sucata é oriunda das perdas metálicas que contém manganês. Este elemento deve ser considerado no cálculo da preparação dos carregamentos do FEA, haja vista que aços baixo carbono para construção civil possuem limites inferiores e superiores de Mn não tão elevados. A porcentagem de silício (Si) foi alta somente na fração metálica representada pela sucata recuperada A, indicando que parte do Si da fração escória ainda está presente. O ppm dos elementos nitrogênio (N) e boro (B) não apresentaram grandes valores, mas uma forte variação entre si (para o N). O percentual em peso de carbono (C) foi decorrente da utilização do cadinho de grafite para a fusão das sucatas, onde o carbono do cadinho difundiu-se para o banho metálico durante a fusão, o que já era esperado.

5.3 Acompanhamento dos indicadores com o uso da sucata recuperada A no FEA

O Gráfico 1 abaixo apresenta o uso paulatino da sucata recuperada A como carga no FEA ao longo de um ano de corridas na aciaria.



Fonte: autoria própria.

Podemos observar que houve um uso regular e crescente de sucata recuperada A ao longo das corridas. Houve basicamente 3 momentos, destacados na Tabela 11 abaixo.

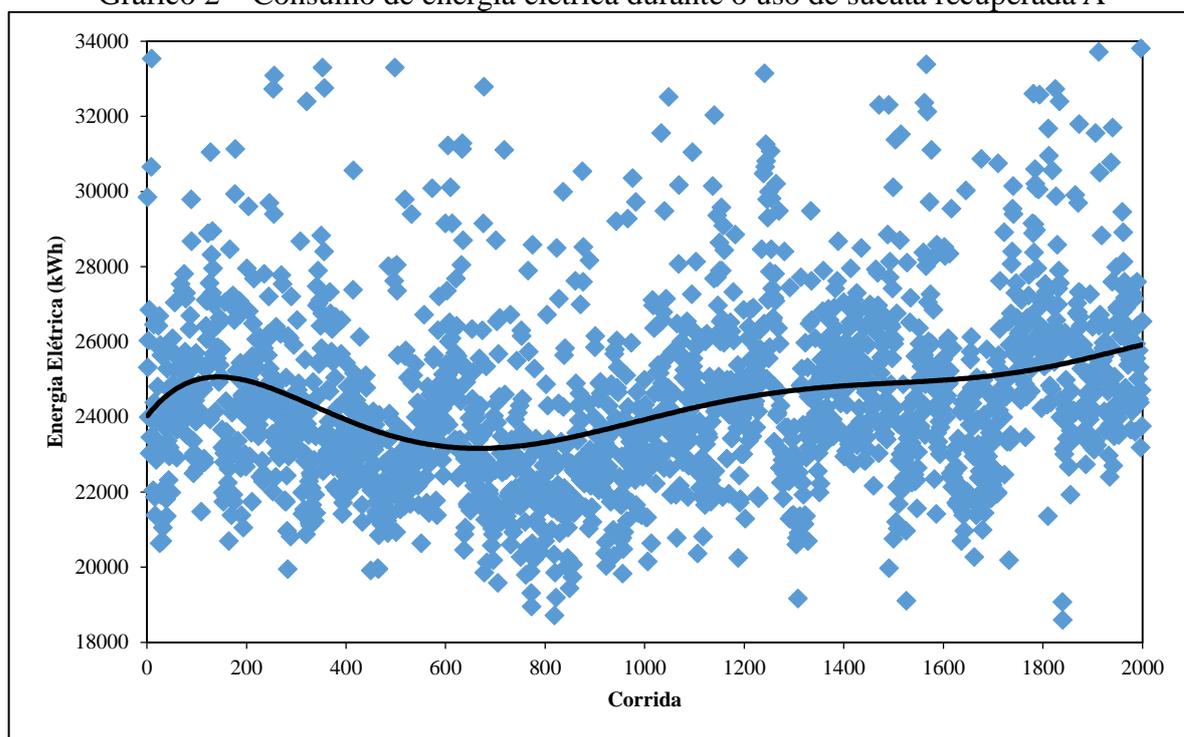
Tabela 11 – Programa do uso de sucata recuperada A

Intervalo de corridas	Massa de sucata recuperada A utilizada	Capacidade do FEA (%)
0 – 500	4500 a 7000 kg	8,6 – 13,5 %
501 – 1700	6000 a 14000 kg	11,5 – 27 %
1701 – 2000	13000 a 18000 kg	25 – 34,6 %

Fonte: autoria própria.

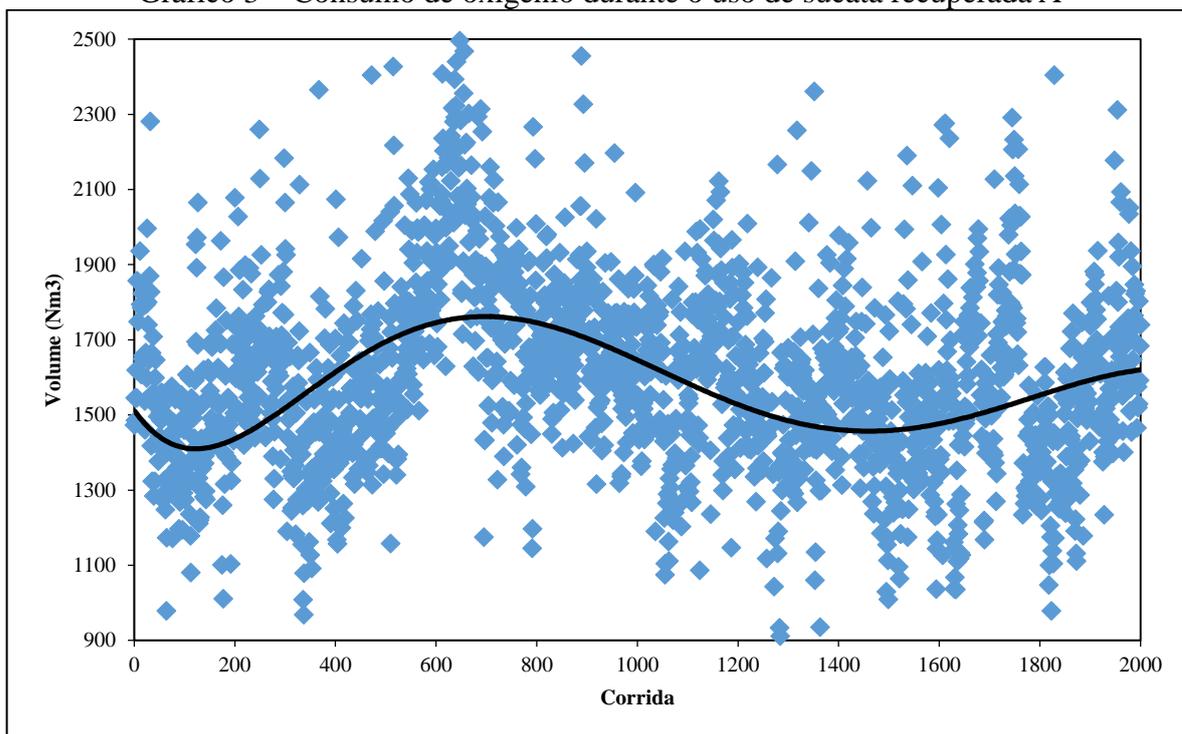
Nos Gráficos 2, 3, 4 e 5 estão plotados os KPI's avaliados durante o uso da sucata recuperada A.

Gráfico 2 – Consumo de energia elétrica durante o uso de sucata recuperada A



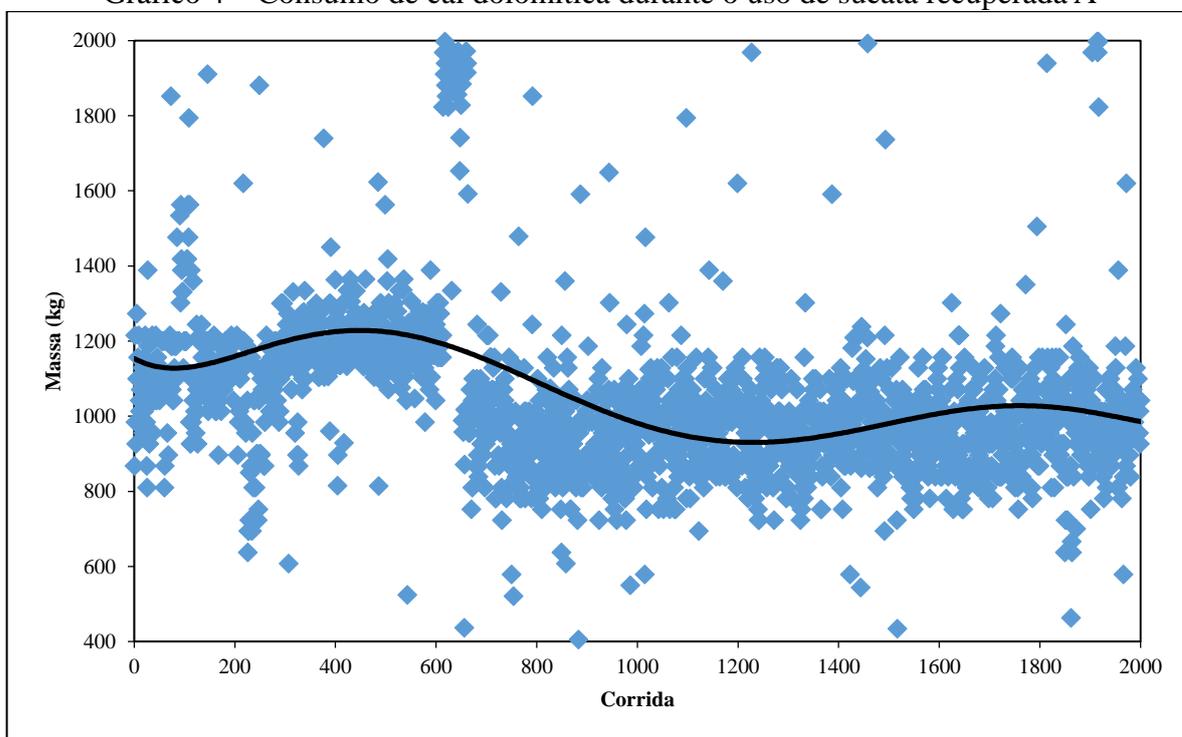
Fonte: autoria própria.

Gráfico 3 – Consumo de oxigênio durante o uso de sucata recuperada A



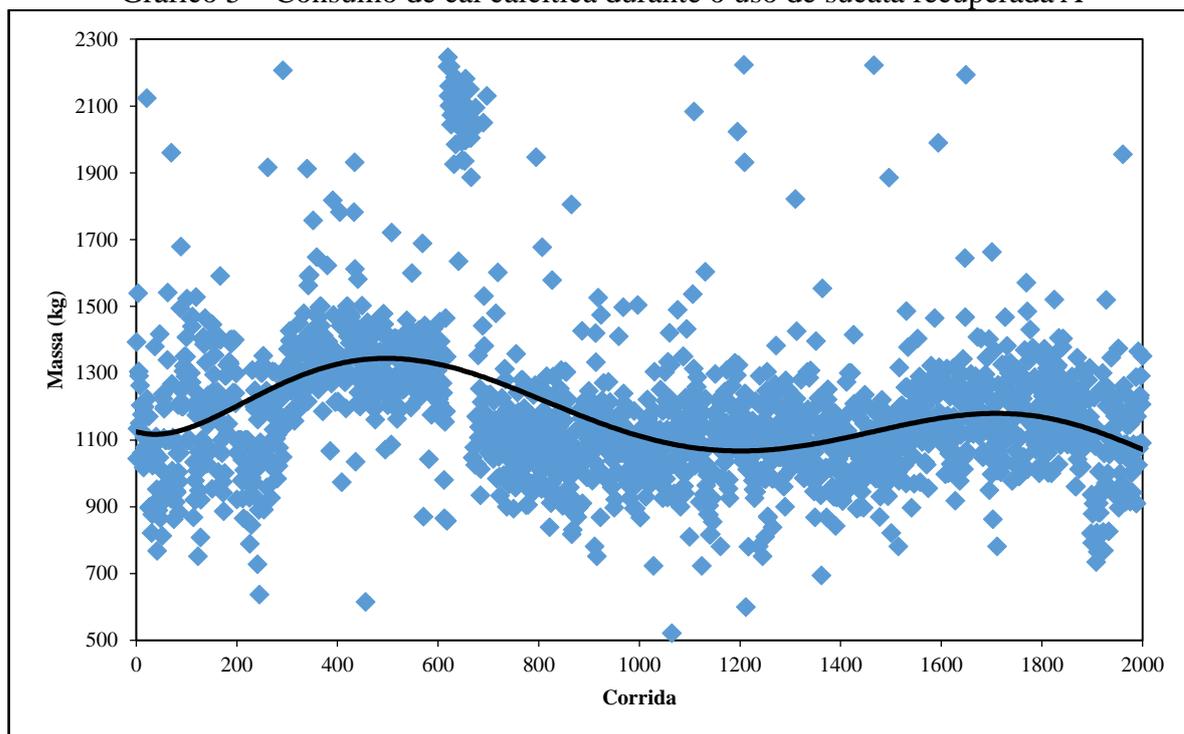
Fonte: autoria própria.

Gráfico 4 – Consumo de cal dolomítica durante o uso de sucata recuperada A



Fonte: autoria própria.

Gráfico 5 – Consumo de cal calcítica durante o uso de sucata recuperada A



Fonte: autoria própria.

Do Gráfico 2, consumo de energia elétrica do FEA, podemos observar que até a corrida número 800, aproximadamente, houve um decréscimo no consumo de energia, com um acréscimo até aproximadamente a corrida 1500 seguido de uma redução até a 1700 e aumento ao final. Como pode ser observado, há uma dificuldade em relacionar diretamente o aumento de energia com aumento do uso de sucata recuperada A no FEA. Porém, não se pode descartar essa possibilidade, pois, de acordo com as fases identificadas na DRX e da composição pela FRX, temos fases como a periclase (MgO) que possui um elevado ponto de fusão (2500°C), podendo vir a aumentar a energia necessária para fundir a sucata recuperada, haja vista a massa intrínseca de escória que a mesma possui. Quanto as outras variáveis, o consumo de oxigênio em um determinado ponto, por volta da corrida 600, aumentou, seguido de um decréscimo logo em seguida. Para as cales, não houve grandes mudanças. Assim, podemos concluir que a adição de sucata recuperada A não está ligada diretamente a variação dos outros KPI's, e que uma investigação mais detalhada é necessária.

6 CONCLUSÃO

Sobre a caracterização das sucatas recuperadas pode-se argumentar:

- O teste de deslocamento de água proposto pela empresa que faz o beneficiamento da sucata recuperada superestima os valores de rendimento metálico. Realizados os ensaios de fusão, verificou-se a eficácia do método em separar as fases metálica e escória da sucata recuperada. A variação apresentada pelo teste de deslocamento de água pode ser advinda da fase escória possuir diferentes densidades de acordo com a morfologia do agregado. No entanto, mais testes necessitam ser feitos;
- Os teores de ferro encontrados nas análises feitas com as sucatas recuperadas ao natural apresentaram valores distintos, mas todos indicaram que a sucata recuperada A apresenta uma porcentagem de ferro maior que as outras duas, o que já era verdade segundo o teste de deslocamento de água;
- Os ensaios de fusão obtiveram sucesso em separar as fases metal e escória das sucatas recuperadas, como indicaram as análises feitas nos produtos da fusão (metal e escória), entretanto, as composições das fases metálicas foram comprometidas, haja vista o uso de um cadinho de grafite no forno Tammann;

Sobre o acompanhamento feito no FEA enquanto a massa de sucata recuperada A estava paulatinamente sendo aumentada:

- O efeito da adição de sucata recuperada A sobre a energia consumida no FEA está de certa forma obscuro. Temos que a adição aumentou o consumo de energia ao longo do final das corridas, mas tendo em vista o grande número de variáveis circundando o problema, mais estudos detalhados precisam ser feitos;
- Os demais indicadores não apresentaram variações fora do comum, exceto por anomalias que podem estar relacionadas a causas operacionais ou por falha de equipamento.

- Ademais, temos o feito positivo econômico/ambiental que o uso de um material considerado um resíduo proporcionou. Do ponto de vista econômico, verificou-se que o uso de uma matéria-prima a quase custo nulo e em grandes quantidades, não alterou significativamente os resultados operacionais/produtivos do FEA. Pelo ponto de vista ambiental, temos a desapropriação de uma vasta área de passivo ambiental, além de mitigar os efeitos de contaminação do solo e águas subterrâneas, arraste e formação de grandes quantidades de fragmentos pesados.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar um cadinho de refratário (sem carbono) na realização dos ensaios de fusão para a obtenção de produto metálico com composição original da sucata;
- Utilização de métodos avançados de caracterização (método Rietveld, espectrometria Mossbauer, dentre outros) para um entendimento completo do material;
- Utilização da termodinâmica computacional para a produção de diagramas relativos aos dados encontrados nas análises, bem como prever a composição e fases dos produtos de fusão a partir dos dados encontrados;
- Realizar uma investigação minuciosa sobre o impacto da utilização de sucatas recuperadas no FEA (por exemplo, variações na composição de escória de refino primário, impacto nos refratários, eletrodos, balanços e massa e energia), afim de ser encontrar valores adequados para sua utilização das 3 sucatas, sem comprometimento da produção;
- Desenvolver método mais eficiente de beneficiamento das sucatas recuperadas para a obtenção de um material com maior conteúdo metálico possível.

REFERÊNCIAS

- [1] SHEN, Huiting; FORSSBERG, e. An overview of recovery of metals from slags. **Waste Management**, [s.l.], v. 23, n. 10, p.933-949, 2003.
- [2] YI, Huang et al. An overview of utilization of steel slag. **Procedia Environmental Sciences**, [s.l.], v. 16, p.791-801, 2012.
- [3] GEISELER, J. et al. Use of steelworks slag in Europe. **Waste Management**, [s.l.], v. 16, p.59-63, 1996.
- [4] RADOSAVLJEVIC, Slobodan; MILIC, Dragan; GAVRILOVSKI, Milorad. mineral processing of a converter slag and its use in iron ore sintering. **Magnetic And Electrical Separation**, [s.l.], v. 7, p.201-211, 1996
- [5] Svyazhin, a. G.; Shakhpazov, e. Kh. Romanovich, D. A.. Recycling of slags in ferrous metallurgy. **Metallurgist**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.25-27, abr. 1998
- [6] DOIGORUKOV, Yu. A. et al. Ways of increasing the recycling of metallurgical wastes. **Metallurgy**, [s.i.], v. [s.i.], n. 5, p.9-12, maio 1990.
- [7] REN Q; Wang YJ; Li SL. Technologies of steel slag and comprehensive utilization of resouces. **Iron Steel Res.** 2012
- [8] HUANG, X; WANG, F. An overview of steel slag processing and utilization. **Manganese Ore of China 3**, 2001.
- [9] SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. [s.i.]: Edgard Blücher, 2010.
- [10] RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira et al. **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2006.
- [11] RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira et al. **Introdução aos Processos de Preparação de Matérias-Primas para o Refino do Aço**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- [12] CSN, GGNP. **Manual do Forno Elétrico à Arco**. 2010.
- [13] FRUEHAN, Richard J. et al. **The Making, Shaping and Treating of Steel**. 11. ed. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.
- [14] MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste Management**, Duisburg, v. 21, p.285-293, 2001.
- [15] FREGEAU-WU; PIGNOLET, B. S.; IWASAKI, I. Liberation analysis of slow-cooled steelmaking slags: implications for phosphorus removal. Proceedings of the 1st International Conference on Processing Materials for Properties. **Minerals, Metals & Materials Soc (TMS)**, pp. 153–156. 1993.
- [16] LIU, S. The methods for steel slag processing. **Steelmaking**, p.50-60, 1991.
- [17] TURKDOGAN, E. T. et al. **Fundamentals of Steelmaking**. The Institute Of Materials, 1996.
- [18] SILVA, André Luiz V. da Costa e et al. **Capítulo 7 Forno Elétrico a Arco**. 2013. Disponível em: <http://www.equilibriumatrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo_7_fea_rev_2_com_indice_28072013.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2016.

- [19] UFC/Biblioteca Universitária, Comissão de Normalização. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. 2013.
- [20] SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. **Principles of Instrumental Analysis**. 6. ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2007.
- [21] MANNHEIMER, Walter A. et al. **Microscopia dos Materiais, uma introdução**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002.
- [22] Combustol, Manual de Instruções, Forno Elétrico de Fusão Tipo Tammann, 1984.
- [23] EEL-USP, Departamento de Engenharia de Materiais, Lorena, Lista de Equipamentos e Acessórios de Infraestrutura de Pesquisa. 2015
- [24] LIM, J W et al. Utilizing steel slag in environmental application - An overview. **Iop Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.**, [s.l.], v. 36, p.1-8, jun. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012067>.
- [25] ALVES, Maria Bernardete Martins; MENDES, Leandro Luis; MARCELINO, Roderval. **Mecanismo Online para Referências**. 2013. Disponível em: <<http://novo.more.ufsc.br/inicio>>. Acesso em: 29 nov. 2016.