

ANÁLISE TÉCNICA E OPERACIONAL DO EMPREGO DE SUCATA RECUPERADA NO FEA*

Tiago Seixas Bittencout¹

Esdras Melo da Silva²

Elvis Granado³

João Paulo Carvalho Osório⁴

Emerson Edilson Barros de Souza⁵

Fernando Souza Candido⁶

Resumo

No cenário econômico mundial atual, cada vez mais as indústrias têm voltado sua atenção para o reaproveitamento de materiais gerados como consequência das ações operacionais, tanto como forma de reduzir custos, como também no caráter de sustentabilidade do negócio. Em uma operação de refino primário em aciaria elétrica, onde o produto é o aço líquido, o antes considerado resíduo, mas agora denominado de coproduto, a escória, passa atuar diretamente no custo final do produto quando esta é processada, e passa a compor a carga fria usada no processo de elaboração do aço. Neste sentido, o estudo deste material se faz necessário para a compreensão de qual será o seu comportamento junto aos processos e quais vantagens e desvantagens da sua aplicação. Neste trabalho, foram feitas as caracterizações de sucatas provenientes de reaproveitamento de escórias produzidas em Forno Elétrico a Arco e em conversor LD, bem como seu impacto no refino primário, como parte integrante da carga fria no FEA.

Palavras-chave: Reaproveitamento; Sustentabilidade; Escória, FEA.

TECHNICAL AND OPERATIONAL ANALYSIS OF SLAG RECOVERY USE AT EAF

Abstract

In the current global economic scenario, more and more large companies have turned their attention to the reuse of generated materials as result of direct operational actions, both as a way to reduce costs, as well as to enhance the sustainability business virtue. In primary refining operations in steel, where the most targeted product is the liquid steel, but now called coproduct, the slag, acts directly on the final cost of the product when processed, and becomes part of the cold load of the steel making process. In this sense, the study of this material is necessary to understand what will be its behavior upon the processes and what advantages and disadvantages after the implementation. In this paper, recycling slags produced by EAF and LD converter were characterized and used as well as their impact on the primary steelmaking refining, as part of the cold load in the EAF.

Keywords: Reuse; Sustainability; Slag, EAF.

¹ *Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. pela UFF, Engenheiro Especialista, Gerência de Aciaria Elétrica, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

² *Técnico em Mecânica, Supervisor de Pátio de Sucatas, Gerência de Suporte Operacional, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

³ *Técnico em Metalurgia, Administrador, Especialista em Siderurgia, Gerência de Aciaria Elétrica, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁴ *Engenheiro de Produção pela UFF, Técnico de Desenvolvimento, Gerência de Aciaria Elétrica, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁵ *Graduando em Engenharia Metalúrgica pela UFC, Estagiário de Engenharia, Gerência de Aciaria Elétrica, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

⁶ *Engenheiro Mecânico, M.Sc. pelo IME, Gerente Geral de Produção de Aços Longos, Gerência Geral de Aços Longos, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Em uma operação de fusão no FEA os principais materiais que compõem a carga fria do cestão são sucatas, fundentes, e ferro-ligas, onde sucata e ferro-ligas são as matérias primas para o aço líquido, incorporando suas características a este, e os fundentes incorporam suas características a escória. No forno, também são usados gases, e ferro ligas, que conferem o refino primário ao aço, assim como definir as características da escória (basicidade, viscosidade). Partindo do exposto, os resultados da operação de fusão no FEA são aço líquido e escória, o primeiro se tratando de um produto e o segundo de um coproduto. Sabe-se que a escória tem um papel fundamental no processo de elaboração dos aços, como em suas funções de isolante térmico para o aço, reter óxidos ou compostos indesejáveis presentes nas matérias primas, reter compostos formados a partir de impurezas, reduzir o consumo de energia elétrica em FEA e evitar a entrada de gases atmosféricos. Ao fim de processo de fusão em FEA, a escória é retirada pelo lado oposto de vazamento (etapa de basculamento) onde é coletada em potes de escória ou em baia e levada para resfriamento ao ar. para posterior tratamento, pois na etapa de basculamento, um resíduo de aço também é passado pela porta, acarretando em perda metálica para o processo.



Fonte: Banco de dados CSN.

Figura 1. Basculamento de escória em baia.

Os objetivos gerais do trabalho são:

- Caracterizar a escória quanto ao seu teor metálico e teor de óxidos
- Analisar usando técnicas experimentais a composição dos óxidos;
- Calcular o balanço de massa de escória e metálico presente na escória.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a possibilidade de emprego no FEA;
- Adicionar gradativamente o material retrabalhado para avaliação dos indicadores;
- Calcular o custo financeiro de seu emprego.

As motivações para esse trabalho foram o ganho financeiro e o caráter sustentável do mesmo, haja vista que a aquisição da sucata reaproveitada de planta oriunda de escória é quase custo zero para a aciaria, já que é um material reaproveitado, e no caráter ambiental/sustentável, onde o resíduo inaproveitável que ocupava uma grande área, passou a ser classificado como coproduto e a fazer parte integrante do processo, não sendo mais usado em aterros de dejetos para o seu armazenamento.

1.1 Aciaria Elétrica

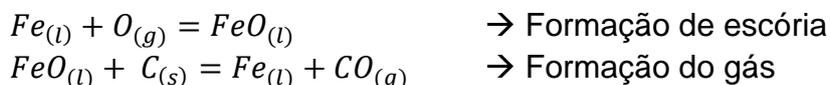
O FEA é um equipamento, sem sombra de dúvidas, mais versátil de produção de aço. Algumas vantagens que fazem a sua posição nessa classificação de uso são:

- Permite produzir praticamente qualquer tipo de aço em função do controle de aquecimento praticamente autônomo as reações químicas;
- Bastante variável quanto a carga, podendo a ser 100% sólida quanto comportar carga líquida, como gusa líquida;
- Se adequa a necessidade de produção, podendo ser modificado intermitentemente;
- Consegue atingir alta eficiência energética [1].

O FEA utiliza energia elétrica como sua principal fonte energética para a fusão/aquecimento do metal. O FEA basicamente é destinado a fundir a carga, onde o tempo de corrida (Tap-to-Tap) é necessariamente deve ser reduzido ao máximo, sem que o operacional seja comprometido. A operação de um FEA é basicamente dividida em:

- Carregamento do 1º Cestão
- Fusão
- Carregamento do 2º Cestão (se houver)
- Refino (desoxidação e desfosforarão)
- Formação da escória espumante
- Retirada de escória
- Vazamento do aço em Panela

O primeiro cestão em Fornos Elétricos tem como objetivo consolidar o primeiro banho metálico e é composto por sucata em diferentes camadas com diferentes comprimentos e densidades para garantia de uma rápida fusão com fácil penetração dos eletrodos e preenchimento de um grande volume útil no FEA. Ocorre então a fusão, onde são necessários aproximadamente de 10.000 a 12.000 kWh de potência. Após, ocorre o carregamento de um segundo cestão, totalizando a tonelagem visada na operação. Em alguns casos, mais de dois carregamentos podem ser feitos, assim como apenas um. Com o término da fusão do segundo carregamento, dar-se então a etapa de refino, onde são adicionados oxigênio a uma velocidade supersônica para garantir uma boa penetração no banho para formação de escória, junto a uma constante alimentação de combustível na escória formada, o combustível podendo ser grafite ou coque, para que se tenha a formação da emulsão, chamada de escória espumante, que é uma mistura de escória líquida com monóxido de carbono (CO). As reações entre o banho/oxigênio/escória/coque são:



A formação de gás dentro da escória faz com que ela espume, tendo basicamente as funções de:

- Cobrir o arco elétrico. Aumento a transferência de calor do arco para a carga;
- Reduz o desgaste de refratários;
- Proteção dos painéis refrigerados e abóboda do forno;
- Redução do consumo de eletrodos;
- Redução do ruído;

Após a formação da escória espumante, descarburagem e desfosforagem, há então a retirada da escória e após o vazamento do aço líquido pelo canal de vazamento para a panela [1].



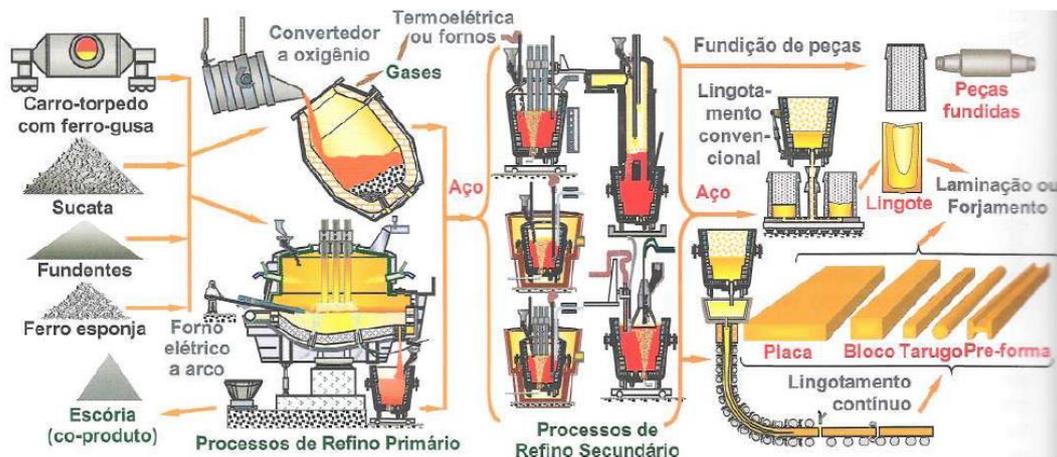
Fonte: Banco de dados CSN.

Figura 2. Vazamento do aço líquido para panela.

Com a etapa de fusão concluída, a panela de aço segue para o refino secundário, onde, junto a agitação com uso de gás inerte para homogeneização do banho receberá adições de ligas e fluxantes, para adequação da basicidade da escória de refino secundário, desoxidação e adições de ferro ligas afim de possibilitar sua composição para o grau de aço desejado.

Após o refino secundário pela metalurgia de panela, o aço já homogeneizado e tratado segue para o lingotamento, onde na maior parte da produção mundial de aços é, então, processado pelo método contínuo, o chamado lingotamento contínuo, onde o aço é transferido do fundo da panela para um equipamento revestido de refratário, chamado de distribuidor, com a finalidade de armazená-lo e distribuí-lo para ser solidificado em moldes de cobre refrigerados à água, onde, após a formação de uma “casca” sólida de espessura adequada, é resfriado por sucessivos sprays de água, em que todo o processo é feito contra a ação da gravidade, sendo devidamente guiado por uma série de rolos guia, até seu corte em comprimentos visados pela usina.

Na figura 3 é observado um fluxograma esquemático das etapas de refino do aço em usinas siderúrgicas [2].



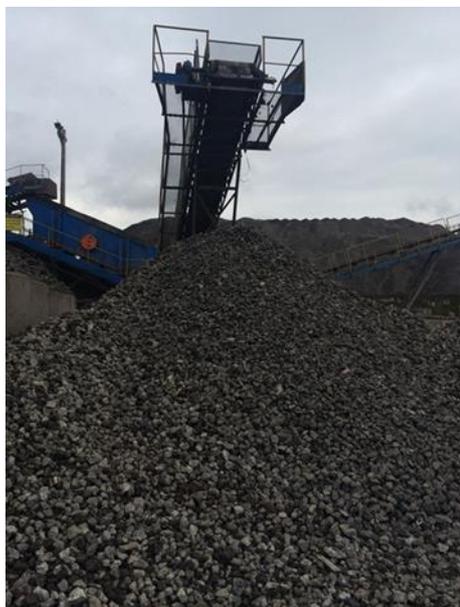
Fonte: Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco, Rizzo.

Figura 3. Fluxograma Aciaria LD e Elétrica.

1.2 Rota de Escória Reprocessada

Após a escória ser retirada via Slag Pot Carrier, ou via pá mecânica, está é conduzida até um local apropriado para seu resfriamento para posterior transporte para a planta de beneficiamento. Uma vez na planta de beneficiamento, a escória é tratada por técnicas de separação granulométrica mecânica e magnética, para justamente classifica-la quanto ao seu caráter dimensional e metálico. Na figura 4 pode ser observado um fluxograma básico de tratamento da escória a ser classificada como reaproveitada.

Sucata A



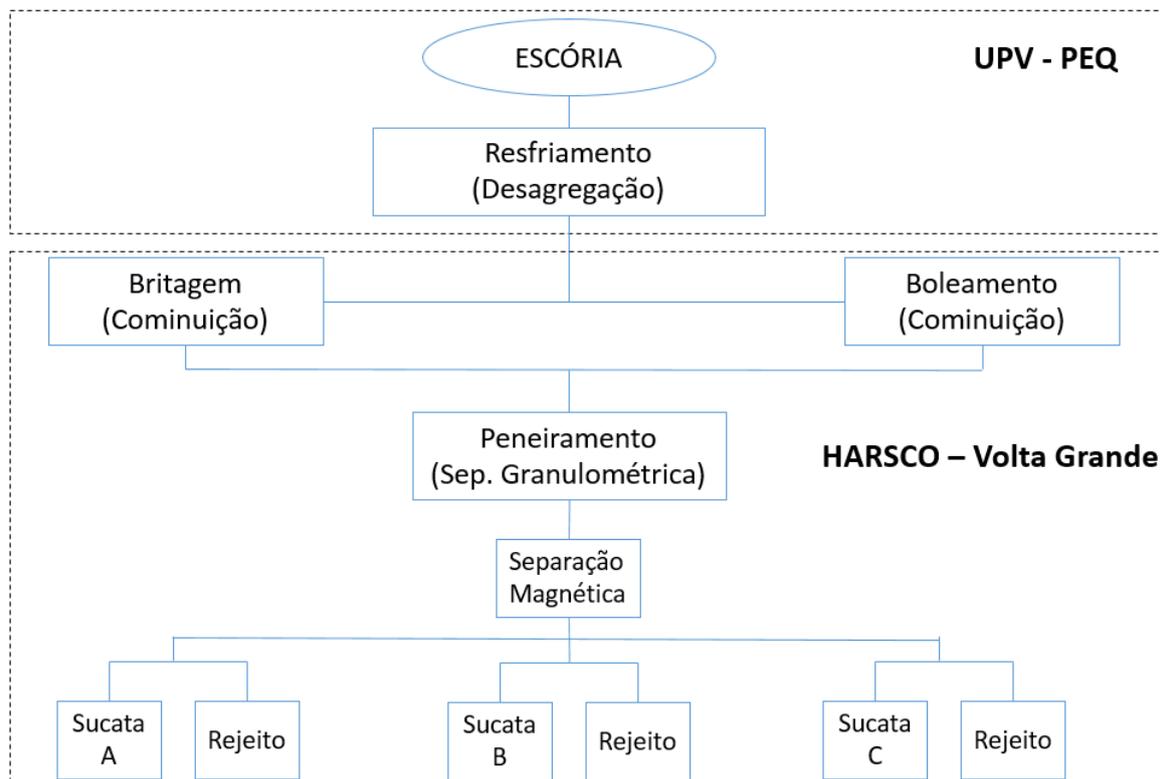
Sucata B



Sucata C



Fonte: Banco de dados CSN.
Figura 5. Sucatas beneficiadas.



Fonte: Banco de dados CSN.

Figura 4. Fluxograma do tratamento de escória.

Feita a separação, o material é segregado e classificado de acordo com seu teor metálico e dimensional, de acordo com a tabela 1 abaixo [2].

Tabela 1. Macro classificação do beneficiamento de escória. Fonte: Padrão de Especificação de Materiais CSN.

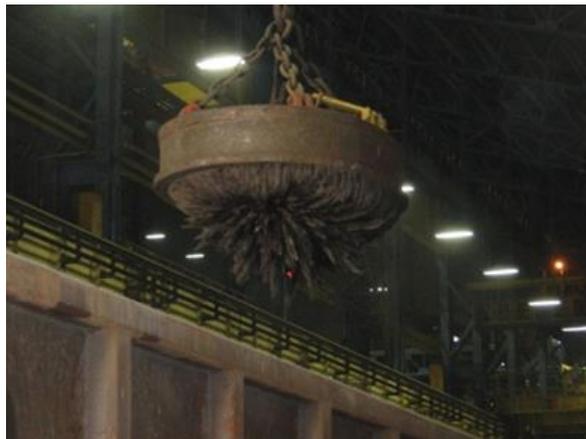
Sucata	Teor Metálico	Granulometria
A	90%	2 a 4 pol
B	75%	1 a 2 pol
C	60%	Menor 1 pol

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi dividido em análises das amostras *in natura* e amostras que passaram pelo processo de fusão em forno de indução, feito para verificação do rendimento metálico do material. Tal divisão foi feita visando obter o máximo de informações, já que ao fim de fusão das amostras de sucata, poderiam ser feitos outros testes para caracterização precisa do metálico intrínseco na sucata recuperada.

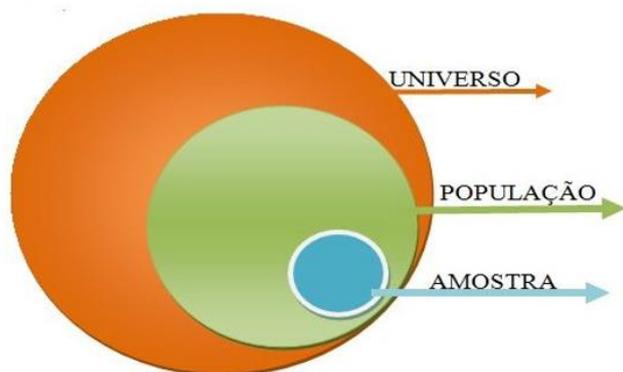
2.1 Amostragem

A amostragem do material foi feita retirando-se partes do mesmo de vagões da aciaria, tomando-se o devido cuidado para que a mesma fosse representativa, então foram retiradas amostras de diferentes partes do vagão.



Fonte: Banco de dados CSN.
Figura 6. Amostragem em vagão.

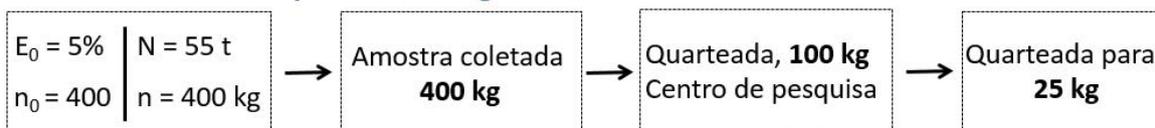
Amostragem



$$n = \frac{N \times n_0}{N + n_0}$$

$$n_0 = \frac{1}{E_0^2}$$

Os dados considerados para a amostragem foram:



Fonte: Banco de dados CSN.
Figura 7. Padrão de amostragem utilizado.

Com as amostras de cada sucata quarteadas e separadas, deu-se então a etapa de técnicas laboratoriais para análise [3].

2.2 Análises realizadas e preparação das amostras

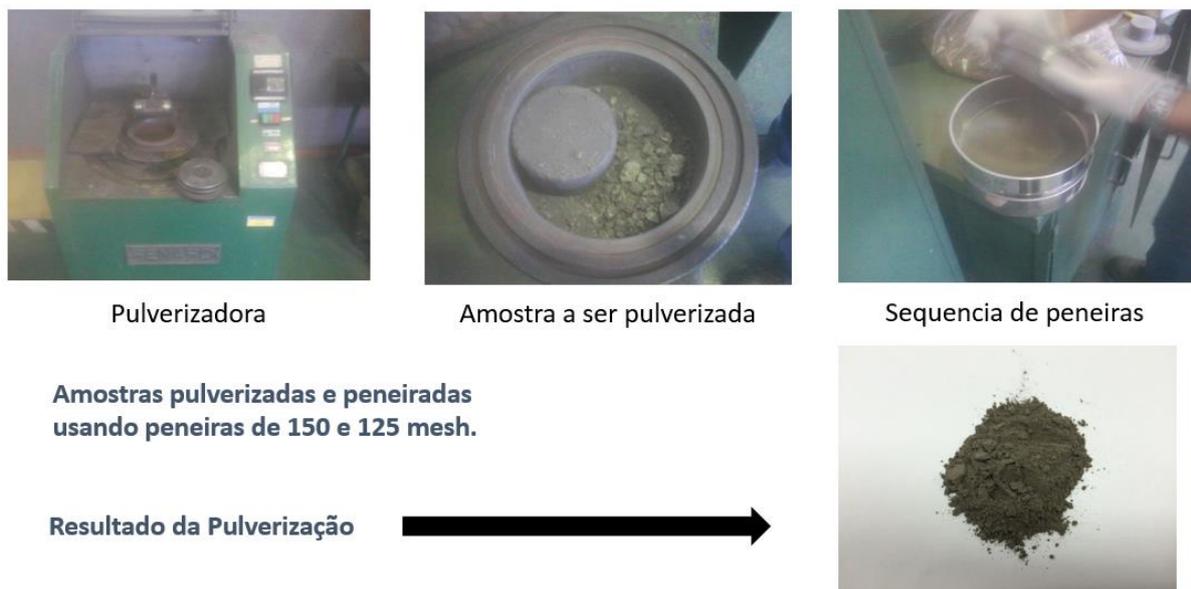
O conjunto de análises feitas com cada um dos 3 tipos de sucata estão resumidos na Figura 8 abaixo.

<p>✓ Análises feitas, amostras <i>in natura</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Análise Química via Úmida – Titulação - Microscopia Eletrônica de Varredura - Espectroscopia Mossbauer - Fusão das Sucatas 	<p>Composição Química</p> <p>Teor Elementar</p> <p>Caracterização</p> <p>Rendimento</p>
<p>✓ Análise feitas, amostras <i>após fusão</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Espectrometria Ótica - Balanço de massa - Rendimento de Fe - Difração de raios – X 	<p>Composição Química</p> <p>Rendimento Métálico</p> <p>Teor de Ferro</p> <p>Caracterização</p>

Figura 8. Análises Realizadas.

Na preparação das amostras *in natura* foi utilizada uma pulverizadora para se ter o agregado finamente dividido capaz de se submeter as análises propostas, como mostra a Figura 9 abaixo.

Cada sucata foi pulverizada para análise ***in natura***.



Fonte: Banco de dados CSN.
Figura 9. Resultado da preparação *in natura*.

Já para as análises de rendimento, o forno elétrico Tammann foi utilizado. Foram feitas fusões com cada uma das sucatas seguindo a amostragem mencionada. As Figuras 10 e 11 detalham o procedimento de fusão.

Forno Elétrico Tammann



Cadinho de grafite



Amostras de sucata

Cadinho carregado
posicionado

Forno Ligado



Fonte: Banco de dados CSN.

Figura 10. Procedimento de fusão em forno elétrico Tammann.



Nitrogênio usado



Metal fundido vazado



Metal resfriado



Metal obtido



Fonte: Banco de dados CSN.

Figura 11. Procedimento de fusão em forno elétrico Tammann.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir os resultados das análises realizadas serão divididos em amostras *in natura* e em após fusão. Um último tópico mostrando a adição gradativa em EAF e suas consequências (indicadores operacionais e financeiros) será abordado.

3.1 Resultados – amostras *in natura*

3.1.1 Caracterização via úmida

Os resultados obtidos com a análise via úmida das 3 sucatas estão representados na tabela 2 abaixo. As análises foram feitas em um espectrômetro de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente, fabricante Spectro, modelo Genesis.

Tabela 2. Resultados da análise via úmida.

Óxido/Elemento	Sucata A (%)	Sucata B (%)	Sucata C (%)
FeO	5,09	7,06	20,75
Fe ₂ O ₃	24,78	22,66	10,39
Óxidos de Fe Total	29,87	29,72	31,14
Fe dos óxidos	21,28	21,34	23,39
Fe Metálico (Fe ⁰)	9,88	4,468	1,336
<u>Fe Total</u>	<u>31,16</u>	<u>25,81</u>	<u>24,73</u>
Al	1,616	1,988	3,708
Mg	3,015	3,098	3,166
Mn	2,69	3,103	3,888

Os resultados mostram que há um maior teor de ferro total e Fe⁰ na sucata A concluindo que o seu caráter férrico é a maior dentre as três sucatas analisadas. Mas sabendo que o FEA não é um reator redutor, óxidos com valências Fe⁺² e Fe⁺³ não podem ser reduzidos, sendo então mais rentável o Fe⁰ este que pode ser fundido e incorporado ao aço líquido.

3.1.2 Caracterização por microscopia eletrônica de varredura

A análise *in natura* das amostras via EDS (Electron Diffraction Scattering) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) estão apresentadas na figura 13 e tabela 3 abaixo [4].

Tabela 3. Resultado do EDS da MEV.

Elemento	Sucata A (%wt)	Sucata B (%wt)	Sucata C (%wt)
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

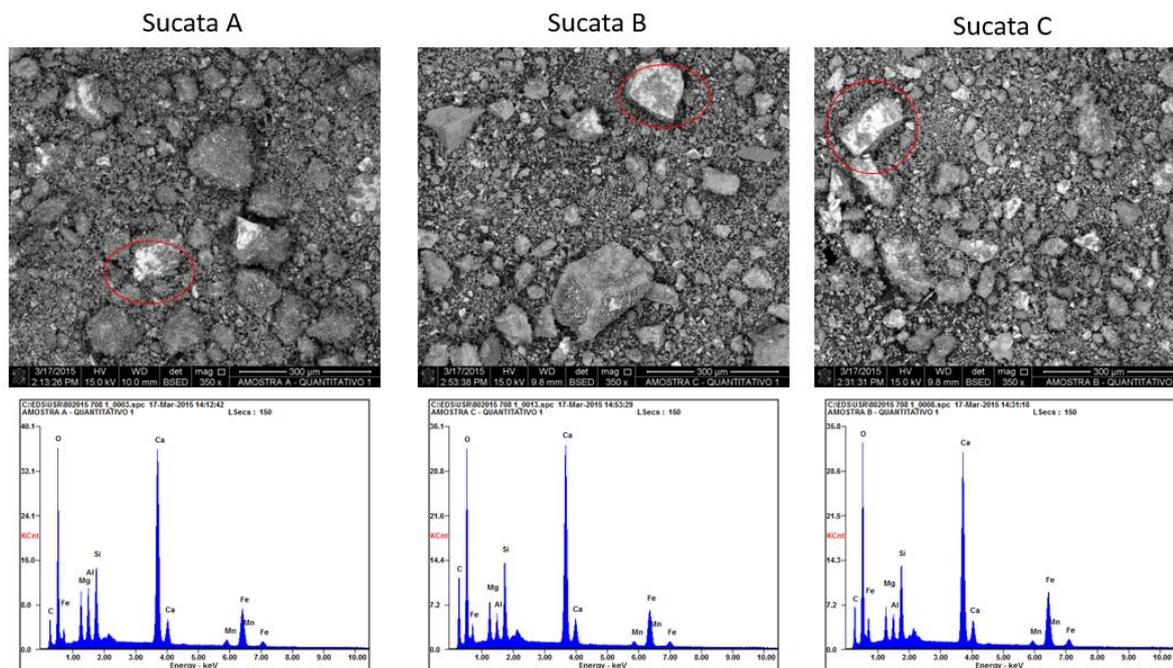


Figura 13. Resultado da análise em EDS.

Como o EDS não faz distinção entre óxidos, somente qualifica os elementos, está análise concluiu basicamente o teor de Fe em cada uma das sucatas, tendo resultados próximos aos encontrados via úmida.

3.1.3 Caracterização via Espectrometria Mossbauer

Foram feitas análises via espectrometria Mossbauer com a finalidade de identificar os óxidos presentes nas sucatas estudadas. Os resultados podem ser vistos na figura 14 abaixo [5].

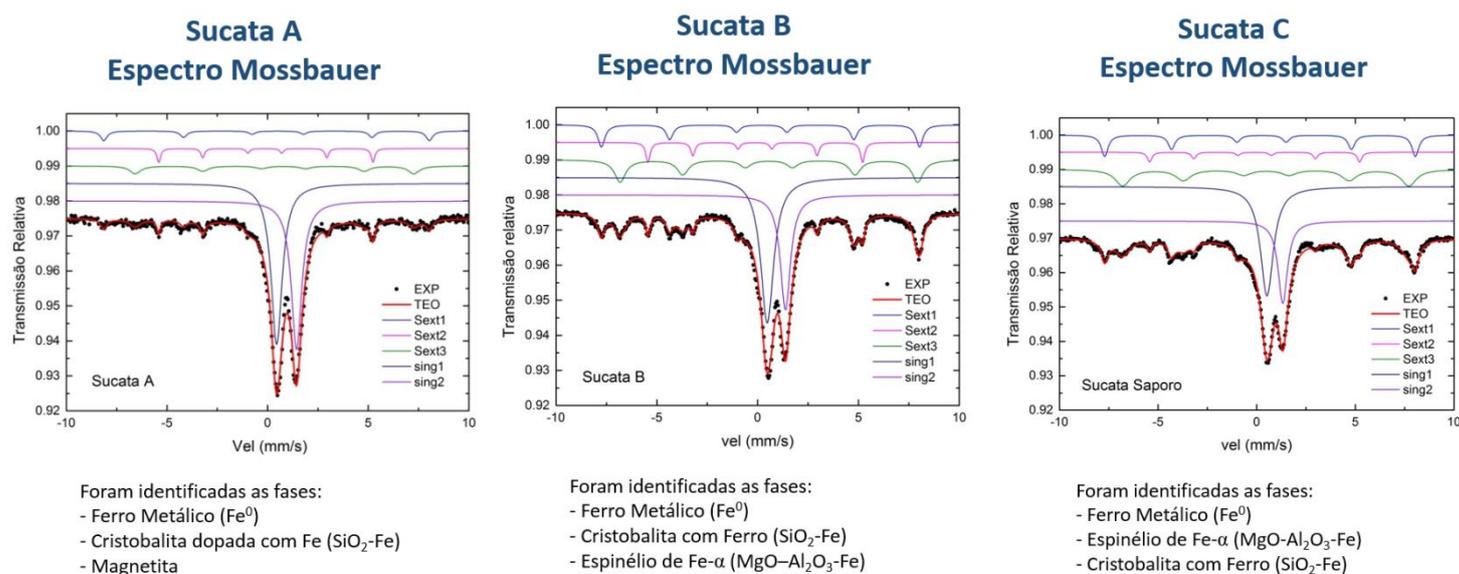


Figura 14. Espectros Mossbauer.

Os resultados dos espectros identificaram Fe^0 e cristobalita com Fe em todas as sucatas, sendo para a sucata A identificada a fase magnetita e para as sucatas B e C, encontrada a fase espinelizada com Fe. Tal fase com estrutura cristalina de espinélio é caracterizada pelo seu alto ponto de fusão, maior que $2000\text{ }^\circ\text{C}$, incompatível para o ambiente de fusão em FEA, onde as temperaturas chegam a $1800\text{ }^\circ\text{C}$ em casos extremos, tendo como consequência a falta de fusão de carga sólida, diminuindo o rendimento metálico do processo.

3.2 Resultados – amostras após fusão

3.2.1 Microscopia ótica das escórias após fusão

As amostras, após serem fundidas, obtiveram uma perfeita separação entre metálico/escória impregnada. Com isso, foram observadas gotas metálicas impregnadas na escória chamando a atenção para a ainda perda metálica após uma refusão do agregado reaproveitado. Imagens podem ser observadas na figura 15 abaixo [6].

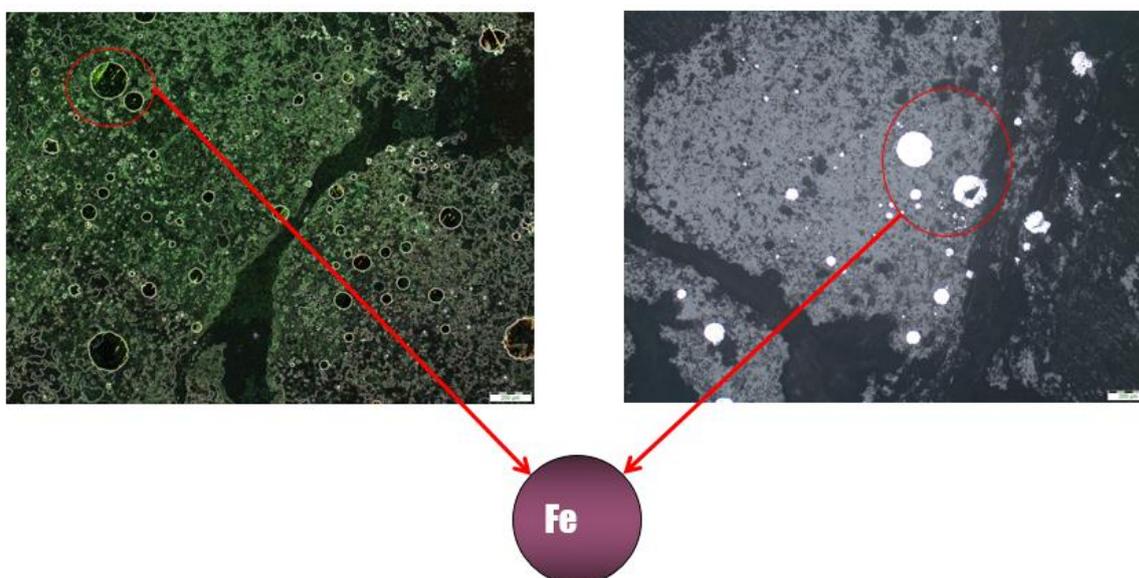


Figura 15. Gotas metálicas em escória refundida observadas em microscópio ótico.

3.2.2 Análise de Espectrometria Ótica

Com as sucatas fundidas, obtiveram-se amostras perfeitas para análises em espectrômetro para análise de composição química de cada sucata. Os resultados podem ser observados na tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Composição química das sucatas.

Sucata	Fe (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)	Cr (%)
A	95,30	0,12	0,57	0,00	0,09	0,02
B	92,49	0,00	0,59	0,00	0,03	0,01
C	94,06	0,00	0,46	0,02	0,02	0,12

Não foram observadas grandes variações nos elementos, exceto pelo **0,10 %**, aproximadamente, de % Cr na sucata C.

3.2.3 Rendimentos – metálico e férrico

Na tabela 5 abaixo, podem ser observadas as médias de rendimento metálico das amostras fundidas, que são a subtração entre a escória sobrenadante no banho metálico e o metálico propriamente dito.

Com o rendimento metálico e a composição química de cada sucata, foi possível calcular o rendimento férrico de cada sucata, exemplificado na tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Resumo comparativo dos rendimentos encontrados.

Sucata	Rendimento Metálico	Composição % Fe	Rendimento Férrico	Rendimento Teórico Inicial
A	77%	95%	<u>73%</u>	85%
B	70%	92%	<u>65%</u>	60%
C	62%	94%	<u>58%</u>	30%

Pode ser observado nos resultados que o rendimento inicial difere do resultado obtido através dos experimentos de fusão das sucatas. Haja vista a maior geração de escória e conseqüentemente uma redução do rendimento metálico, optou-se por adicionar somente a sucata com maior rendimento obtido, sucata A, para não brusca alteração dos parâmetros de processo e de produção da aciaria.

3.2.4 Emprego de sucata A no FEA

A variação de carga foi feita durante o período do ano de 2015 entre os meses de janeiro a setembro, onde foram contabilizadas as adições de sucata A por corrida. A figura 16 mostra uma variação de carga bem definida corrida a corrida, apresentando os períodos e a porcentagem de sucata A utilizada no FEA. Um total de aproximadamente 2000 corridas foram contabilizadas. Também foram observados alguns dos principais indicadores da aciaria, a fim de investigar possíveis variações em decorrência da adição gradual de sucata A.

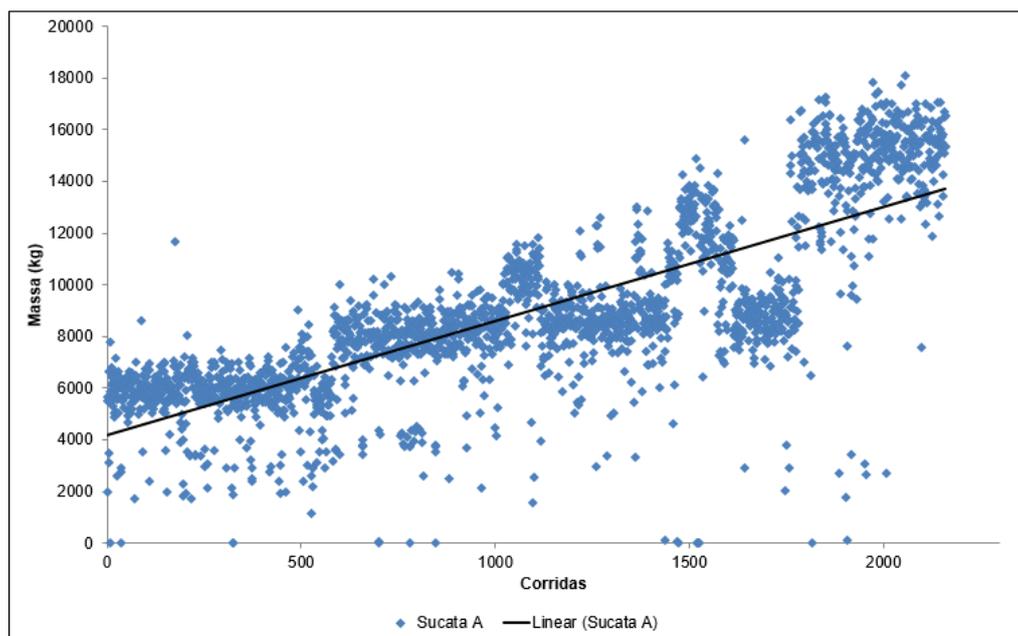


Figura 16. Variação de sucata A entre janeiro e setembro de 2015.

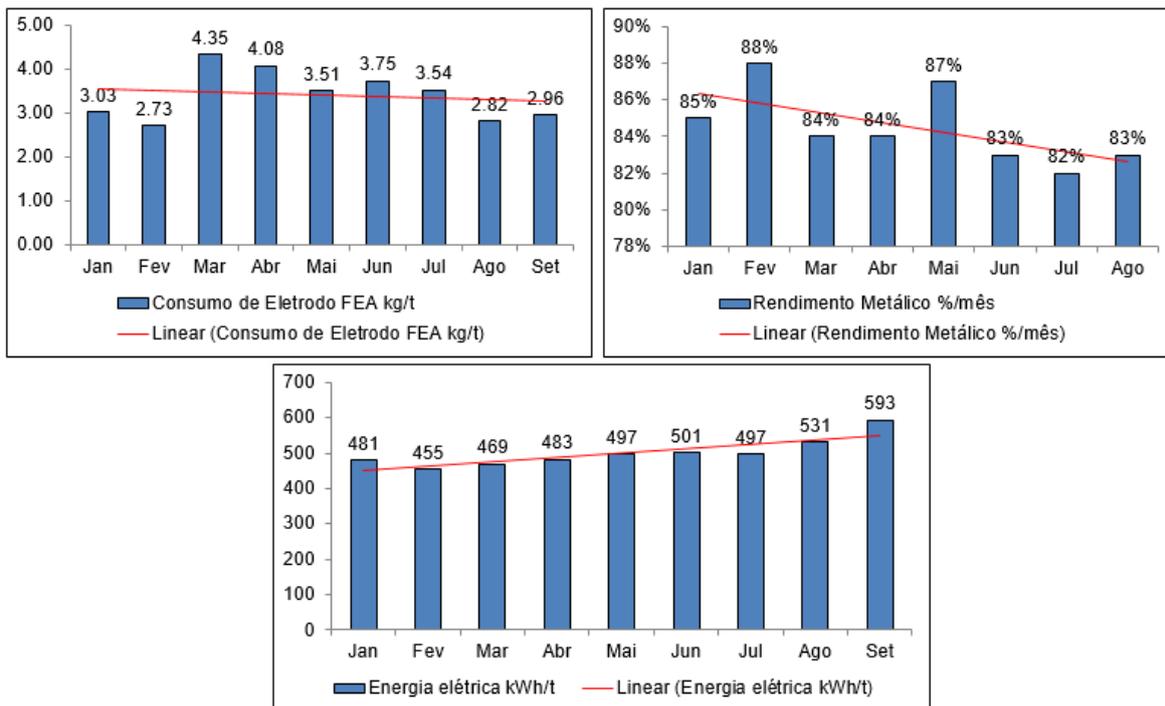


Figura 17. Resumo de consumo de eletrodos, rendimento metálico e energia elétrica.

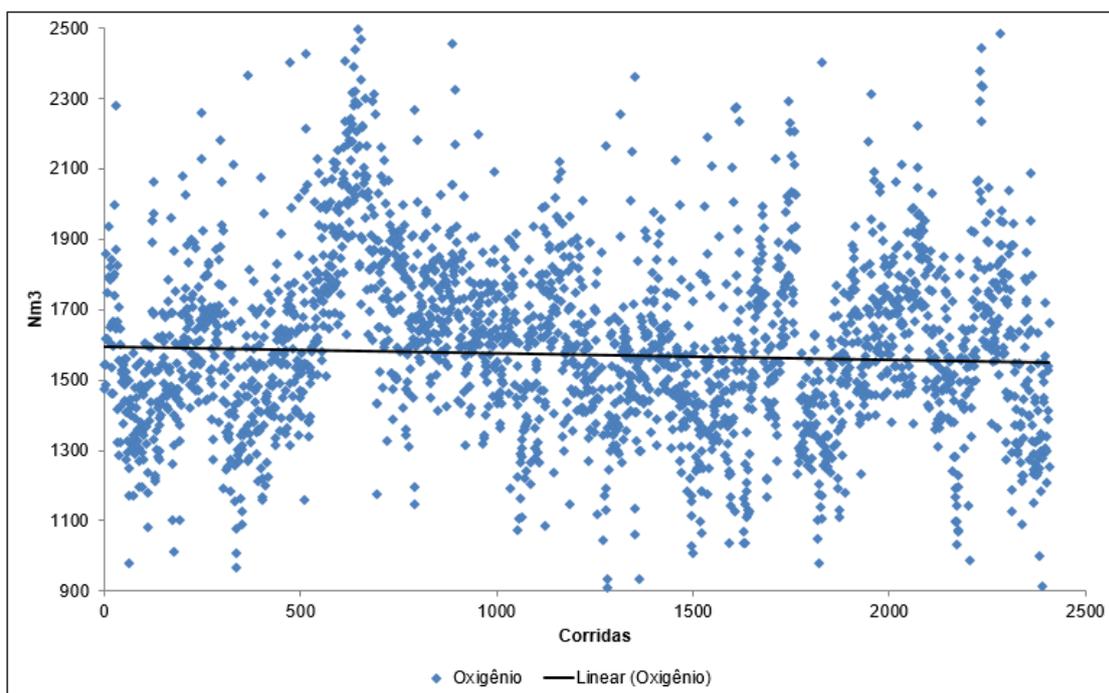


Figura 18. Variação do consumo de O₂ corrida a corrida.

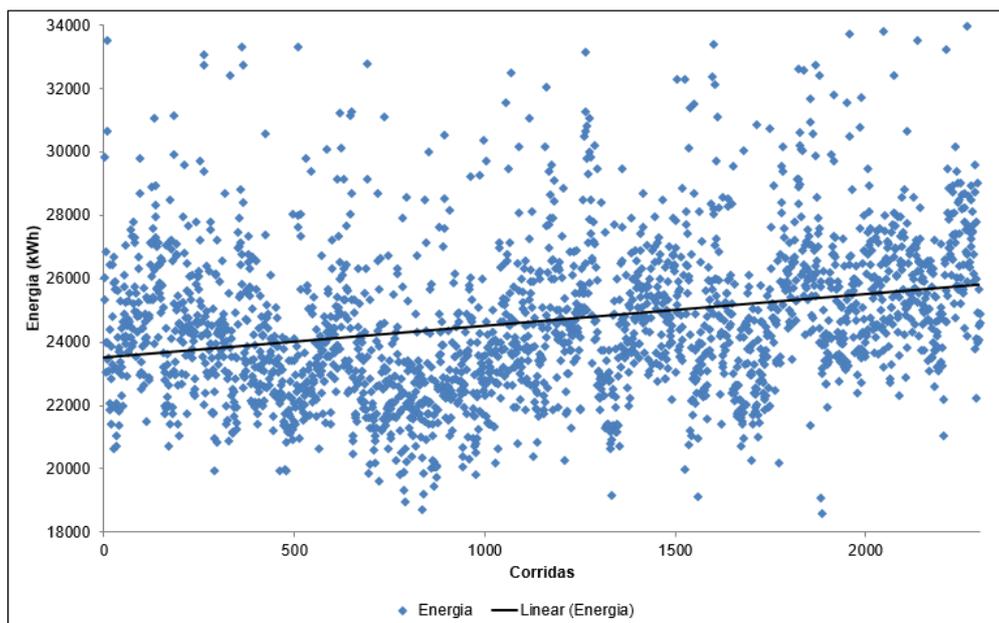


Figura 19.

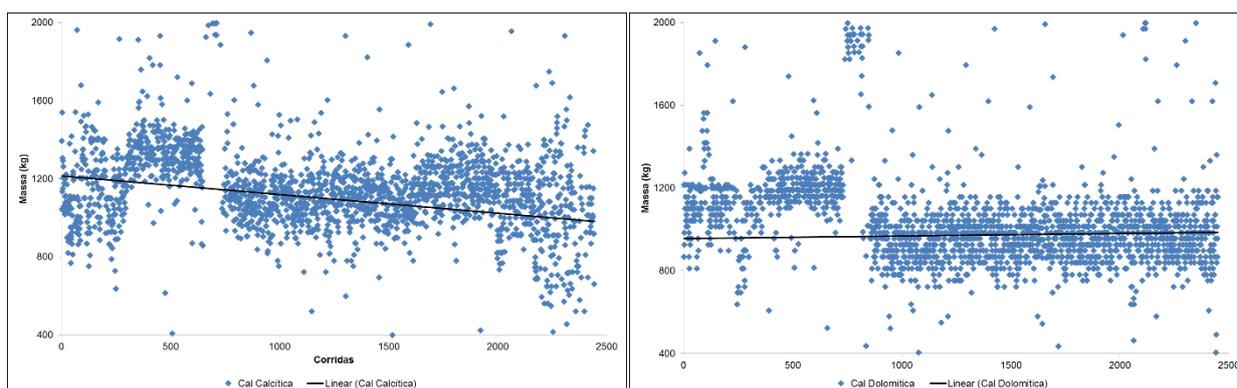


Figura 20. Variação do consumo de cales (calcítica e dolomítica) corrida a corrida.

Pode ser observado que:

- ➔ O consumo de energia elétrica aumentou devido as impurezas de alto ponto de fusão;
- ➔ O consumo de $O_2(g)$ não variou substancialmente.
- ➔ Consumo de cales não foi fortemente alterado.
- ➔ O consumo de eletrodos sofreu uma variação gradativa devida razões operacionais do que pela sucata A.
- ➔ O rendimento metálico teve variação nos períodos considerados.

4 CONCLUSÃO

As conclusões evidenciadas com o uso das técnicas experimentais de análise das sucatas foram:

- ➔ Os valores de rendimento iniciais fornecidos pela empresa encarregada de tratamento da escória proveniente de FEA e conversor LD diferem dos encontrados. Essa diferença encontrada serviu para uma melhor conclusão sobre o rendimento metálico final do processo, haja vista o resultado menor encontrado.
- ➔ Os óxidos encontrados pelas espectrometrias utilizadas para análises mostraram que fases de alto ponto de fusão estão intrínsecas nas sucatas recuperadas, havendo consequências diretas na operação de fusão, sendo a sucata A menos danosa com relação as fases refratárias.
- ➔ Mesmo com uma refusão das sucatas recuperadas, ainda restavam gotas metálicas impregnadas na escória, mostrando que o caráter de reaproveitamento ainda perdura mesmo com um refino posterior.

As conclusões sobre a adição de sucata recuperada A em processo no FEA foram:

- ➔ Houve um aumento substancial na energia elétrica usada na fusão das sucatas, mostrando que fases de alto ponto de fusão são encontradas mesmo na sucata A. Um trabalho de reciclagem adequado pode vir a ser interessante para se refinar a sucata, reduzindo o caráter quase que refratário de seus óxidos.
- ➔ Outros indicadores tais como consumo de oxigênio e cales, não apresentaram mudanças com a adição gradual de sucata. Já a redução do indicador consumo de eletrodo não pode ser atribuído a variação da carga de sucata A no forno, já que medidas operacionais de adequação foram feitas no mesmo período de testes.
- ➔ O retorno financeiro atribuído a sucata pela não compra no mercado externo é um fato que não pode ser ignorado, haja vista que o custo com o consumo de sucata parcela substancial no custo total de uma aciaria elétrica.
- ➔ O balanço de sustentabilidade ambiental do projeto foi notável, pois as reservas de sucata A foram praticamente esgotadas, e um produto que antes era visto como um coproduto não valorizado passou a ser parte integrante fundamental do processo para que a usina se mantenha competitiva no mercado.

Agradecimentos

As equipes de trabalho da aciaria, pátio de sucatas, centro de pesquisa CSN e a UFC pelo apoio na realização dos ensaios e coleta de amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 COSTA E SILVA, A. AND P.R. MCI, Aços e Ligas especiais. 3 ed. 2006, São Paulo: Blucher.
- 2 RIZZO, E. Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 3 MONTEGOMERY. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, 4 ed, LTC, 2007

- 4 MAGALHÃES, F. Síntese e Caracterização de Óxidos de Ferro e Compósitos para Aplicações no Tratamento Redox de Efluentes Aquosos, 2008. Tese de Doutorado, Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 5 PING WU, GUNNAR ERIKSSON, ARTHUR D. PELTON AND MILTON BLANDER. Prediction of Silicate of the Thermodynamic Properties and Phase Diagrams Systems Evaluation of the FeO-MgO-SiO₂ System, 1992. Department of Metallurgy and Materials Engineering. Ecole Polytechnique. P.O. Box 6079, Station A, Montreal, Quebec, Canada, H3C3A7. ISIJ International. Vol. 33 (1993), No. 1, pp. 26-35.
- 6 PRETORIUS, E.; OLTMANN, H. EAF Fundamentals. Process Technology Group - LWB. Jeremy Jones - Nupro Corporation.
- 7 AISI Manufacturing, Steel Industry Technology Roadmap, 2001.