

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DAS CAUSAS DA VARIABILIDADE DOS TEORES DE FEO DA
ESCÓRIA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO.

Jakson Mattiello

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2011

Dedico este trabalho aos meus pais, Claudino e Jurema, e aos meus irmãos Eliane, Márcio e Marciliane por sempre terem acreditado em meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudino e Jurema, pelos ensinamentos e incentivo em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Eliane, Márcio e Marciliane pelo exemplo e por todo o apoio oferecido.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pelo estímulo e orientação.

A minha namorada Márcia por sempre ter acreditado em minha capacidade.

Aos colegas de trabalho Alexandre Libório John, Daniel Rossi, Cleber Silveira da Silva, Rafael Scheer e Kevin Cuchinski Campos pelo companheirismo e ajuda durante a realização do trabalho.

Ao engenheiro Tiago Alliatti Beleza por possibilitar a realização deste estudo.

Aos professores Eduardo Osório e Antonio Cezar Faria Vilela pelos ensinamentos e orientações durante o curso.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Siderurgia pela ajuda e convivência durante a graduação.

Aos colegas de graduação pela ajuda e amizade durante o curso.

A todos os meus amigos, pela ajuda nas horas de dificuldade e pelos bons momentos compartilhados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Principais Rotas de Produção do Aço.....	2
2.2. Aciaria Elétrica.....	3
2.2.1. Pátio de Sucatas	3
2.2.2. O Forno Elétrico a Arco (FEA)	5
2.2.3. Refino Secundário.....	7
2.2.4. Lingotamento Contínuo	8
2.3. Variabilidade do FeO da Escória.....	9
2.3.1. Escórias	10
2.3.2. Influência da Oxidação da Carga Metálica no FeO da Escória.....	10
2.3.3. Influencia da Injeção de Oxigênio e Carbono sobre o FeO da Escória	11
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	14
3.1. Estudo dos Fatores que Afetam o FeO da Escória	14
3.2. Avaliação da Oxidação da Sucata Shredder	16
3.2.1. Amostragem	16
3.2.2. Pesagem e Catalogação das Amostras	16
3.2.3. Retirada de Impurezas.....	17
3.2.4. Retirada dos Óxidos.....	18
3.2.5. Cálculo do Percentual de Impurezas e Óxidos	18
3.3. Evolução da Oxidação Durante o Refino	18
3.3.1. Retirada das Amostras	19
3.3.2. Análise das Amostras de Escória.....	20
3.3.3. Moagem da amostra.....	20
3.3.4. Peneiramento	21

3.3.5.	Retirada do Ferro Metálico	21
3.3.6.	Pesagem.....	22
3.3.7.	Compactação	22
3.3.8.	Análise de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X.....	23
3.4.	Análise do Aço no Decorrer do Refino	24
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1.	Avaliação da Sucata Shredder.....	26
4.1.1.	Análise Visual da Sucata Shredder nas Baias de Preparação do Cestão	26
4.1.2.	Oxidação da Sucata Shredder.....	28
4.2.	Variação do FeO durante o Refino.....	31
4.2.1.	Avaliação do FeO da Escória Durante o Refino.....	31
4.2.2.	Análise Detalhada dos Parâmetros de Injeção no FEA	33
5.	CONCLUSÕES	38
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
7.	REFERÊNCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1	Linhas de Produção de Aço - Fonte: Gerdau 2008.....	2
Figura 2. 2	Esquema de um forno elétrico a arco.....	5
Figura 2. 3	Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense.....	6
Figura 2. 4	Forno modelo convencional e EBT - Fonte: Adaptado Operação de Forno Elétrico a Arco.	7
Figura 2. 5	Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC	8
Figura 2. 6	Esquema de solidificação de aço no molde.....	9
Figura 3. 1	Diagrama de causa e efeito.....	15
Figura 3. 2	Coleta das amostras de Shredder.	16
Figura 3. 3	Pesagem das Amostras.....	17
Figura 3. 4	Limpeza das amostras com ar comprimido.....	17
Figura 3. 5	Jateamento com esferas de vidro.	18
Figura 3. 6	Extremidade do cartucho para retirada de amostra de aço.....	19
Figura 3. 7	Escória aderida a vara instantes após a retirada.	20
Figura 3. 8	Recipiente do moinho.	21
Figura 3. 9	Peneira de 200 Mesh.....	21
Figura 3. 10	Retirada de ferro metálico.	22
Figura 3. 11	Pesagem da amostra.....	22
Figura 3. 12	Compactação da amostra de escória.....	23

Figura 3. 13	Espectrômetro de fluorescência de raios-X.....	23
Figura 3. 14	Amostra de aço após preparação e análise.....	24
Figura 3. 15	Representação esquemática de um espectrômetro.....	25
Figura 4. 2	Sucata Shredder de boa qualidade.....	26
Figura 4. 3	Sucata Shredder de qualidade intermediária.....	27
Figura 4. 4	Sucata Shredder com alta quantidade de impurezas.....	27
Figura 4. 5	Sucata Shredder armazenada em local coberto (Amostra A).....	28
Figura 4. 6	Sucata Shredder armazenada em local aberto (Amostra B).....	29
Figura 4. 7	Gráfico da evolução da oxidação do Shredder.....	30
Figura 4. 8	Diferença do percentual de oxidação das amostras.....	31
Figura 4. 9	Variação do FeO durante o refino no FEA 2.....	32
Figura 4. 10	Variação do FeO durante o refino no FEA 3.....	32
Figura 4. 11	(a) Injetora supersônica e Cojet (b) Injetor Cojet	33
Figura 4. 12	Gráfico da corrida 01.....	34
Figura 4. 13	Gráfico da corrida 02.....	35
Figura 4. 14	Gráfico da corrida 03.....	35
Figura 4. 15	Gráfico da corrida 04.....	36
Figura 4. 16	FeO das corridas analisadas.....	37

RESUMO

Durante o refino primário do aço alguns elementos indesejáveis como Si e P são retirados do banho através de sua oxidação. Essa oxidação se dá por meio da injeção de O_2 no forno. Os óxidos formados possuem menor densidade que o banho e sobem para a escória através da qual são retirados. Este certamente é um fator positivo do refino primário, entretanto juntamente com a oxidação destes elementos, ocorre a oxidação do ferro o qual também vai para a escória e é retirado sob a forma de FeO.

Sabe-se que uma certa quantidade de FeO na escória é benéfica, já que o mesmo favorece a fixação do fósforo, além de participar das reações envolvidas com a espumação. Entretanto, altos níveis de FeO significam perda de ferro através da escória o que é um fator impactante para o rendimento metálico dos fornos elétricos a arco.

Analisando o histórico dos teores de FeO da escória, através de amostras retiradas periodicamente, notou-se uma grande variabilidade entre as corridas e a possibilidade de ganhos através de sua estabilização.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi identificar as principais causas da variabilidade dos teores de FeO da escória buscando reduzi-las.

Após um estudo detalhado, foi possível identificar que a qualidade da sucata juntamente com o controle os parâmetros de injeção de oxigênio são os fatores que causam maior impacto sobre a variabilidade do percentual do FeO da escória.

ABSTRACT

As the refine goes on, some elements like P and Si are excluded of the iron bath by their oxidation. This oxidation is due the O₂ injection in the electric furnace. The oxides have lower density compared to the melted iron, and they float to the slag, where they are taken off. This fact is essential to the primary refine, but together with the oxidation of the undesired elements and impurities, it happens the unwanted iron oxidation. This oxide (FeO), as well as the others, goes up in the iron bath to the slag, that will be taken off before pouring.

It is known that a certain amount of FeO in the slag is important to promote the P fixation and to the slag foam formation. Therefore, high FeO quantities mean that iron is being wasted in the slag, which is an impacting factor to the rendimiento metálico of the electric arc furnaces.

Analyzing the slag's FeO proportion, by periodically taking slag samples, it was noticed a large variability between the corridas as well as the economic possibilities in stabilizing the slag.

In this scenario, the objective of this work was to identify the main reasons of the FeO variability in the slag, always trying to reduce the FeO amount in the slag.

After a careful research, it was possible to identify that the scrap quality together with controlling the O₂ injection are the main causes of FeO variability in the slag.

1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos materiais mais utilizados no mundo e por ser um produto pertencente à classe de commodities, seu preço normalmente é determinado pelo mercado e, dessa forma, cabe as empresas atuar internamente para reduzir ao máximo seus custos de produção.

Dentre as formas que as empresas têm buscado para aumentar seus lucros pode-se citar, como fatores principais, o aumento da produtividade e a redução de perdas. Ambos os fatores passam pela otimização dos processos, ou seja, para que a empresa seja competitiva ela deve estar continuamente buscando utilizar da melhor forma possível seus recursos.

Sabe-se que aproximadamente 70% do custo de produção do aço, em usinas semi-integradas provém da aciaria, assim pequenas modificações no sentido de se evitar perdas no processo podem representar ganhos consideráveis para a empresa.

Um importante indicador da eficiência de uma aciaria é o rendimento metálico, valor dado pelo cálculo da massa de produtos lingotados de boa qualidade dividido pela massa de sucata, gusa, e ligas utilizadas na sua produção. Dentre os vários fatores que afetam o rendimento metálico encontra-se a perda de ferro para a escória sob a forma de FeO.

Após realizar uma análise histórica das corridas produzidas nos fornos elétricos a arco da Gerdau Riograndense identificou-se uma grande variabilidade dos % de FeO da escória e iniciou-se uma investigação acerca dos fatores responsáveis por tal variação.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi identificar os principais motivos da variação do %FeO da escória e fazer um estudo mais detalhado das causas responsáveis por maior impacto sobre este resultado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Principais Rotas de Produção do Aço

Existem, atualmente, duas rotas principais para a produção de aço diferenciadas pela matéria-prima utilizada, conforme pode ser visto na figura 2.1:

- Partindo do minério de ferro;
- Partindo da sucata ferrosa.

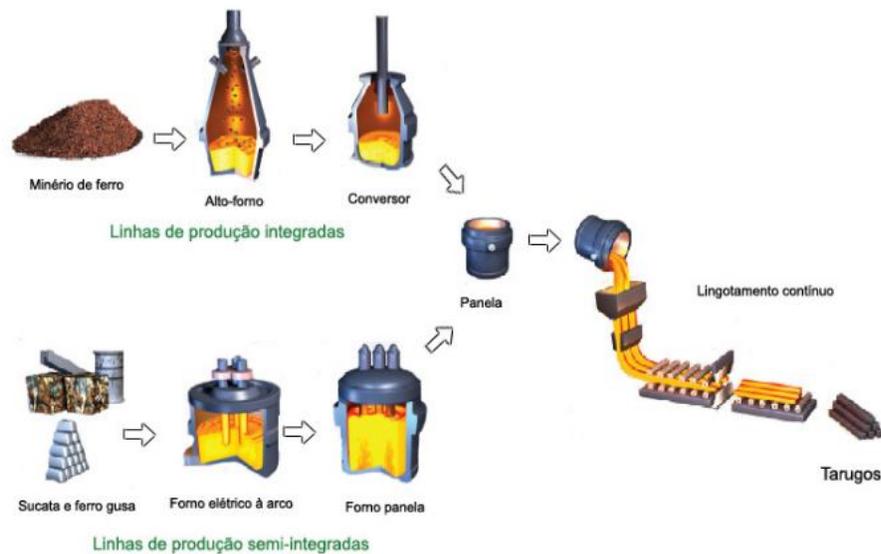


Figura 2. 1 Linhas de Produção de Aço - Fonte: Gerdau 2008.

Na figura 2.1, fluxo superior, está demonstrada a produção do aço em uma usina integrada, que tem como base o minério de ferro e como principais reatores o Alto-Forno (AF) e o conversor. No Alto-forno o minério de ferro, após a devida preparação, é carregado juntamente com o coque e passa pelas etapas de redução e fusão, dando origem ao ferro-gusa, (ferro com teores de carbono entre 4 e 5%). Após ser vazado do AF o ferro-gusa é levado ao conversor da aciaria onde passa pela etapa de refino oxidante, produzindo o aço.

No fluxo inferior está ilustrada a produção de aço em uma usina semi-integrada,

que tem como matéria prima a sucata e o ferro-gusa sólido e como reatores o forno elétrico a arco (FEA) e o forno-panela, os quais serão estudados mais detalhadamente nos itens abaixo.

Em ambas as rotas, após o refino, o aço é conduzido ao lingotamento onde é solidificado dando origem a um produto semi-acabado como tarugos, lingotes entre outros os quais serão beneficiados, podendo dar origem a uma vasta gama de produtos, laminados trefilados e forjados.

2.2. Aciaria Elétrica

Uma aciaria elétrica é o local onde se produz aços a partir da fusão de sucata metálica, ferro-gusa sólido ou líquido, ferro esponja em um forno denominado forno elétrico a arco.

O processo de produção de aço em aciarias elétricas é dividido em três etapas principais:

Refino primário (oxidante); nesta etapa é realizada a fusão da carga metálica, retirada de elementos como o C, Si, P, Al, Mn e ajustado o % C e temperatura de vazamento. Além disso, é realizada a adição de elementos de liga (ferroligas) no momento do vazamento do aço.

Refino Secundário: acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento.

Lingotamento do aço: processo pelo qual o aço líquido é solidificado em um produto semi-acabado.

2.2.1. Pátio de Sucatas

A produção do aço em uma aciaria elétrica inicia no pátio de sucatas local onde a sucata é recebida dos fornecedores, separada por tipo, dependendo da necessidade processada e armazenada.

Segundo a NBR 8746 a sucata pode ser classificada em três categorias principais:

1. Interna: gerada pela própria usina, constituída de cascões de panela, lingotes curtos, derramamentos de aço, pontas cortadas na tesoura de lingotes, de placas ou de tarugos, recostes da linha de acabamento, etc.
2. De processamento: proveniente da transformação do aço em produto acabado: restos de estamparia, retalhos de chapa, etc.
3. De obsolescência: comumente chamada de “ferro velho” que corresponde ao aço consumido em uma região 15 a 20 anos depois.

O processamento da sucata ferrosa tem como finalidade retirar impurezas, reduzir seu tamanho e aumentar sua densidade, buscando diminuir a entrada de elementos nocivos ao aço (Cu, Sn, S, P) e aumentar a produtividade do forno.

Os principais métodos utilizados no processamento da sucata são os seguintes:

- Prensa tesoura – Prensa a sucata, e em seguida, através de uma tesoura tipo guilhotina corta a sucata. Em alguns casos esta sucata é transferida para um sistema vibratório para remover terra ou qualquer outro tipo de impureza.
- *Shredder* – Equipamento composto por moinho de martelos e grelhas, que promovem além da retirada de material orgânico e terra, a retirada de material não metálico como o alumínio, cobre etc.
- Prensa pacote – Prensa responsável por gerar pacotes de sucata, geralmente utilizado em embalagens metálicas (latas de alimentos descartadas).
- Oxicorte – Equipamento utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões como navios, blocos de máquinas industriais, engrenagens de grandes dimensões, etc.

Além da sucata, utiliza-se no forno ferro-gusa ou ferro-esponja conforme a disponibilidade da usina e custo das matérias primas.

Após o processamento da sucata a mesma é carregada no cestão juntamente com outros insumos como a cal calcítica, cal dolomítica e em alguns casos carburante. Dentro do cestão a carga é distribuída criteriosamente a fim de evitar danos ao interior do forno no descarregamento e melhorar o desempenho do mesmo. Uma vez que o cestão está pronto, ele é transportado para o interior da aciaria e abastece o forno elétrico.

2.2.2. O Forno Elétrico a Arco (FEA)

Em 1878, Wilhelm Siemens, fundiu aço em um pequeno cadinho pela primeira vez utilizando um arco voltaico em um forno que já possuía um sistema de auto regulação do eletrodo. Em 1888, Paul Louis Toussaint Héroult obteve a primeira patente para um forno elétrico a arco (ARAÚJO 1997).

Originalmente, o FEA era somente uma unidade de fusão para reciclar sucata de aço, hoje devido a numerosas modificações ele tem se tornado um reator elétrico e químico(MOURÃO 2007).

Pela possibilidade de controlar a temperatura do banho e as condições de oxidação e de redução da escória, logo se reconheceu as vantagens de utilização do FEA para a produção de aços de qualidade, sendo que hoje o seu campo de aplicação estendeu-se também a aços menos nobres. Atualmente, com o desenvolvimento das mini-usinas o FEA é responsável por mais de 30% da produção mundial de aço (ARAÚJO 1997).

O forno elétrico a arco é composto basicamente por uma carcaça metálica revestida por material refratário e painéis refrigerados conforme pode-se verificar na figura 2.2. Esta carcaça é coberta pela abóbada, através da qual descem os eletrodos de grafita, que são condutores de eletricidade responsáveis pela formação do arco elétrico e pela transferência de energia para a sucata a fim de promover a fusão (LIBÓRIO 2009).

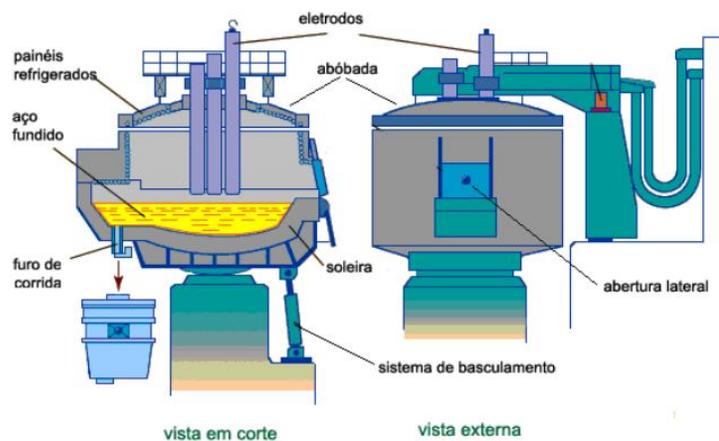


Figura 2. 2 Esquema de um forno elétrico a arco - Fonte: Enciclopédia Britânica.

Além da abertura superior para o carregamento do forno o FEA possui duas

aberturas principais, a porta de escória, abertura lateral, por onde é realizada a retirada da escória, injetado oxigênio e carburante, coletado amostras de aço e verificada a temperatura do banho e a bica de vazamento por onde é vazado o aço do interior do forno.

A operação do forno elétrico a arco pode ser subdividida em quatro etapas principais: carregamento, fusão, refino oxidante e vazamento.

O carregamento é realizado com a subida dos eletrodos e abertura da abóbada e normalmente é realizado mais que um carregamento por corrida como está demonstrado na figura 2.3.

A fusão da carga é realizada por meio do arco elétrico formado entre os eletrodos e a sucata e pela energia química fornecida pelos injetores, principalmente em regiões não cobertas pelo arco elétrico (pontos frios).

No refino oxidante, são injetados oxigênio, para o fornecimento de energia química e ajuste da composição, e material carbonoso (usualmente coque de petróleo), para a formação da escória espumante que será retirada do forno antes do vazamento do aço. As principais funções da escória espumante são: proteção do arco elétrico; proteção do banho contra a atmosfera e diminuição de perdas térmicas no forno (VILELA, 2008).

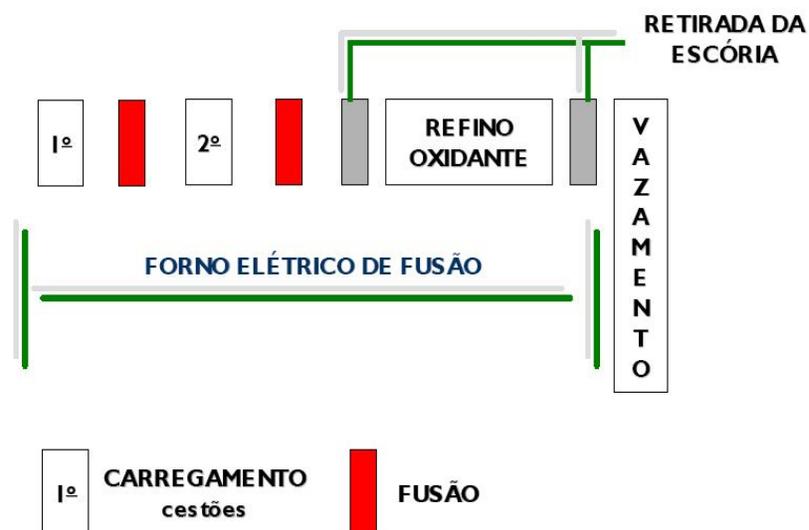


Figura 2.3 Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense - Fonte: Adaptado VILELA (2005).

Em relação ao sistema de vazamento existem dois tipos principais de fornos, com bica convencional e bica, ou furo EBT. Nos fornos com bica convencional o aço é retirado por uma bica lateral enquanto que nos fornos EBT, como é o caso dos fornos da Siderúrgica Riograndense, o aço é vazado por uma bica excêntrica, posicionada na parte inferior do forno.

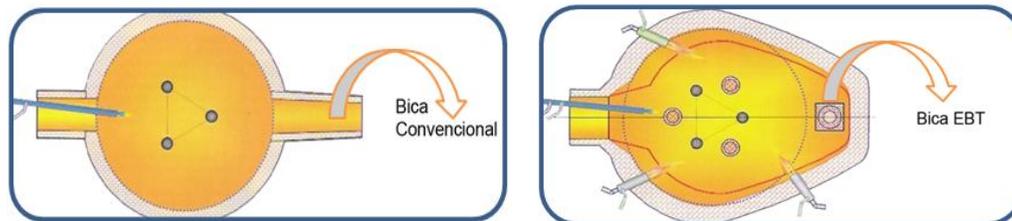


Figura 2. 4 Forno modelo convencional e EBT - Fonte: Adaptado Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007).

Após ser vazado o aço é encaminhado ao forno-panela onde é realizado o refino secundário.

2.2.3. Refino Secundário

Chama-se refino secundário aquele que é realizado fora do equipamento de fabricação do aço bruto (Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio)(MOURÃO 2007).

Pela dificuldade de retirar certas impurezas no equipamento de fabricação do aço bruto, atualmente grande parte das usinas siderúrgicas utiliza a técnica de metalurgia da panela, já que as reações metalúrgicas ocorrem na própria panela onde o aço é vazado.

Os principais processos de refino realizados no Forno-Panela são:

- Dessulfuração;
- Desoxidação;
- Desgaseificação (retirada de hidrogênio e nitrogênio).

Além disso, no Forno-Panela, pode ser realizado o ajuste da composição química e temperatura do aço e alteração da morfologia de inclusões.

Após ser finalizado o refino secundário, o aço está pronto para ser encaminhado ao lingotamento contínuo onde será solidificado.

2.2.4. Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo (LC) dos aços é o último estágio em aciaria onde se trabalha com o metal ainda no estado líquido. Tem como missão solidificar o aço em uma forma desejável de tal maneira que possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva (MOURÃO 2007).

Depois de completado o trabalho de refino secundário no forno, a corrida é vazada em uma panela dotada de válvula e um sistema de movimentação do tampão, ou mais modernamente válvula gaveta e transportada ao LC (Araujo 1997). Na máquina de lingotamento a panela é posicionada sobre o distribuidor, que se trata de um recipiente formado por uma carcaça metálica revestida por refratários e tem como funções principais armazenar o aço líquido entre a panela e os moldes e alimentar os veios como está demonstrado na figura 2.5.

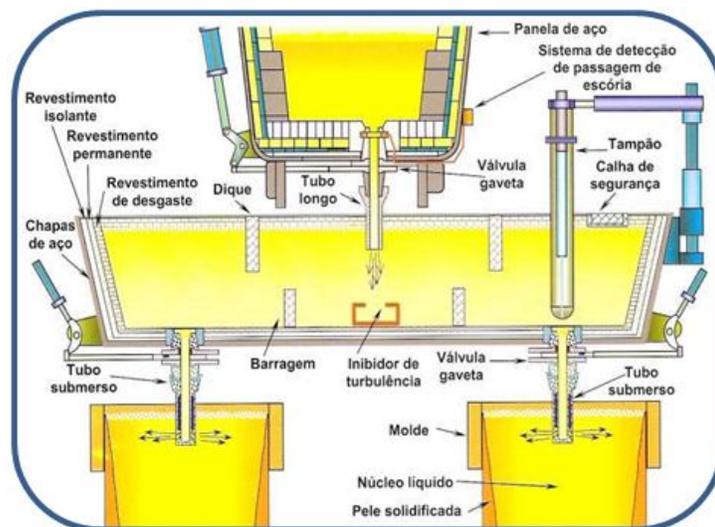


Figura 2.5 Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC - Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006.

O Aço do distribuidor é vazado pelos veios para o molde (figura 2.6), que é considerado a parte mais importante do lingotamento contínuo. Nele, ocorre o início da solidificação do aço líquido e é no molde que se definirá o perfil do produto (MOURÃO

2007).

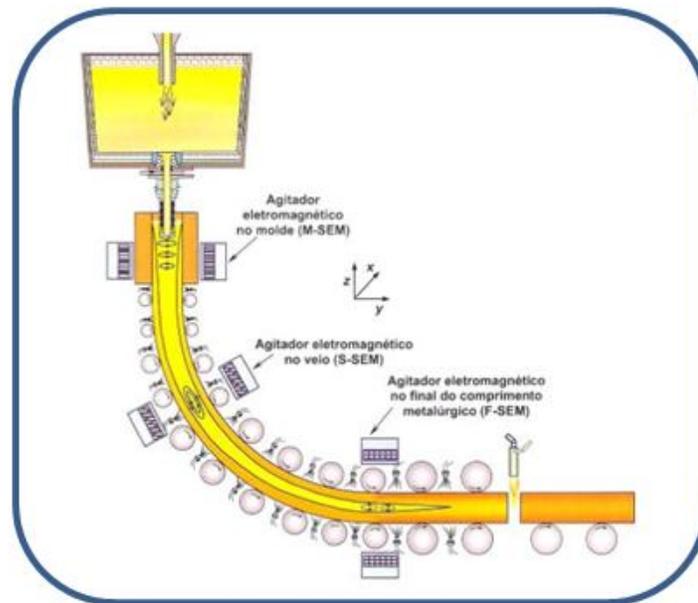


Figura 2.6 Esquema de solidificação de aço no molde. Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006

Como pode ser visualizado na figura 2.6, abaixo do molde as máquinas de lingotamento possuem um sistema de rolos os quais tem por função suportar o peso do tarugo e conduzi-lo para fora da máquina, dando lugar ao novo aço que entra no molde.

Após passar pelos rolos, o tarugo é cortado na dimensão especificada e está pronto para ser encaminhado ao beneficiamento interno ou ao cliente externo.

2.3. Variabilidade do FeO da Escória

Em uma aciaria elétrica o FeO é normalmente o segundo maior constituinte da escória e sua presença em teores controlados tem funções benéficas como o auxílio na desfosforação por exemplo. Entretanto, se os níveis de FeO da escória forem muito altos o mesmo torna-se prejudicial, além de representar uma perda metálica ao processo.

No processo de produção do aço em forno elétrico a arco pode-se elencar três fatores que tem grande influência sobre o FeO da escória:

1. Percentual de óxidos carregados no FEA juntamente com a matéria prima;
2. Quantidade de oxigênio injetado;

3. Quantidade de material carbonoso injetado:

Portanto, o estudo dos fatores que influenciam a variação do FeO da escória tem grande importância, devido a considerável influência do mesmo no refino do aço e no rendimento metálico do processo.

2.3.1. Escórias

Segundo a ASTM a escória é um produto não metálico, que essencialmente consiste em silicatos de cálcio e ferro, combinados com óxidos de Fe, Al, Mn, Ca e Mg fundidos, que aparece como co-produto do aço resultante das atividades realizadas nas usinas integradas de aço ou nas usinas com forno elétrico a arco.

A escória tem papel fundamental nas reações de refino influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição final do aço devido ao equilíbrio escória-banho. Ela é também importante no desempenho dos refratários do forno que são sensíveis a qualquer alteração efetuada tanto em suas propriedades físicas quanto químicas. Portanto, um bom conhecimento dos fundamentos de formação da escória é muito útil na análise do processo (FALCONI 1980).

A escória do forno elétrico a arco é composta basicamente por óxidos que possuem origens distintas:

- SiO₂
 - MnO
 - FeO
- } 
- CaO - Provém da cal calcítica;
 - MgO - Pode ter origem na cal calcítica, dolomita ou nos refratários.

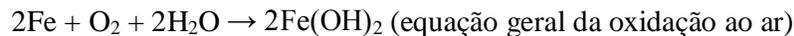
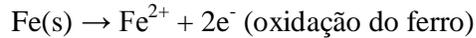
Em relação aos teores de FeO, deve-se buscar um valor ótimo para que a espumação da escória seja favorecida, já que a mesma depende da redução do FeO. Além disso o FeO tem papel importante na desfosforação pois este em teores adequados (entre 25 e 30%) auxilia a fixação do fósforo na escória.

2.3.2. Influência da Oxidação da Carga Metálica no FeO da Escória

Um dos principais fatores que afetam o FeO da escória é o percentual de óxidos de

ferro que são carregados juntamente com as matérias primas. Esta oxidação é geralmente causada pelo armazenamento da sucata em local aberto e em presença de umidade.

A formação da ferrugem se dá através da oxidação do ferro concomitantemente com a redução do oxigênio como pode ser observado nas reações abaixo.



Geralmente o Fe(OH)_2 (hidróxido de ferro II) é oxidado a Fe(OH)_3 (hidróxido de ferro III), que é muitas vezes representado por $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

A sucata processada, também chamada de Shredder (SSHD), é uma sucata que com o passar do tempo pode apresentar consideráveis percentuais de oxidação. Suas formas retorcidas geradas através da passagem da mesma pelo moinho Shredder formam focos para retenção de água, este fato juntamente com a ocorrência de chuvas pode aumentar significativamente a oxidação desta sucata.

Estes óxidos, introduzidos pela sucata serão fundidos e dependendo do potencial de carbono do banho ocorrerá a redução total ou parcial dos mesmos podendo levar ao aumento do FeO da escória.

2.3.3. Influência da Injeção de Oxigênio e Carbono sobre o FeO da Escória

O refino primário do aço consiste basicamente na retirada de impurezas por meio da sua oxidação. Esta oxidação se dá por meio da injeção de O_2 no forno através de injetores estrategicamente posicionados. Os óxidos formados possuem menor densidade que o banho e sobem para a escória através da qual são retirados. Este certamente é um fator positivo do refino primário, entretanto juntamente com a oxidação dos elementos indesejáveis, ocorre a oxidação do ferro o qual também vai para a escória e é retirado sob a forma de FeO.

Segundo Jones et al 1998, os grandes ganhos alcançados em produtividade no FEA ao longo dos anos, se devem principalmente ao avanço das práticas relacionadas ao

emprego do Oxigênio. Nos primeiros equipamentos em operação, os consumos praticados giravam em torno de 9 Nm³/t, já na atualidade podem ultrapassar os 40Nm³/t.

Durante o refino, geralmente o silício é o primeiro elemento a ser oxidado, o que se dá quase sempre em presença da oxidação conjunta de manganês e ferro. A velocidade e extensão da oxidação desses elementos são função do potencial de oxigênio, dos teores de silício manganês e ferro, da composição da escória já formada e da temperatura.

Alguns segundos após o início da escorificação inicia-se a incorporação de mais óxidos: CaO e MgO. O primeiro a partir da cal calcítica e o segundo a partir da cal, dolomita, de outro fundente carregado ou dos refratários. A incorporação desses óxidos modifica as atividades da SiO₂, FeO e MnO no sentido de baixar a atividade da SiO₂ (favorecendo a oxidação do silício) e aumentar a atividade do FeO e MnO (favorecendo o retorno do ferro e manganês)(FALCONI 1980).

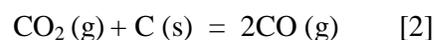
Entretanto além da injeção de oxigênio no banho, em geral, um material carbonáceo como coque de petróleo char ou carvão é injetado na interface metal/escória o qual reage com o FeO dissolvido produzindo CO conforme mostrado na reação [1].



Como consequência dessa reação ocorre a espumação da escória a qual traz muitas vantagens ao processo tais como:

- Diminuição das perdas térmicas para as paredes do forno;
- Melhor transferência térmica para o banho;
- Redução do consumo de energia elétrica;
- Redução do consumo de eletrodos;
- Redução no consumo de refratários;
- Aumento da produtividade da Aciaria:

A explicação mais aceita para esta espumação é que a mesma seja decorrente da gaseificação do carbono simultaneamente com a reação gás-escória mostrada nas reações [2] [3].





O CO_2 é um intermediário gasoso que participa do mecanismo de reação mas não é um produto.

A reação global pode ser controlada por diversos mecanismos incluindo os seguintes:

- (a) transferência de massa de FeO na escória para a interface gás-escória,
- (b) a cinética da reação de gases de carbono [2], e
- (c) a cinética da reação gás-escória [3].

É de consenso geral que a reação [2] é lenta e possui o controle da reação e que a reação [3] é rápida e em equilíbrio. Portanto a pressão de CO_2 é definida pelo equilíbrio da reação [3] e a taxa da reação global [1] aumenta com o teor de FeO porque a pressão de CO_2 para a reação [3] aumenta com o teor de FeO (CORBARI 2009).

Portanto, nota-se que o FeO é indispensável para a formação do gás CO, responsável pela espumação da escória. Entretanto se o teor de FeO for excessivo surgem filamentos de escória líquida por onde as bolhas de CO passam muito rapidamente prejudicando a espumação.

Segundo Ito and Fruehan o aumento no teor de FeO possui dois efeitos contrários na espumação. Inicialmente com o aumento no teor de FeO a taxa da reação [1] torna-se mais rápida e apesar da diminuição da viscosidade a espumação aumenta. Ao ser atingido certo teor crítico de FeO o efeito da diminuição da viscosidade torna-se mais expressivo que o aumento da geração do gás CO causando a diminuição da espumação.

Assim pode-se verificar que o controle dos parâmetros de injeção de oxigênio e material carbonoso são essenciais para a regulação do teor de FeO da escória já que o mesmo possui grande influência sobre a qualidade da escória

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Estudo dos Fatores que Afetam o FeO da Escória

Antes de qualquer experimento prático, foi realizado um levantamento sobre os principais fatores que causam a variação do %FeO da escória, conforme pode ser visualizado no diagrama de causa e efeito da figura 3.1.

Com base na avaliação de todas as possíveis causas levantadas, optou-se por analisar mais detalhadamente as que aparentemente causam maior impacto sobre a variabilidade do FeO da escória: o grau de oxidação e quantidade de impurezas da sucata e os parâmetros de injeção de oxigênio e coque no FEA.

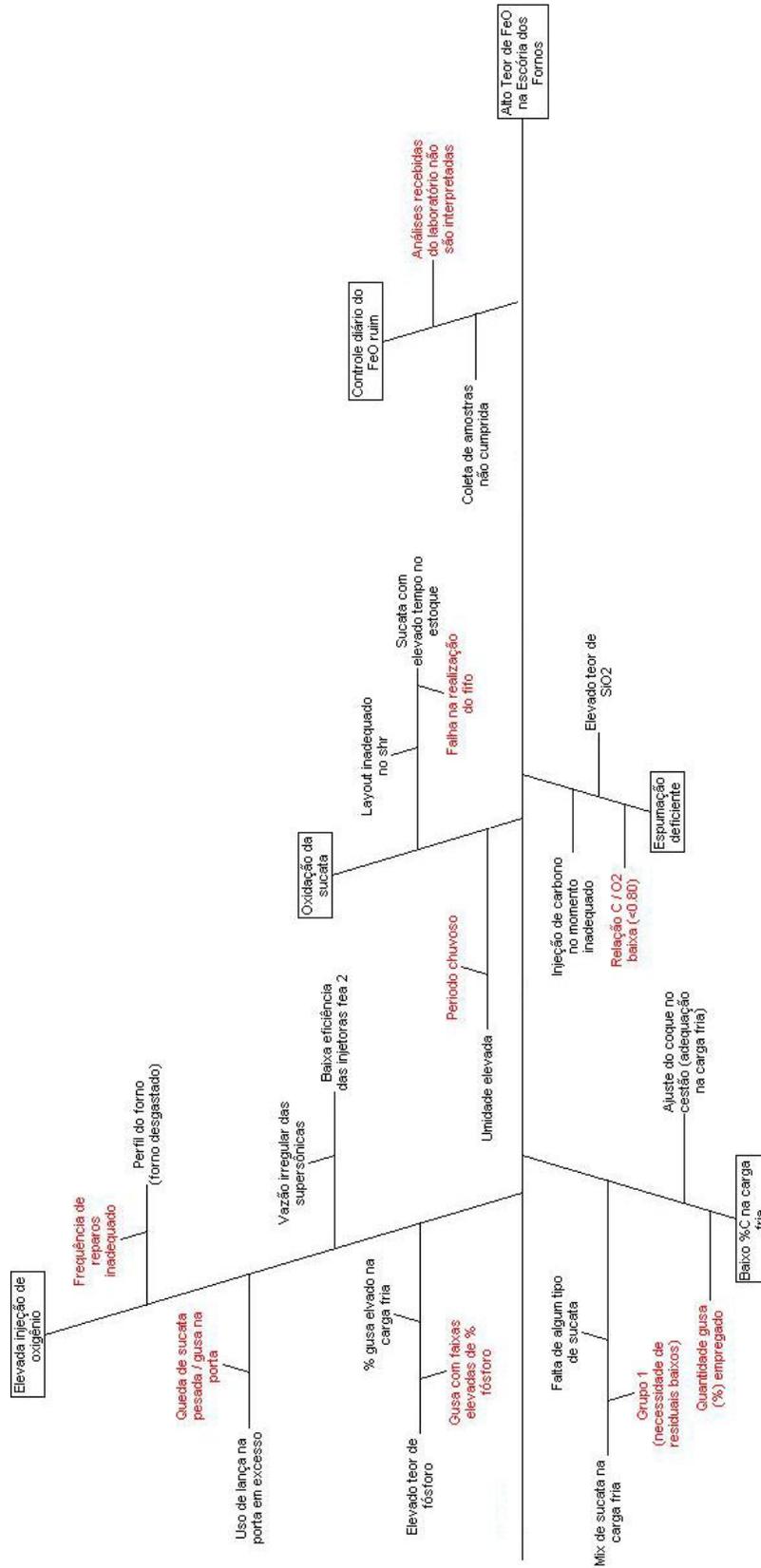


Figura 3. 1 Diagrama de causa e efeito.

3.2. Avaliação da Oxidação da Sucata Shredder

A avaliação da sucata Shredder teve por objetivo verificar como se processa a oxidação de duas amostras de sucata; a amostra (a) disposta em local coberto e a amostra (b) armazenada a céu aberto.

3.2.1. Amostragem

Primeiramente foram separadas as duas cargas de Shredder, o SSHD-A foi disposto em local aberto enquanto o SSHD-B foi armazenado em local coberto.

Foram coletadas amostras de sucata de SSHD de diferentes pontos das respectivas pilhas, conforme mostrado na figura 3.2 totalizando um volume aproximadamente igual de sucata em cada pilha.



Figura 3.2 Coleta das amostras de Shredder.

3.2.2. Pesagem e Catalogação das Amostras

Após a amostragem as peças de SSHD foram submetidas a pesagem individual e numeradas para posterior identificação.



Figura 3.3 Pesagem das Amostras.

3.2.3. Retirada de Impurezas

A retirada das impurezas foi realizada através da aplicação de ar comprimido sobre toda a sua superfície da amostra.



Figura 3.4 Limpeza das amostras com ar comprimido.

Após a retirada das impurezas foi realizada nova pesagem da peça para que posteriormente seja realizado o cálculo do % de impurezas.

3.2.4. Retirada dos Óxidos

Posteriormente a retirada das impurezas as amostras foram submetidas a decapagem mecânica com esferas de vidro objetivando a retirada dos óxidos aderidos.



Figura 3.5 Jateamento com esferas de vidro.

Após o jateamento as amostras foram novamente pesadas já que o cálculo do percentual de óxidos é realizado pela diferença de massa.

3.2.5. Cálculo do Percentual de Impurezas e Óxidos

Com as massas obtidas através dos procedimentos indicados foi possível calcular o percentual de óxidos das amostras, utilizando a equação abaixo.

$$\% \text{ Óxidos} = ((P2-P3)/P2) * 100$$

Além disso, foi realizada uma avaliação visual do Shredder armazenado nas baias de carregamento. Essa análise foi realizada por meio de fotografias para que fosse possível relacionar a qualidade do Shredder em um determinado dia com o FeO médio do dia.

3.3. Evolução da Oxidação Durante o Refino

Esta etapa do trabalho buscou coletar amostras que representassem o a evolução dos teores de FeO da escória durante o refino, relacionando com parâmetros como injeção de oxigênio, coque e composição do aço.

3.3.1. Retirada das Amostras

Foram realizados dois tipos principais de amostragem:

- (1) Amostragem de escória e aço em quatro momentos distintos do refino: início, final e dois momentos intermediários.
- (2) Amostragem somente de escória em três momentos, início, meio e final do refino nos dois fornos.

Na amostragem (1) foi realizada a retirada simultânea de escória e aço em quatro momentos distintos do refino, o momento exato de retirada das amostras foi estabelecido pelo consumo de energia elétrica do FEA 03. No momento em que era atingido o valor de consumo de energia pré-estabelecido o forno era desligado e o operador retirava a amostra de aço do banho utilizando dois amostradores do tipo ECIL (figura 3.6).



Figura 3.6 Extremidade do cartucho para retirada de amostra de aço.

Instantes após a retirada da amostra de aço foram coletadas as amostras de escória. A retirada desse material deu-se pela porta de trabalho do forno com o auxílio de uma vara tubular que foi imersa na escória, fazendo com que a mesma ficasse aderida como mostrado na figura 3.7.



Figura 3. 7 Escória aderida a vara instantes após a retirada.

Além da amostragem acima, mais complexa, foi realizada a retirada somente de escória no início, meio e final do refino, este teste objetivou verificar qual o comportamento do FeO durante o decorrer da corrida. A coleta das amostras foi realizada nos dois fornos da Gerdau Riograndense.

Em ambos os casos, após a retirada das amostras as mesmas eram identificadas com o número da corrida seguido da letra A, B, C e D para a identificação do momento de retirada da amostra.

3.3.2. Análise das Amostras de Escória

As amostras de escória retiradas dos FEAs foram analisadas no setor de Desenvolvimento da Qualidade (DQ) através de um Espectrômetro de Fluorescência de raios X após preparação prévia conforme as etapas descritas abaixo:

3.3.3. Moagem da amostra

A primeira etapa de preparação para a análise de espectroscopia foi a cominuição da amostra que foi realizada em um moinho de discos por um tempo de 30 segundos.



Figura 3. 8 Recipiente do moinho.

3.3.4. Peneiramento

Após a moagem a amostra foi peneirada em uma peneira de 200 Mesh e a fração não passante na peneira foi descartada.



Figura 3. 9 Peneira de 200 Mesh

3.3.5. Retirada do Ferro Metálico

Após a moagem e peneiramento foi realizada a retirada do excesso de ferro metálico da amostra. Esse procedimento foi realizado com o auxílio de um imã, no qual as partículas de ferro metálico ficaram aderidas.



Figura 3. 10 Retirada de ferro metálico.

3.3.6. Pesagem

Nesta etapa da preparação foram pesadas aproximadamente 10 gramas de escória juntamente com 1 grama de aglomerante para a posterior compactação.

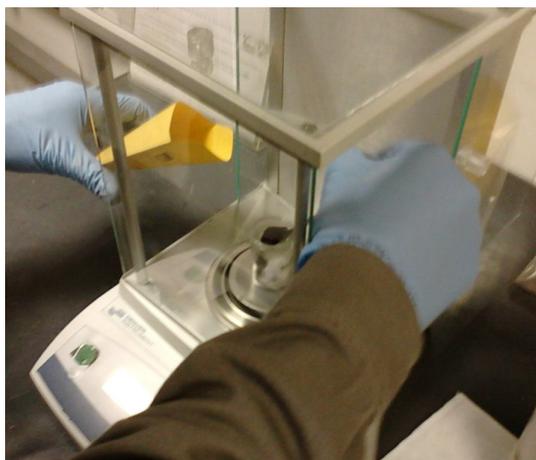


Figura 3. 11 Pesagem da amostra.

3.3.7. Compactação

A última etapa da preparação da amostra é a compactação onde a mesma é submetida a uma força de 100 KN fazendo com que tome a forma de um cilindro de aproximadamente 50 mm.



Figura 3. 12 Compactação da amostra de escória.

3.3.8. Análise de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X

As escórias após serem submetidas a preparação tiveram a sua composição química avaliada por fluorescência de raio-X em equipamento ARL ADVANT'X Sequential XRF mostrado na figura 3.13.



Figura 3. 13 Espectrômetro de fluorescência de raios-X.

A análise de fluorescência de raios-X é um método instrumental não destrutivo para a determinação elementar quantitativa e qualitativa e se baseia no comprimento de onda e intensidade das linhas espectrais emitidas pela excitação secundária dos elementos analisados. Isto é os raios-X primário irradia a amostra, e pela emissão dos raios-X secundários, chamados de Fluorescentes, obtém-se os comprimentos de onda característicos de cada elemento e intensidades relativas a sua concentração o que permite

a realização de análises quantitativas e qualitativas[Mendes]

3.4. Análise do Aço no Decorrer do Refino

Conforme citado anteriormente em 4 corridas foram retiradas além das amostras de escória amostras de aço, com o intuito de verificar as mudanças de composição química do banho durante o refino.

As amostras foram retiradas utilizando amostradores ECIL. Em cada momento do refino eram retiradas duas amostras, já que existe a possibilidade da amostra sair falha, assim tinha-se uma maior probabilidade de obter uma amostra boa.

Após a coleta do aço as amostras foram lixadas em uma de suas faces a fim de se obter uma superfície plana e livre de contaminantes conforme a figura 3.14.



Figura 3. 14 Amostra de aço após preparação e análise.

Terminada a preparação as amostras foram analisadas em um Espectrômetro de emissão óptica marca ARL 3460-AES. Essa técnica de análise baseia-se na excitação da amostra através de eletrodos. A passagem de eletricidade do eletrodo pela amostra promove a energia necessária para atomizá-la e excitar os átomos resultantes para um estado eletrônico mais alto liberando fótons. A intensidade dos fótons é proporcional à concentração do elemento que gerou esses fótons, esta relação torna possível quantificar os elementos presentes na amostra.

Segue abaixo um esquema do funcionamento do Espectrômetro:

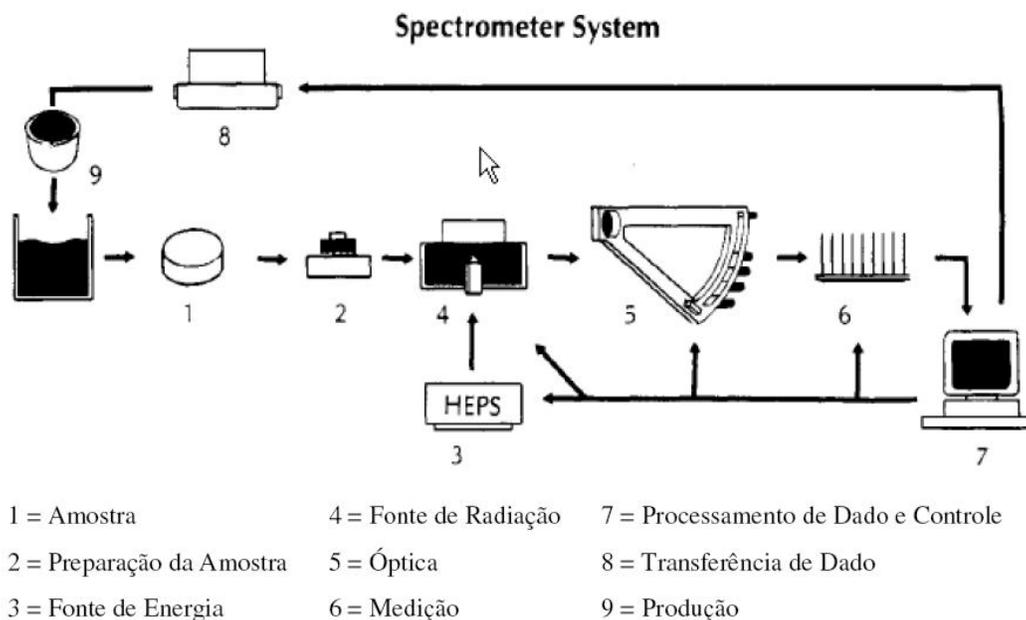


Figura 3. 15 Representação esquemática de um espectrômetro.

Entretanto antes de realizar a análise das amostras coletadas deve-se realizar a calibração do equipamento através de padrões cuidadosamente preparados. Esses padrões devem aproximar-se o mais possível da composição das amostras a serem analisadas. A concentração da amostra é determinada com auxílio de uma curva de calibração construída com os padrões uma vez que padrões e amostras são excitados em condições idênticas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação da Sucata Shredder

A sucata Shredder foi escolhida para este estudo devido à quantidade utilizada em cada corrida (25 a 30%) e a sua forma, que favorece a oxidação e acúmulo de impurezas, condições que podem afetar o %FeO da escória.

4.1.1. Análise Visual da Sucata Shredder nas Baias de Preparação do Cestão

Através da análise visual, buscou-se identificar os diferentes graus de oxidação e quantidade de impurezas da sucata Shredder. O objetivo foi relacionar os mesmos com o teor de FeO da escória.

Na figura 4.2 encontra-se uma sucata do tipo Shredder com baixo grau de oxidação e baixa quantidade de impurezas. Ao analisarmos o %FeO, nota-se um baixo percentual deste nas corridas que utilizaram a sucata na condição supracitada.



Baixo percentual de FeO

Figura 4. 1 Sucata Shredder de boa qualidade.

Já na figura 4.3 nota-se que a sucata Shredder possui um grau de oxidação mais avançado que a anterior, entretanto não possui uma quantidade de impurezas muito elevada

(não se observa a presença de terra ou areia em maior quantidade). Em relação ao percentual de FeO, verifica-se valores relativamente maiores que os da sucata da figura 4.3.



Médio percentual de FeO

Figura 4. 2 Sucata Shredder de qualidade intermediária.

Na figura 4.4 encontra-se dois fatores que combinados afetam negativamente o FeO da escória: um elevado grau de oxidação e uma alta quantidade de impurezas (terra) condições que provavelmente sejam responsáveis pelo teor mais elevado de FeO das corridas deste dia.



Alto percentual de FeO

Figura 4. 3 Sucata Shredder com alta quantidade de impurezas.

4.1.2. Oxidação da Sucata Shredder

Sabendo que um dos fatores que afeta o %FeO da escória é o grau de oxidação da sucata buscou-se quantificar a oxidação de duas amostras de Shredder.

A amostra (A) figura 4.5, que foi armazenada em local coberto, manteve a coloração acinzentada com o decorrer das sete semanas. Esse fato indica uma baixa oxidação superficial, conforme pode ser visualizado na figura 20.



Figura 4. 4 Sucata Shredder armazenada em local coberto (Amostra A).

Já a amostra (B), figura 4.6, disposta em local a céu aberto, apresentou uma mudança significativa de sua coloração, passando do cinza para tons de laranja. Esse é um indicativo da oxidação superficial da mesma. Ambas as imagens foram feitas após cinco semanas de exposição do Shredder.



Figura 4. 5 Sucata Shreder armazenada em local aberto (Amostra B).

Além da avaliação visual, que indica um maior grau de oxidação da sucata disposta a céu aberto, através de testes laboratoriais foi possível quantificar a evolução da oxidação das duas amostras, conforme apresentado na figura 4.7.

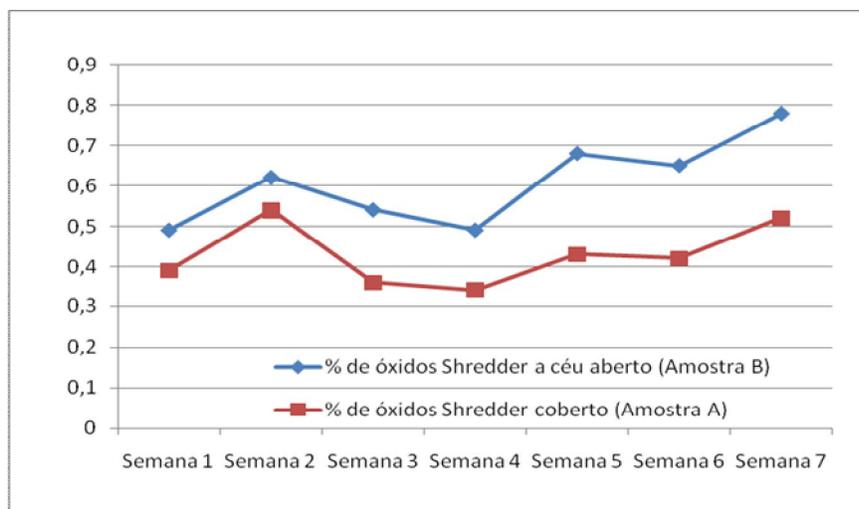


Figura 4. 6 Gráfico da evolução da oxidação do Shredder.

Observando o gráfico da figura 4.7 pode-se constatar que a sucata Shredder disposta em local aberto apresenta um maior grau de oxidação em todo o período quando comparada ao Shredder coberto. Além disso, verifica-se um pico de oxidação para ambas amostras na semana 2. Tal fenômeno possivelmente está relacionado com chuvas que ocorreram nesse período o que causou um aumento da umidade e consequente aumento de oxidação para as duas amostras.

É importante observar que, no período de chuvas, as amostras tiveram um aumento proporcional da oxidação. Deste modo, a chuva não deve ser o principal causador da diferença de oxidação entre as amostras.

Quando observada a evolução do grau de oxidação das amostras A e B durante as semanas, verifica-se um aumento da diferença do percentual de óxidos das amostras como pode ser melhor visualizado no gráfico da figura 4.8, sendo que esta diferença torna-se menos expressiva a partir da quinta semana de exposição.

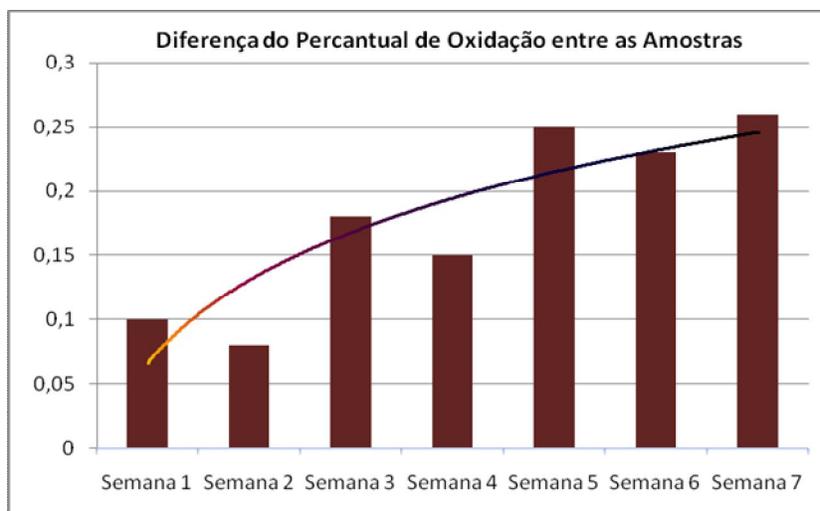


Figura 4.7 Diferença do percentual de oxidação das amostras.

É possível visualizar que a diferença do percentual de oxidação na primeira semana encontrava-se em 0,1% enquanto na quinta semana este valor passou para 0,25%.

Portanto, ao final das análises do Shredder verificou-se duas causas principais para o aumento do % de FeO da escória: a oxidação da sucata (alto tempo de exposição a céu aberto) e alta quantidade de impurezas (principalmente terra).

4.2. Variação do FeO durante o Refino

4.2.1. Avaliação do FeO da Escória Durante o Refino

A partir da retirada de escória no início, meio e final do período de refino oxidante de várias corridas, foi possível construir gráficos que demonstram a evolução dos teores de FeO durante o refino para os fornos 2 e 3.

No gráfico da figura 4.9 são apresentadas as curvas de sete corridas com os respectivos valores de %FeO para o forno 2, o qual, na época dos testes operava com um injetor Cojet e duas injetoras supersônicas.

Analisando o gráfico, nota-se que para as amostras coletadas os valores de FeO do início do refino estão entre 40 e 55% enquanto que no final estão na faixa entre 30 e 45%. Além disso, de forma geral as curvas apresentam inclinações semelhantes, ou seja, as

corridas que possuem teores mais elevados de FeO no início do refino apresentam maiores percentuais de FeO no vazamento, indicando uma relação entre o FeO final e a quantidade de óxidos de ferro inicial. Como foi visto no item 4.1, o teor de FeO no início do refino oxidante é bastante afetado pela limpeza da sucata.

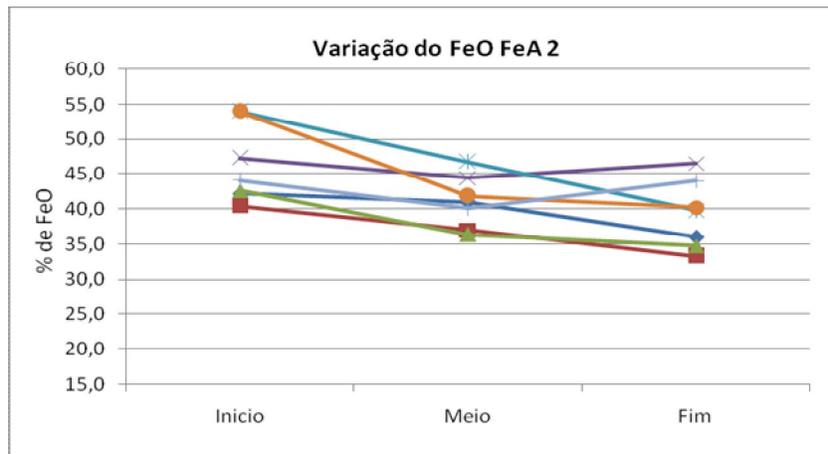


Figura 4. 8 Variação do FeO durante o refino no FEA 2.

No gráfico da figura 4.10 pode-se analisar as curvas de evolução do FeO para o FEA 3 onde, assim como no FEA 2, ocorre uma redução dos teores de FeO do início para o final do refino oxidante do aço.

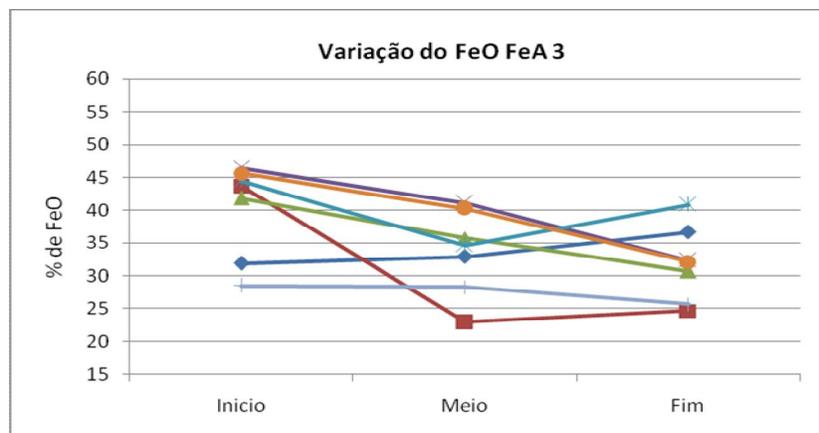


Figura 4. 9 Variação do FeO durante o refino no FEA 3.

Comparando os dois gráficos, é possível constatar que o FEA 3 apresentou teores menores de FeO ao final do refino que o FEA 2. O que provavelmente deve-se a injeção mais eficiente de oxigênio, já que o FEA 3 opera com três injetores Cojets.

Na figura 4.11 (a) está ilustrado a diferença entre o jato supersônico e o jato Cojet. Conforme apresentado pelas imagens o sistema de injeção Cojets possui um jato mais coerente que as injetoras supersônicas, o que torna a injeção muito mais eficiente, com mais penetração no banho, garantindo um controle mais preciso sobre os teores de FeO das corridas.

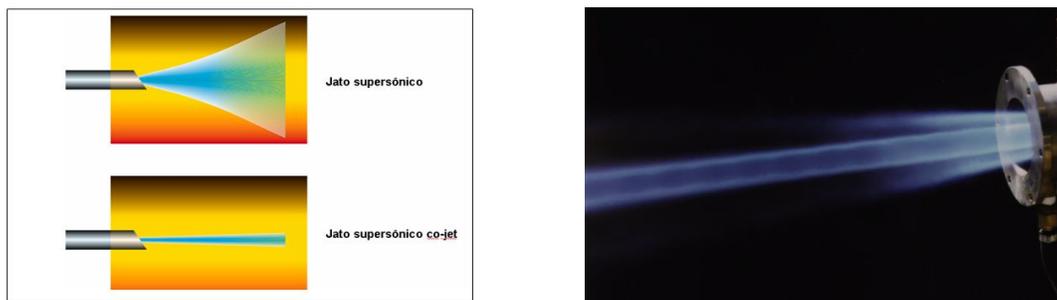


Figura 4. 10 (a) Esquema da diferença entre jato de injetora supersônica e Cojet (b) Injetor Cojet - Fonte: Curso ABM de Aciaria Elétrica, Módulo Injeção de Gases.

4.2.2. Análise Detalhada dos Parâmetros de Injeção no FEA

Conforme abordado até então, o teor de FeO da escória está relacionado com dois fatores principais: a qualidade da sucata carregada e os parâmetros de injeção de oxigênio e material carbonoso. Partindo desse princípio, decidiu-se realizar quatro corridas fixando ao máximo os fatores que influenciam o FeO da escória, para tal foram tomadas as seguintes ações:

1. Utilizado Shredder de boa qualidade (baixa oxidação e pequena quantidade de impurezas);
2. Fixados os parâmetros de injeção de Gases e Material Carbonoso;
3. Fixados os momentos de abertura da porta de trabalho do forno, retirada de amostras de aço e temperatura.

Além dos gases, a injeção de coque pela porta de trabalho também foi realizada de forma com que nas quatro corridas tanto as quantidades como os momentos em que o coque foi injetado fossem os mais parecidos possíveis.

A injeção de coque inicia a partir dos 30 minutos da corrida sendo finalizada nos 35 minutos, nesse período tem-se a prática de escória espumante e espera-se que ocorra

alguma redução dos níveis de FeO da mesma.

Com os parâmetros de operação fixados, e amostras de aço e escória retiradas em quatro momentos do refino, foi possível obter curvas da evolução do %FeO, juntamente com o comportamento de elementos como o Si e P e C no banho.

Analisando o gráfico da figura 4.14, que representa a corrida 01, verificamos que o %FeO manteve-se consideravelmente estável, tendo uma queda no final do refino.

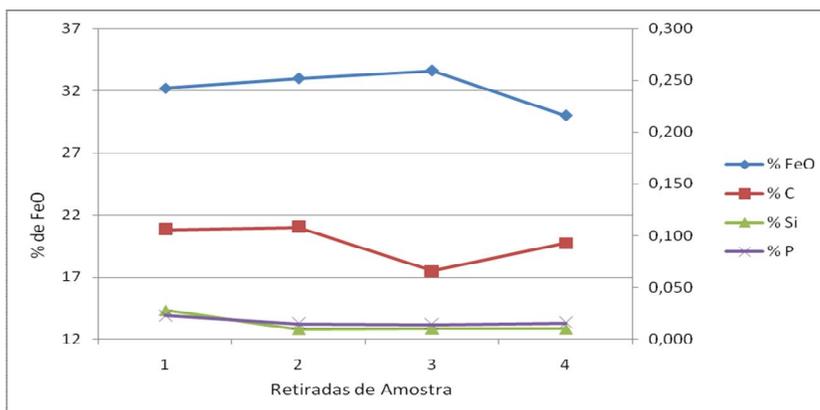


Figura 4. 12 Gráfico da corrida 01.

Além disso verificou-se uma estabilidade dos teores de P e Si e uma queda do % C no meio do refino, seguido de um aumento no final.

Em relação ao gráfico da figura 4.15, corrida 02, observa-se teores menores de FeO em relação a corrida 01. O que deve-se, provavelmente, a maiores teores de Si no banho, já que o Si é mais ávido pelo oxigênio que o ferro. A tendência é que o Si seja oxidado preferencialmente, diminuindo a oxidação do Fe.

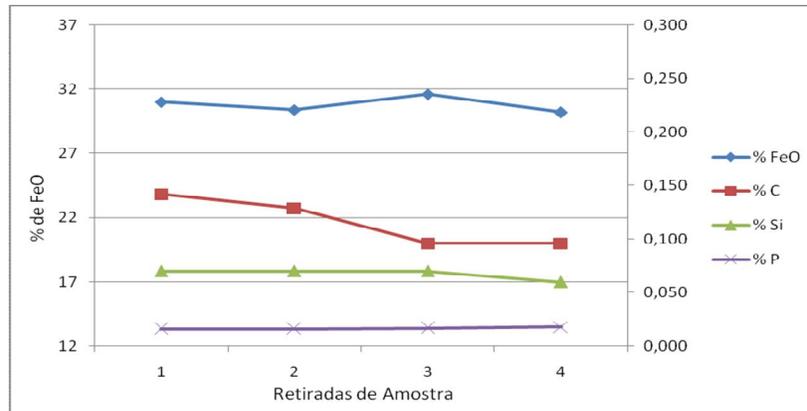


Figura 4. 13 Gráfico da corrida 02.

Além disso, os teores de fósforo da corrida 02 também foram levemente maiores que os da corrida 01, possivelmente causado também pelos maiores teores de Si o qual se oxida preferencialmente também em relação ao P.

A corrida 03, figura 4.16, apresentou o FeO em leve queda nos três primeiros momentos do refino tendo uma queda mais considerável no final da corrida. Em relação ao Si, a corrida 03 foi a que apresentou os menores valores das quatro corridas analisadas assim como os menores teores de P.

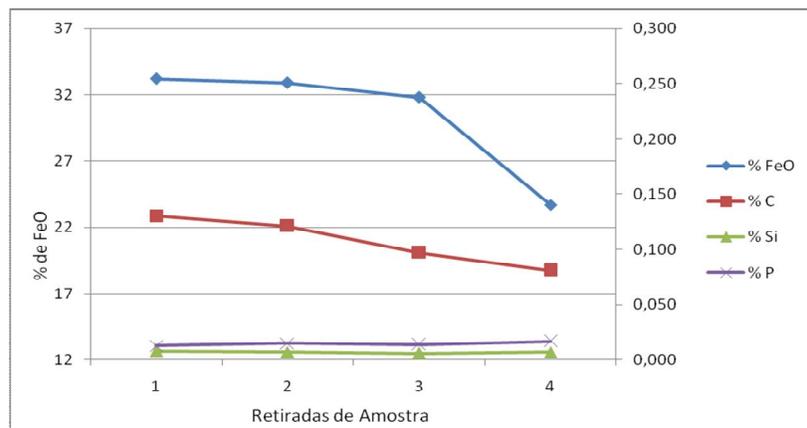


Figura 4. 14 Gráfico da corrida 03.

A corrida 4 fig 4.17 apresenta somente os três pontos finais do refino já que a amostra do momento inicial não pôde ser analisada. Em relação as demais análises, constatou-se a mesma tendência das demais corridas, ou seja, redução do teor de FeO no final do refino. A explicação é que provavelmente isso aconteça devido a redução do FeO

pela injeção de coque de petróleo.

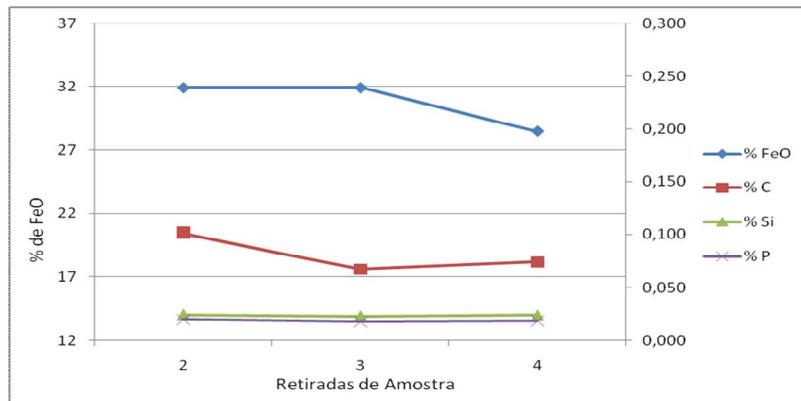


Figura 4. 15 Gráfico da corrida 04.

Ao compararmos as quatro corridas encontramos as seguintes relações:

- Em todas as corridas, o FeO manteve-se consideravelmente estável durante o refino tendo uma queda mais acentuada na etapa final da corrida, o que provavelmente deve-se a redução do FeO causada pela injeção do coque de petróleo.
- As corridas que apresentaram maiores teores de silício tiveram menores teores de FeO, o que provavelmente se deve a maior afinidade do oxigênio pelo silício em comparação ao ferro.
- As corridas com menores teores de silício apresentaram menores teores de fósforo no banho o que possivelmente é causado pela maior oxidação do P já que menos oxigênio foi consumido pelo Si.

Por fim, através da figura 4.18 pode-se verificar que as todas as corridas analisadas tiveram um FeO bastante estável, com valores finais entre 23 e 30% faixa considerada ótima para a operação do FEA.

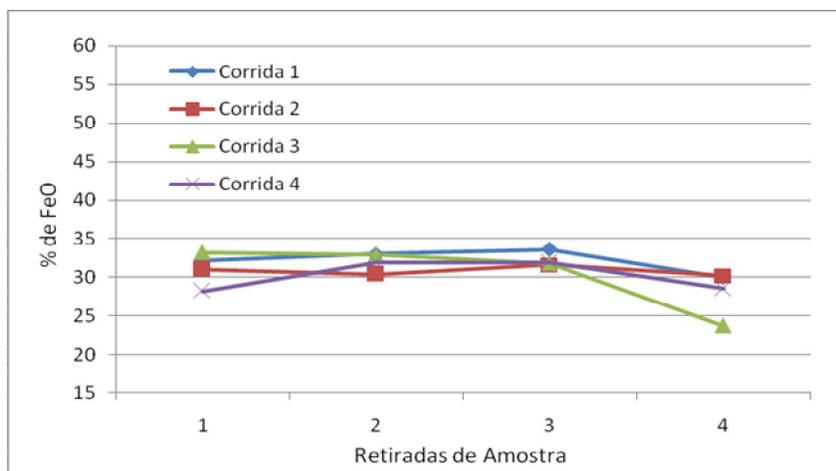


Figura 4. 16 FeO das corridas analisadas.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no estudo foi possível concluir que:

- O aumento da oxidação e quantidade de impurezas da sucata Shredder (principalmente terra) gera um aumento de FeO da escória.
- A sucata Shredder armazenada a céu aberto apresentou, durante todo o período, um grau maior de oxidação que a armazenada em local protegido. Além disso, a diferença do percentual de óxidos entre as amostras demonstrou uma tendência de aumento com a passagem do tempo, demonstrando uma tendência de estabilização a partir da quinta semana de exposição.
- Nas quatro corridas realizadas com os parâmetros controlados houve uma queda do %FeO ao final do refino o que se deve a redução do FeO pela injeção de coque de petróleo.
- Quando foi utilizada uma sucata de melhor qualidade, juntamente com o controle dos parâmetros de injeção e operação do forno, o %FeO da escória apresentou valores bastante estáveis durante todo o refino.
- As corridas analisadas que tiveram maior teor de silício no aço apresentaram maiores percentuais de fósforo, já que o Si se oxida preferencialmente ao Fe.
- De forma geral, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, tendo sido identificado que o %FeO depende fortemente da qualidade da sucata carregada no forno e do controle dos parâmetros de injeção de gases e material carbonoso.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência da estabilização do FeO na qualidade dos tarugos produzidos.
- Estudar meios para reduzir a entrada de óxidos no forno juntamente com a sucata carregada.
- Verificar a influência da cal no FeO da escória.

7. REFERÊNCIAS

ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia vol.1**, São Paulo, Arte e Ciência , 1997.

CORBARI, R. **Foaming and the Rate of the Carbon-Iron Oxide Reaction in Slag**, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2009.

FALCONI, V. C. **Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido**, UFMG, 1980.

FIGUEIRA, R. M. F. **Operação de Forno Elétrico a Arco**. São Paulo: Gerdau, 2007.

ITO, K and FRUEHAN, R.J. **Trans. ISS, I&SM**, 1989, p. 55–60.

JONES J. A. T. et al. **Electric Furnace Steelmaking**. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998, V. 10, p. 525 -660.

LIBÓRIO, A. **Melhoria no Desempenho dos Injetores Supersônicos em Operação em um Forno Elétrico a Arco**. Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2009.

MENDES, W. **Análise Quantitativa da Composição de Escórias Siderúrgicas pelos Métodos de Espectroscopia e Difração de Raios-X** . p.18-22, 1994.

MOURÃO, M. B et al. **Introdução a Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007

VILELA, A. C. F. **Caderno Técnico de Siderurgia II-A**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.