

PATRÍCIA ADURENS VALENTE

**ESTUDO DO NÍVEL DE OXIDAÇÃO DE
CORRIDAS DE AÇO EM FORNOS DE
ARCO ELÉTRICO**

São Paulo

2013

PATRÍCIA ADURENS VALENTE

**ESTUDO DO NÍVEL DE OXIDAÇÃO DE
CORRIDAS DE AÇO EM FORNOS DE
ARCO ELÉTRICO**

Trabalho de Formatura apresentado
À Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Marcelo Breda
Mourão.

São Paulo

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Valente, Patrícia Adurens

O estudo do nível de oxidação de corridas de aço em fornos de arco elétrico / P.A. Valente. -- São Paulo, 2013.

64 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Oxidação 2.Aço 3.Forno elétrico I.Universidade de São Pau-

lo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

RESUMO

O aço está presente em tudo a nossa volta, corresponde a 90% do consumo mundial de metais. Atualmente são produzidos cerca de 300.000.000 de toneladas de aço divididos entre usinas integradas, partindo de minério de ferro e coque e de usinas semi-integradas com o emprego de sucata e ferro gusa.

A produção do aço em usinas semi-integradas é dividida em pátio de sucata, com a divisão de sucatas em vários setores, refino primário que ocorre no forno elétrico a arco (FEA) com a fusão da sucata e a etapa oxidante, refino secundário com adequação da composição química e etapa redutora e por fim o lingotamento contínuo com formação do produto final da aciaria. Durante a produção do aço ocorre a formação da escória que é de fundamental importância para a qualidade do aço. A produção do aço é assistida pela injeção de oxigênio que ajuda na formação dos óxidos que irão para a escória e formar o equilíbrio metal-escória. Para este equilíbrio ser mantido é importante que se tenha o conhecimento da oxidação do banho de aço líquido, da composição da escória, principalmente da quantidade de óxido de ferro presente (FeO) na escória e de sua basicidade. Neste trabalho foram analisados os dados de corridas de aço de uma usina do estado de São Paulo. Foram coletados de oxidação e temperatura do banho metálico e composição química e basicidade da escória. Estes dados foram comparados com uma curva teoria da relação de ppm O do banho com FeO da escória e com dados da literatura da relação $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ em função da basicidade da escória. No geral nenhuns dos dados apresentaram correlação entre eles, porém quando comparados com a curva teórica e os gráficos da literatura, apresentam alguma proximidade, apenas o teor de oxigênio contido no banho estava um pouco abaixo do esperado.

ABSTRACT

Steel is present in everything around us, corresponds to 90 % of world consumption of metals. Currently about 300 million tons of steel divided between integrated mills, where it is produced from iron ore and coke, and mini mills, with the use of scrap and pig iron as raw materials. The production of steel in minimills comprises the scrap yard, with the division of scraps in various sectors, then the scrap is melted in the electric arc furnace (EAF). In the EAF occur the primary refining in the oxidizing step, and the secondary refining with the reduction step and adjustment of the chemical composition of the steel. Finally the steel is solidified in the continuous casting with the formation of the final product of the melt shop. The slag formed during the process is of fundamental importance to the quality of the steel. Steel production is assisted by the injection of oxygen that helps in the formation of oxides of the slag; slag and metal interact with each other. To the balance to be maintained it is important to have knowledge of oxidation of the bath of liquid steel and the slag composition, especially the amount of iron present (FeO) oxide in the slag and its basicity. In this work, the data of steel production in a steel plant in the state of São Paulo were analyzed. Data on the oxidation level of the metal bath, temperature and chemical composition of the slag were gathered. These data were compared with the ones expected from the theory. Overall data showed poor correlation between them, but when compared with the theoretical curve and literature data, present some correlation, with the oxygen content of steel presenting values below the expected. Overall, the steel oxidation level does not present any anomalies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução tecnológica do FEA ao longo da sua história [3].	2
Figura 2- Montagem do primeiro carregamento de sucata [6].	5
Figura 3 - Carregamento do FEA [6].	6
Figura 4 - Introdução dos eletrodos durante a fase de refino primário [5].	7
Figura 5 - Retirada de escória no FEA [6].	9
Figura 6 - Vazamento do aço do FEA para o forno panela através do EBT [5].	10
Figura 7- Volume de oxigênio necessário para descarburização em função de diversos teores iniciais de carbono [6].	16
Figura 8- Layout térmico do forno. A área em vermelho é conhecida como área quente do forno devido à proximidade com os eletrodos [1].	20
Figura 9 - Diagrama de Ellingham (Ellingham H. J. T., J Soc Chem Ind (London) 63 125 (1944)).	28
Figura 10 - Razão de Equilíbrio $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \% \text{Si} + 0,84 \times \% \text{P}_2\text{O}_5$ [9].	35
Figura 11- Razão de Equilíbrio $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{Basicidade}$ [9].	35
Figura 12 - Relação teórica $[\text{ppm O}] \times a_{\text{FeO}}$.	43
Figura 13 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} na escória para temperaturas I.	43
Figura 14 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} para temperaturas II.	43
Figura 15 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} da escória para temperaturas III.	44
Figura 16 – Gráfico de comparação dos dados das corridas com linha teórica.	44
Figura 17 - Relação de ppm O_2 e a_{FeO} para basicidade I.	45
Figura 18 - Relação de ppm O_2 e a_{FeO} para basicidade II.	45
Figura 19- Atividade do FeO em escória de $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ em equilíbrio com o ferro a 1600°C . [15].	46
Figura 20 - Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para temperaturas I.	47
Figura 21- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para temperaturas II.	47
Figura 22- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para temperaturas III.	47
Figura 23- Dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ em comparação com dados da literatura [9 - modificado].	48
Figura 24- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para basicidade I.	49
Figura 25 - Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para basicidade II.	49
Figura 26 - Dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ em comparação com dados da literatura [9 - modificado].	50
Figura 27 - Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{basicidade}$ para temperaturas I.	50
Figura 28- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{basicidade}$ para temperaturas II.	51
Figura 29- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{basicidade}$ para temperaturas III.	51
Figura 30 - Dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{basicidade}$ em comparação com dados da literatura [9 - modificado].	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de arco [2].....	7
Tabela 2 - Contribuição de Ligas [5].....	8
Tabela 3 - Contribuição de energia de cada elemento [2].....	23
Tabela 4 - Relação de óxidos básicos e ácidos.	29
Tabela 5 - Composição típica de escória para aço baixo e médio carbono [13].	31
Tabela 6- Coeficientes de interação e_i^j dos elementos no aço a 1600°C ($\times 10^{-2}$).....	32
Tabela 7 - Composição química do aço 1024D.....	36
Tabela 8 - Atividade do oxigênio no banho	36
Tabela 9 - Temperaturas de Vazamento do FEA para FP.	36
Tabela 10 - Dados de Temperatura e oxidação do banho.	37
Tabela 11 - Composição Química da Escória.	38
Tabela 12- Composição da escória óxidos com alguma "semelhança"	40
Tabela 13- Dados de basicidade da escória e relação de ppm de oxigênio por %FeO na escória.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEA Forno a Arco Elétrico

LC Lingotamento Contínuo

EBT Eccentric Bottom Taping

ppm Partes por milhão

FP Forno Panela

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Ciclo de produção do aço	2
2.2. Descrição de uma corrida	3
2.2.1. Pátio de sucata.....	3
2.2.2. Forno elétrico (FEA).....	5
2.2.3. Forno panela.....	10
2.2.4. Lingotamento contínuo.....	11
2.3. FEA e processo de produção de aço.	11
2.4. Principais reações.....	19
2.5. Termodinâmica das reações.....	24
2.6. Escória	27
2.6.1 Basicidade.....	29
2.6.2 Viscosidade.....	30
2.6.3 Densidade.....	30
2.6.4 Equilíbrio metal-escória na produção de aço.....	34
3. Objetivos	35
4. Materiais e Métodos.....	35
4.1. Padrão de operação	36
4.2. Dados.....	37
5. Resultados e Discussões	41
6. Conclusões	53
7. Referências Bibliográficas.....	54

1. Introdução

O aço corresponde a 90% do consumo Mundial de metais. Está presente, em tudo à nossa volta [1].

No processo de fabricação do aço, diversas são as rotas possíveis para a sua obtenção. As rotas mais difundidas são as Usinas Integradas e Usinas Semi-Integradas, onde a primeira tem como característica o emprego do minério de ferro e o coque como matérias-primas; e a segunda o emprego de sucata e ferro gusa ambos no estado sólido [1].

No mundo, são produzidas cerca de 300.000.000 toneladas por ano em Fornos Elétricos a Arco [2].

Embora no Brasil os fornos elétricos a arco sejam, predominantemente, de corrente alternada, cerca de 45% da capacidade instalada de fornos elétricos, em siderurgia, é de corrente contínua [3].

As origens do FEA (Forno a arco elétrico) remontam a 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno com dois eletrodos dispostos horizontalmente que criavam um arco indireto aquecendo a carga por irradiação. No entanto, esta invenção só começou a trilhar uma trajetória ascendente na produção de aço no século XX, quando os custos com a energia elétrica começaram a viabilizar o uso desta tecnologia. Com a estabilização da produção mundial de aço e a redução da demanda, as décadas de 80 e 90 caracterizaram-se pelo desenvolvimento de técnicas que buscavam a redução dos custos operacionais e o aumento da qualidade do produto final. Neste sentido, a combinação de um forno elétrico para fusão da matéria-prima e outro para o refino do aço denominado forno panela, vem ao encontro da necessidade de aumento da qualidade do aço produzido e do aumento da eficiência do processo. Assim, inúmeras foram as evoluções tecnológicas do FEA. Abaixo a figura 1 ilustra os principais avanços ao longo dos anos [1].

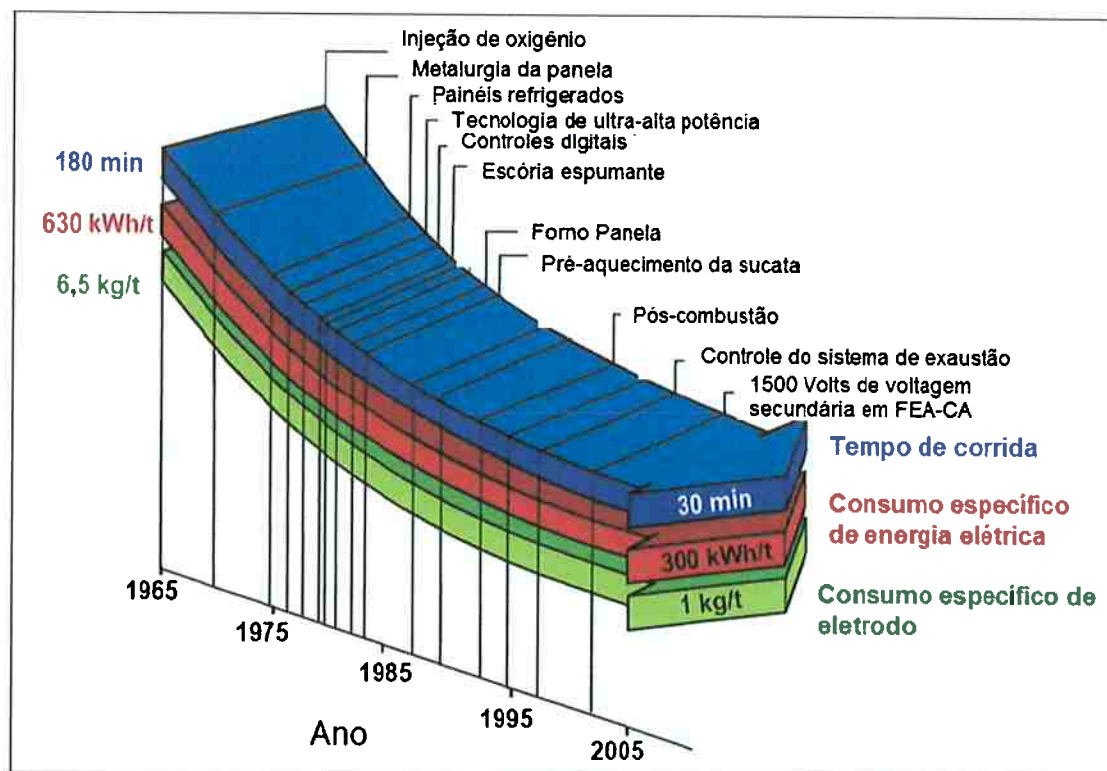


Figura 1- Evolução tecnológica do FEA ao longo da sua história [3].

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ciclo de produção do aço

Os processos de produção de aço evoluíram devido à crescente exigência do mercado por produtos de melhor qualidade com baixo custo.

O processo de fabricação do aço em aciarias elétricas compõe-se das seguintes etapas gerais:

Pátio de sucata: Escolha da sucata de acordo com a composição do aço pretendida. Preparação dos cestões.

Refino primário: São realizadas as operações de fusão, acerto da composição química do aço sob condições oxidantes, adições de elementos de liga (ferroligas) e ajuste da temperatura de vazamento [4].

Refino secundário: Acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento [4].

Lingotamento do aço: O aço é solidificado de acordo com a forma final do produto [5].

2.2. Descrição de uma corrida

Uma corrida pode ser dividida em 4 partes: pátio de sucata, forno elétrico (FEA), forno panela e lingotamento contínuo.

2.2.1. Pátio de sucata

Para se realizar uma corrida de aço primeiro prepara-se o cestão com sucata e outro elementos como, por exemplo, ferro gusa, que serão a matéria-prima para a produção do aço [5].

As matérias primas constituem o fator mais importante no desempenho dos fornos elétricos a arco no que diz respeito a sua produtividade, custos e qualidades dos produtos fabricados. Ela é afetada tanto pelas características físicas dos materiais empregados (como tamanho e densidade, por exemplo), como pelas suas características químicas (grau de impurezas presentes na forma de materiais não metálicos, teor de impurezas metálicas que não podem ser removidas durante o processamento, etc.) [6].

De todos os materiais carregados, a sucata é o item que mais afeta a operação e o seu custo. Além disso, o tipo e o tamanho de sucata afetam diretamente o tempo de corrida (e, portanto produtividade do forno) e o consumo específico de energia (em kWh por tonelada) [6].

A sucata possui na sua composição química alguns elementos residuais que são impossíveis de serem removidos do aço durante a etapa de refino oxidante e refino redutor. Os mais comuns são o estanho (Sn), níquel (Ni), cromo (Cr) e cobre (Cu). Assim, se os mesmos foram adicionados no forno em quantidades acima do limite, eles irão permanecer no aço produzido e, assim, o aço, por um lado, não atingirá a composição química especificada e provavelmente terá alterado suas propriedades mecânicas finais que o tornará impróprio para o emprego previamente estabelecido [1].

Dentro do conjunto de materiais que normalmente chega às usinas pode ocorrer uma variabilidade, por exemplo, o cavaco de aço gerado no processo

de usinagem de peças. Dependendo do tipo de aplicação destas peças terá uma composição química específica. Este mesmo problema ocorre com a sucata recuperada nas plantas de beneficiamento de escória. A determinação da composição química do aço recuperado da escória é relativamente simples, mas determinar a quantidade de aço que tem o material recuperado é uma atividade extremamente complexa [1].

Sucatas geradas internamente abrangem o retorno interno que é o sucateamento de material metálico gerado no lingotamento contínuo, nas laminações, trefilas, fábricas de pregos e logística, e a sucata recuperada na planta de beneficiamento de escória, como por exemplo, escória do FEA, a escória da virada da Panela, escória da virada do distribuidor após lingotamento contínuo, remanescente nas painéis – bico e infiltrações [1].

As sucatas utilizadas geralmente têm a sua densidade aparente variando entre 0,4 e 2,2 t/m³. A utilização de sucatas com densidades muito elevada podem dificultar a penetração dos eletrodos durante os primeiros estágios de fusão da carga, expondo as paredes da abóbada a uma irradiação mais intensa, e aumentam o risco de quebra de eletrodos pela maior tendência de engaiolamento da carga [6].

Por outro lado, cargas com densidade muito baixa sofrem maior oxidação durante a fusão, diminuindo o rendimento metálico da operação e o número de cestões aumenta, em prejuízo a produtividade [6].

Na prática o operador utiliza mistura de sucatas com diferentes densidades, e é dividida em mais de um cestão e/ou carregamento. Dentro do cestão a sucata é separada entre sucatas de menor e maior densidade conforme mostra o esquema da figura 2 [5].



Figura 2- Montagem do primeiro carregamento de sucata [6].

2.2.2. Forno elétrico (FEA)

Carregamento

Pode-se dizer que uma corrida de aço num forno elétrico a arco se inicia imediatamente após o vazamento da corrida anterior. Com o forno vazio, ele é inspecionado visualmente e são iniciados os reparos do revestimento anterior (soleira, rampa e paredes) [6].

O carregamento deve ser o mais rápido possível, pois, deve-se “aproveitar” o calor da corrida anterior não deixando o forno esfriar [2].

O carregamento, figura 3, é feito por intermédio de cestões cheios de sucata criteriosamente distribuída com o objetivo de minimizar o impacto da carga sobre o revestimento do forno, evitar sucata alta que impeça o fechamento do forno e facilitar a penetração dos eletrodos no início da fusão sem o risco de quebra dos mesmos [4].



Figura 3 - Carregamento do FEA [6].

Após o carregamento do primeiro cestão a abóbada é posicionada na condição de fechamento e os eletrodos são baixados o forno é ligado com a abertura do arco, iniciando a perfuração da carga, formando um pouco de aço líquido [4,5].

No início do período de fusão procura-se selecionar um “tap” de voltagem intermediária, com o objetivo de que se possa ter penetração dos eletrodos ao longo da coluna de carga sem expor a abóbada e a parte superior das paredes a uma irradiação muito intensa, o que causaria uma erosão excessiva [6].

Assim que os eletrodos tenham penetrado suficientemente na coluna de carga e os refratários estejam adequadamente protegidos, a potência é aumentada pela seleção de um “tap” de maior voltagem. Isto acelera a fusão, permitindo a formação rápida de uma poça de metal líquido que protegerá a soleira de superaquecimento que poderia danificá-la [6].

Para cada condição de fusão existe um comprimento de arco ótimo que determina a velocidade de fusão. Ele é dependente do tipo de carga, da potência empregada, do tamanho do forno, etc. Assim, diferentes tipos de sucata requerem potências diferentes, o que determina diferentes comprimentos de arco (sucata pesada no fundo requer arcos curtos até sua fusão completa, enquanto que sucata leve requer arcos longos desde o início para evitar-se enguiolamento) [6].

Ao fim da fusão a potência é diminuída para que ela seja completada sem afetar as paredes, que a esta altura estarão mais desprotegidas. A tabela 1 e a figura 4 trazem um resumo dos tipos de arco, tensão e corrente empregados durante a fusão da sucata.

Tabela 1 - Tipos de arco [2].

Ignição do Arco	Penetração dos Eletrodos	Formação do banho Líquido
Arco Curto	Arco Longo	Arco Longo
Baixa Tensão	Alta Tensão	Alta Tensão
Alta Corrente	Baixa corrente	Baixa Corrente

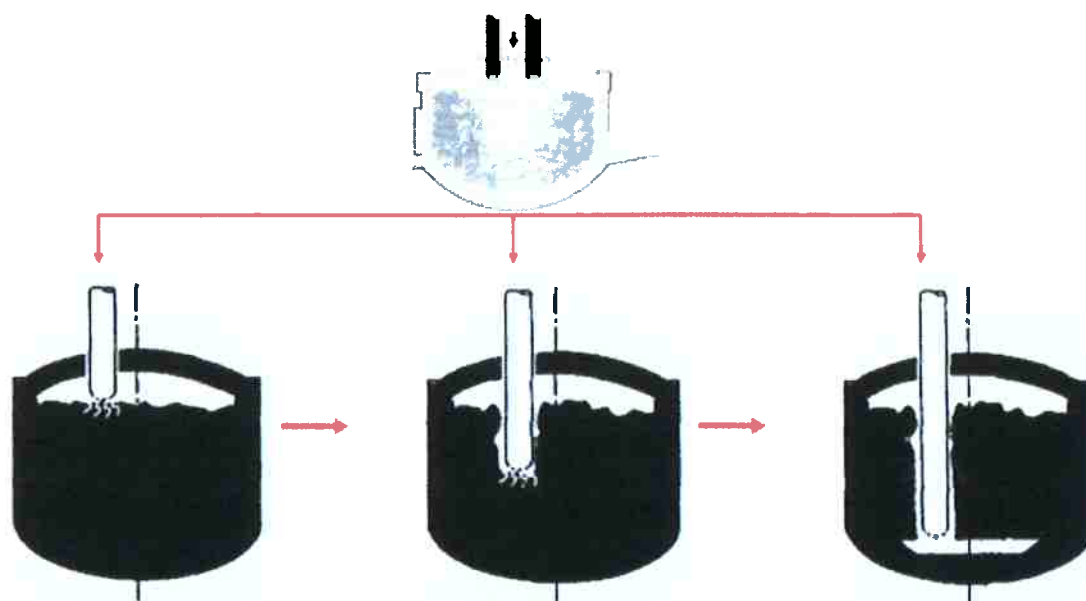


Figura 4 - Introdução dos eletrodos durante a fase de refino primário [5].

Ainda com alguma sucata no estado sólido, dentro do forno é realizado o segundo carregamento. Após toda a sucata ter sido fundida e com temperatura por volta de 1570°C , inicia-se o período de refino primário.

Os objetivos metalúrgicos a serem alcançados neste período são:

1. Atingir um nível pré-determinado de carbono ao fim da fusão, o que é determinado em primeira instância pelo controle das proporções de materiais metálicos carregados;
2. Reduzir o teor de fósforo no aço líquido de acordo com a especificação-Desfosforação;

3. Homogeneizar a composição e temperatura do aço;
4. Aquecer o aço líquido até a temperatura necessária para o vazamento.

A fusão é assistida pela injeção de oxigênio, fase oxidante, para aumento da energia calorífica transferida à carga e acelerar a fusão de cargas mais densas resultando numa diminuição do tempo de fusão [4].

No refino temos a adição de ligas para o acerto da composição química e retirada de impurezas e formação de escória [5].

Os elementos adicionados ao banho podem ser divididos em grupo de acordo com o seu comportamento termodinâmico, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Contribuição de Ligas [5].

Grupo	Comportamento Termodinâmico	Elemento
I	Elementos que são incorporados a escória	Ca, Mg, Si, Al, Zr, Ti, B
II	Elementos que se dividem entre o aço e a escória	Mn, P, S, Cr, Nb, V
III	Elementos que são incorporados ao aço	Cu, Ni, Sn, Sb, Mo, Co, As, W
IV	Elementos que são vaporizados	Zn, Cd, Pb

Fase oxidante: A fase oxidante inicia-se com a insuflação de oxigênio no banho metálico;

Os objetivos metalúrgicos mais importantes nesta fase de refino são a eliminação de fósforo e de carbono [6].

Ao fim do período oxidante, para evitar que o fósforo retorne ao banho metálico deve-se realizar o vazamento da escória, como demonstra a figura 5.

Vazamento da escória

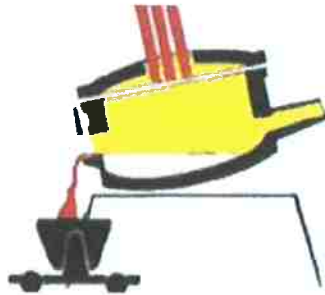


Figura 5 - Retirada de escória no FEA [6].

A escória tem como objetivo manter a temperatura do aço e a oxidação, além de proteger o arco (escória espumante).

Deve-se observar a consistência da escória, pois se ela estiver muito fluida é um indicativo de que ela contém muito FeO .

Após a retirada da escória tem-se a fase redutora, nesta etapa o banho metálico encontra-se com elevados teores de oxigênio dissolvido em relação aos teores de equilíbrio, tornando-se necessário reduzi-lo através de agentes desoxidantes [6].

Quando o aço estiver “pronto” ele é vazado para o forno panela através do EBT (Eccentric Bottom Taping), como mostra a figura 6.

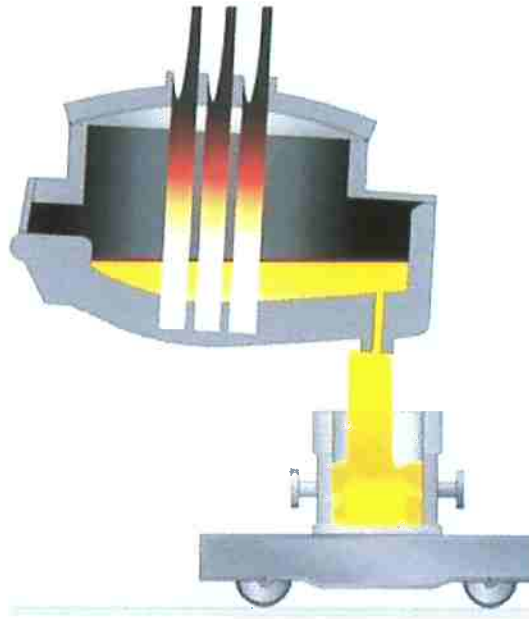


Figura 6 - Vazamento do aço do FEA para o forno panela através do EBT [5].

Um pouco de escória sempre vai para o forno panela, pois ela continua agindo como isolante térmico.

2.2.3. Forno panela

No forno panela ocorrem as operações do refino secundário que podem ser resumidas em:

Agitação por borbulhamento, ou rinsagem, de gás inerte, por exemplo, argônio, que é a homogeneização do banho;

Injeção de elementos de liga para ajuste de composição química;

Reaquecimento;

Desoxidação;

Dessulfuração;

Adição de elementos especiais;

Correção da composição química;

Acerto da temperatura de liberação para as próximas etapas.

Após a retirada de uma amostra do aço e a verificação da composição química e temperatura a panela é transferida para o lingotamento contínuo.

2.2.4. Lingotamento contínuo

O aço deve ser solidificado de forma compatível com a forma final do produto. O lingotamento contínuo é a última etapa do processo de fabricação do aço. A característica básica desta operação é a contínua adição do aço líquido no molde com um formato mais próximo e adequado ao do produto final.

Uma máquina de lingotamento contínuo é constituída dos seguintes dispositivos básicos:

- Distribuidor é o dispositivo que recebe o aço da panela e o distribui para os veios. Tem a função de promover a flotação das inclusões, suprir o molde com um fluxo constante de aço líquido e servir de reservatório durante as trocas de panelas.
- Molde é o local em que se dá início a solidificação do aço, o chamado resfriamento primário.
- Resfriamento secundário é composto por uma câmara de sprays d'água com o objetivo de consolidar a solidificação do tarugo e minimizar o risco de perfurações. O desenho dos bicos de sprays e a distribuição de água desempenham um papel fundamental no controle da temperatura da superfície do veio.

O aço líquido da panela é transferido para um distribuidor e deste para os moldes dos veios, normalmente existem 2 a 6 veios cada máquina de lingotamento. A solidificação do aço no molde possibilita a extração contínua dos tarugos ou placas [4].

2.3. FEA e processo de produção de aço.

O forno a arco elétrico (FEA) envolve uma fusão rápida e de baixo custo de sucatas, visando uma alta produtividade, mas diminuindo os custos fixos [7].

O forno elétrico a arco foi planejado para ser empregado em um processo de batelada onde sua carga é sucata no estado sólido. As etapas deste processo são:

- a. Carregamento da sucata e gusa através do cestão;
- b. Fusão da carga pela energia de combustível fóssil, elétrica e de reações exotérmicas de oxidação;
- c. Injeção de oxigênio para a descarbonização e formação de escória;
- d. Injeção combinada de carbono e oxigênio para formação da escória espumante para cobrir o arco elétrico aumentando a eficiência energética, a proteção de refratários e minimizando os danos aos painéis refrigerados;
- e. Remoção de escória para evitar a reversão do fósforo;
- f. Elevação da temperatura do banho entre 1620-1680°C para ser vazada para a panela [1].

O período de fusão, embora não seja metalurgicamente importante, é o responsável por cerca de 70 a 75% de toda a energia elétrica consumida durante uma corrida [9].

O refino primário pode ser dividido em duas fases: fase oxidante e fase redutora

- Fase oxidante

Muitas vezes a fusão é assistida por injeção de oxigênio, tanto para aumento da energia calorífica transferida à carga (ajuda principalmente as sucatas que ficam na lateral do forno). Além disso, a sua ação resulta na formação de quantidades importantes de óxido de ferro na escória que, em alguns casos elimina a necessidade de uso de minério ou carepa [6].

Ao fim da fusão, a escória formada, via de regra, apresenta uma basicidade não muito elevada, devido à formação de sílica por oxidação do silício da carga que normalmente é o elemento mais oxidável [6].

Existem várias relações empíricas para expressar a basicidade de escórias, mas em última análise todas elas expressam em que proporções ou em que quantidade os óxidos básicos excedem os óxidos ácidos [6].

A relação mais simples é dada por:

Equação 1

$$\frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)}$$

Onde (%CaO) e (%SiO₂) representam os teores de CaO e de SiO₂ na escória, dados em porcentagem em peso (esta relação é importante porque CaO e SiO₂ são os óxidos básico e ácido respectivamente, mais importante)

Como a basicidade é importante para o refino que se segue, a escória de fusão normalmente é removida e rapidamente é formada uma nova escória através de adições de cal ou calcário e agentes fluidificantes [6].

Agentes fluxantes: calcário e cal

Tanto o calcário como principalmente a cal são ingredientes essenciais em aciarias elétricas e constituem a fonte de CaO necessário como fluxante para formar uma escória com óxidos de impurezas removidas do banho metálico tais como sílica, óxidos de manganês, óxidos de fósforo e etc [6].

Agentes fluidificantes

Os agentes fluidificantes são utilizados para auxiliar a formação rápida da escória, mantendo-a líquida e eficiente ao longo de toda a operação de refino. O agente fluidificante mais importante em aciarias elétricas é a fluorita, que apresenta um teor de CaF₂ em geral acima de 85% e a sua ação se deve à formação, com os outros óxidos da escória, de sistemas com ponto de fusão mais baixo.

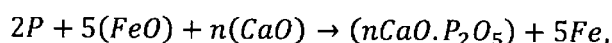
A fluorita é importante porque em processos básicos ela não diminui a capacidade de refino das escórias, não afetando a sua basicidade [6].

Os objetivos metalúrgicos mais importantes nesta fase de refino são a eliminação de fósforo e de carbono, chamados de desfosforação e descarburização, respectivamente.

Desfosforação

A reação de eliminação do fósforo pode ser assim representada:

Equação 2



Com $n=3$ ou 4 .

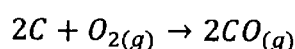
Nesta equação, P representa o fósforo dissolvido no banho metálico, enquanto que (FeO), (CaO) e $(nCaO.P_2O_5)$ representam compostos dissolvidos na escória. Esta reação é favorecida por escória com alta basicidade, e alto poder oxidante (expresso por escórias com alto teor de FeO) e também por baixas temperaturas, por se tratar de uma reação exotérmica.

Como o carbono é eliminado simultaneamente ao fósforo durante a injeção de oxigênio, forma-se uma escória espumosa. Com frequência se trabalha nessa fase com o forno levemente basculado na direção da porta de carregamento, com o objetivo de que essa escória possa escoar para fora do forno e recolhida no pote de escória. Isto evita que a escória se sature em fósforo, impedindo a progressão de desfosforação [6].

Descarburização.

A redução do teor de carbono durante a fase oxidante normalmente se situa entre 0,2 e 0,4%, dependendo do teor inicial no fim da fusão, e o processo pode ser representado pela seguinte equação química:

Equação 3



O monóxido de carbono formado, ao entrar em contato com o oxigênio do ar se oxida, por sua vez, a CO_2 (gás carbônico).

O objetivo básico da descarburização é promover um contato íntimo entre metal e escória através da agitação decorrente da injeção de oxigênio e formação de monóxido de carbono, homogeneizar térmica e quimicamente o banho metálico e reduzir, dentro de certos limites, os teores de hidrogênio e de nitrogênio. Existem, entretanto, três restrições que devem ser levadas em consideração:

- a. Um teor de carbono muito elevado no início do refino secundário resultará em perda de tempo, pois quantidades máximas de oxigênio, insuflado raramente ultrapassam $0,5 \text{ Nm}^3/\text{t.min}$ para aços carbono;
- b. O sopro de oxigênio em banhos contendo baixos teores de carbono (por exemplo, 0,1%) resultará em perdas metálicas elevadas e super-oxidação do metal, enquanto a velocidade de descarburização será insuficiente para promover uma mistura adequada de metal e escória;
- c. Em qualquer condição, é indesejável oxidar o carbono a um nível tal que, adições maciças de agentes recarburantes sejam necessárias, pois isso pode prejudicar tanto a produtividade da unidade, como a qualidade do produto.

A figura 7 fornece o volume de oxigênio requerido para uma dada remoção de carbono, em função de diversos teores iniciais de carbono.

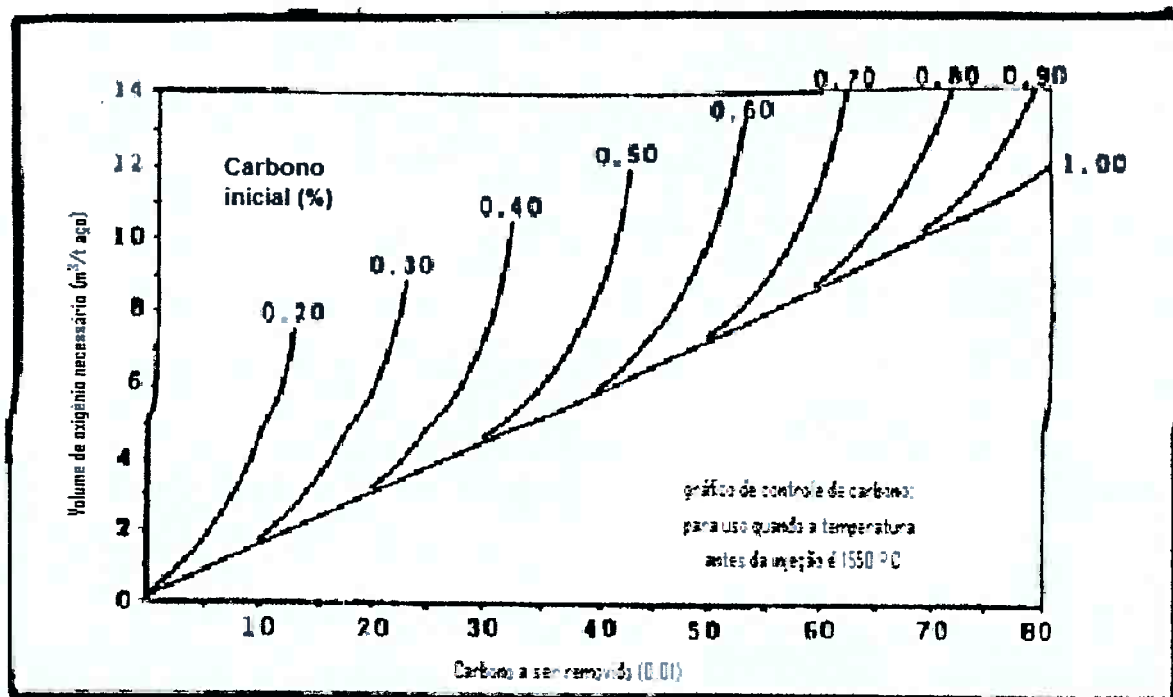


Figura 7- Volume de oxigênio necessário para descarbonização em função de diversos teores iniciais de carbono [6].

Ao fim do período oxidante a escória deve ser removida tão completamente quanto possível, pois qualquer que seja a quantidade remanescente, o fósforo nela contido será revertido na fase redutora que normalmente se segue. Além disso, os óxidos de ferro e manganês nela contido retardam a formação de uma escória redutora adequada [6].

- Fase redutora:

Esta etapa se inicia imediatamente após a retirada da escória oxidante. O banho metálico apresenta a esta altura teores elevados de oxigênio dissolvidos em relação aos teores de equilíbrio, tornando-se necessário reduzi-lo através de agentes desoxidantes [6].

Agentes redutores

Estes agentes são utilizados na fase redutora dos processos de elaboração de aços onde se procura, além de outros objetivos, eliminar o enxofre dissolvido. Para isto é necessário reduzir-se os teores de FeO , Fe_2O_3 e MnO das escórias,

com emprego de elementos que tenham pelo oxigênio uma grande afinidade química [6].

Os agentes normalmente utilizados são desoxidantes como o alumínio, o ferro silício, o cálcio-silício e outros como carvão vegetal, etc.

Desoxidante e outros agentes corretivos de composição química

Eles são adicionados ao banho metálico em combinação com outros elementos e a forma mais comum de utilização é como ferro-ligas, isto é, ligas de ferro com um dos elementos de liga, que geralmente contém uma porcentagem maior do elemento de liga, que geralmente contém uma porcentagem maior do elemento de liga considerado.

Dois são os fatores que governam a seleção de ferros-ligas: facilidade de adição para conseguir-se atingir consistentemente a composição química desejada e o custo da adição em si mesma. De um ponto de vista técnico também é importante considerar o ponto de fusão e a energia envolvida no processo de incorporação de ferro-liga no banho metálico.

O método e o instante da corrida em que a adição corretiva é feita dependem em grande parte da afinidade química do elemento de liga pelo oxigênio e do teor de oxigênio do banho metálico no instante da adição.

Após a desoxidação do banho é introduzida no forno cal e fluorita para a formação rápida de uma nova escória.

A condição desoxidada do banho metálico ao longo da fase redutora é conseguida mantendo-se a soma dos teores de FeO e MnO tão baixos quanto possível (tipicamente abaixo de 1%).

Os materiais fluxantes tipicamente utilizados na formação da escória redutora são cal queimada, fluorita e areia de sílica. Estes materiais podem ser pré-misturados ou adicionados em sequencia (com a cal em primeiro lugar). O peso total de escória é cerca de 2% do peso total de metal líquido e a condição redutora é mantida por adições de coque moído de alumínio, ou de silício na forma de ferro silício.

Quando coque é utilizado, a condição redutora da escória é atingida quando ela assume uma coloração acinzentada, que se desintegra no resfriamento e quando umedecida apresenta um odor característico de acetileno.

Os objetivos metalúrgicos a serem alcançados na fase redutora de refino são os seguintes:

- a. Assegurar que a composição química especificada seja alcançada;
- b. Garantir um produto limpo, com baixos teores de inclusões não metálicas;
- c. Reduzir o teor de enxofre a níveis baixos sempre que se fizer necessário.

Os dois primeiros objetivos decorrem principalmente da manutenção de níveis baixos de oxigênio dissolvido no banho metálico permitindo, por exemplo, que incorporação de elementos oxidáveis como silício, cromo vanádio, etc. seja feita com rendimentos elevados (acima de 90 a 95%) e reprodutíveis [2].

Feitas as correções finais de composição, a desoxidação final é feita através de ferro-silício e alumínio, a temperatura é ajustada e, depois de 10 a 15 minutos no máximo o metal é vazado para uma panela de fundição pré-aquecida [2].

- Refino secundário

O aço líquido normalmente contém determinadas impurezas entre as quais as principais são: oxigênio, enxofre e fósforo. Essas impurezas formam inclusões as quais são prejudiciais para as propriedades mecânicas dos aços.

Durante o refino do metal líquido, se introduz deliberadamente certa quantidade de oxigênio com a finalidade de remover carbono, fósforo e enxofre. Numa etapa subsequente, o oxigênio dissolvido deverá ser reduzido por transferência para a escória ou, como acontece na maior parte dos casos, pela adição de um desoxidante o qual fixa o oxigênio na forma de uma inclusão. O enxofre que não for eliminado no processo de refino tende a formar também inclusões. As inclusões não metálicas encontradas alteram as propriedades dos aços, devendo ser reduzidas e controladas [6].

2.4. Principais reações

Os agentes elétricos e químicos são de fundamental importância, pois são os responsáveis pela transferência de calor para a carga metálica possibilitando o processo de fusão [1].

O agente elétrico são os eletrodos de grafite onde ao estabelecer uma diferença de potencial entre as colunas há geração do arco elétrico promovendo a fusão da carga [1].

Os agentes químicos que geram calor provêm de:

1. Reações de oxidação com elementos químicos constituintes da carga metálica, como por exemplo, silício (Si), manganês (Mn), carbono (C) e ferro (Fe);
2. Reações de oxidação com elementos adicionados no forno, com o propósito de gerar energia, como o carbono (C) e metano (CH_4);
3. Reações de oxidação dos gases provenientes da queima dos dois primeiros grupos, tais como o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2) [1].

Para possibilitar todas as reações de oxidação mencionadas é necessária a participação do oxigênio (O_2), que é inserido no processo por queimadores, Injetores, Co-jets® e a Lança [1].

Os queimadores através da injeção de gás combustível e oxigênio têm a função de transferir calor para carga metálica. Normalmente são injetados logo após o carregamento, para que se tenha um maior proveito [1].

Tanto o Co-jet® quanto a lança do manipulador por possuírem elevadas vazões de oxigênio e carbono são responsáveis por gerar turbulência na superfície do banho e, conseqüentemente, reações de oxidação e redução do ferro [1].

A figura 8 mostra a posição dos agentes químicos e a ação dos eletrodos no banho.

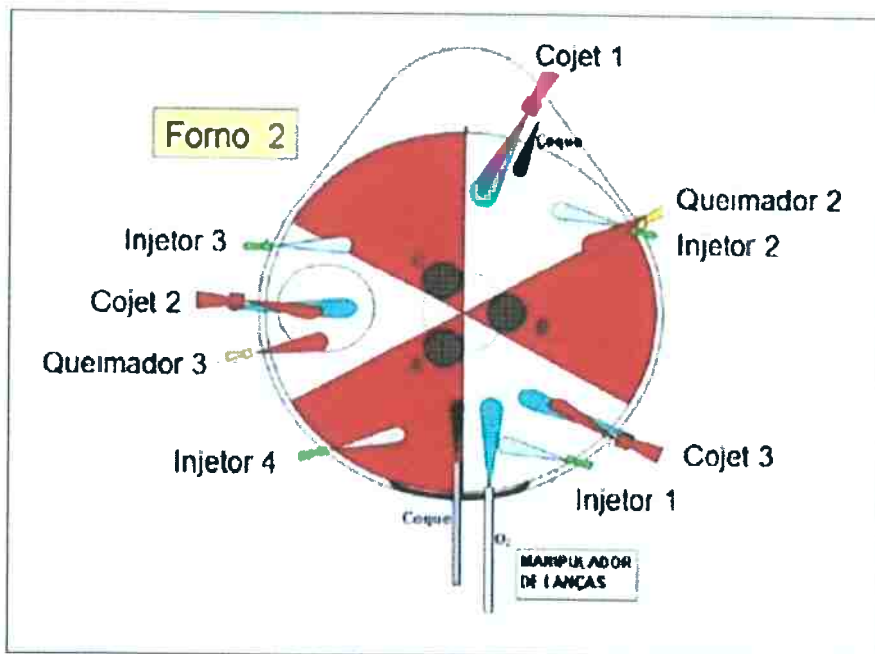


Figura 8- Layout térmico do forno. A área em vermelho é conhecida como área quente do forno devido à proximidade com os eletrodos [1].

Reações exotérmicas são utilizadas para fornecer parte da energia no forno elétrico. Algumas operações utilizam cerca de $40 \text{ Nm}^3/\text{t}$ de oxigênio em lanças. Na pós-combustão são utilizados $70 \text{ Nm}^3/\text{t}$. Cerca de 30 a 40% da energia total aplicada no FEA é proveniente de queimadores e lanças de oxigênio. Isso pode mudar de acordo com as fontes de ferro. Em alguns casos a energia elétrica pode chegar a equivaler menos de 50% da energia total utilizada no processo [8].

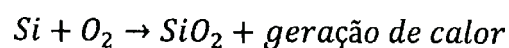
Primeiramente oxigênio era utilizado apenas como “desarborizador”, com adições de 3 a $8 \text{ Nm}^3/\text{t}$ [8]. A participação do oxigênio é necessária, pois provoca a combustão ou queima dos elementos presentes no forno [2].

Uma lança de oxigênio com uma taxa de $30 \text{ Nm}^3/\text{min}$ é equivalente a uma adição de energia de 11MW, baseada na reação de C para CO [8].

Contribuição do silício

O silício reage com o oxigênio da seguinte forma:

Equação 4



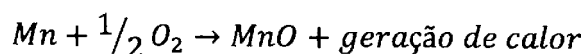
A sílica (SiO_2) gerada vai para a escória e o calor gerado acelera a fusão.

A escória é uma solução ou mistura de óxidos, composta, por exemplo, de cal (CaO) e sílica (SiO_2), que sobrenada o aço líquido. Ela precisa ter uma relação de cal e sílica adequada, chamada basicidade de acordo com a equação 1 [2].

Contribuição do manganês

A reação é simbolizada por:

Equação 5

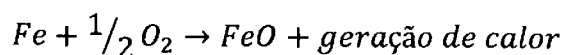


Da mesma maneira que a sílica o óxido de manganês vai para a escória e a energia libera ajuda na fusão da sucata.

Contribuição do ferro (Fe) e do carbono (C)

A reação do ferro com o oxigênio é:

Equação 6



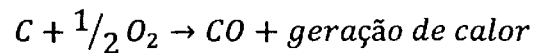
Este é o elemento que está no forno em maior quantidade (maior que 95%) [2].

O óxido de ferro (FeO) vai para a escória, por ter menor densidade que o aço. Então, quanto mais oxigênio for adicionado, maior será a quantidade de energia química gerada e maior a quantidade de FeO na escória [2].

Porém a escória do forno é retirada do forno durante a sua operação e, se tivermos muito FeO na escória, estaremos perdendo ferro e aumentando as perdas metálicas [2].

O carbono é um elemento que tem grande afinidade com o oxigênio, que reagindo com o mesmo e não permitindo uma grande quantidade de FeO formada. Esta reação é:

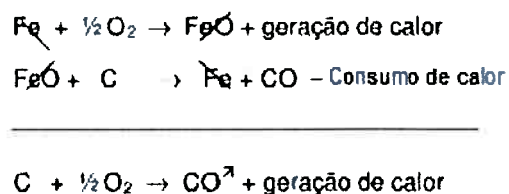
Equação 7



Esta reação pode ter origem no FeO.

No início da fusão o oxigênio reage primeiramente com o ferro, após o banho formado o FeO é reduzido pelo carbono do banho e é produzido o gás CO pelas reações descritas na equação 8 [8].

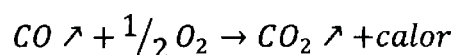
Equação 8



Sendo geração de calor na equação 6 igual a 6,0 KWh/Nm³ O₂ e a geração de calor na equação 7 igual a 2,8 KWh/Nm³ O₂ [8].

O gás CO é na verdade um gás que contém uma grande quantidade de calor, podendo ocorrer a seguinte reação da equação 9:

Equação 9



A reação da equação 9 é a de maior liberação de calor, e é nesta reação que é baseado o princípio da post combustion. Quando ela ocorre, existe uma liberação de calor muito grande, que é transferida para a carga metálica. Para aumentar a eficiência desta reação, são colocados injetores ao redor do forno, os quais devem ser colocados nas zonas frias do mesmo, possibilitando uma fusão homogênea da carga do forno [8].

A energia proveniente da lança de oxigênio é devida a duas reações exotérmicas, de oxidação do carbono e do ferro, e a agitação do banho com a

temperatura leva á uma composição homogênea. O rendimento do oxigênio esta na faixa entre 70 a 80% [9].

É evidente que se conseguem muito mais energia queimando ferro, porém seria um impacto negativo na produção, portanto há um limite ótimo no qual deve ser adicionado oxigênio a uma taxa de 30-40 Nm³ /t, a uma taxa de 2-4 KWh/Nm³ O₂ com uma média de 3,5 KWh/Nm³ O₂ [8].

O controle das quantidades de carbono e oxigênio pode ser feito pela quantidade de FeO na escória [2].

Em média, a contribuição de cada um destes elementos, mais a energia elétrica para a fusão e a elevação de temperatura, é a seguinte da tabela 3:

Tabela 3 - Contribuição de energia de cada elemento [2].

Entradas de energia no FEA	Elétrica	Química		
		C	Fe	Si,Mn, ...
	410 kWh/t	160kWh/t	30kWh/t	30kWh/t
	65%	25%	5%	5%
	630kWh/t			

É esperado que para cada Nm³ de oxigênio lançado, 0,75Nm³ irá reagir com o carbono e produzir 1,5Nm³ de CO [8].

Além disso, o carbono tem um papel metalúrgico de carbonizar o banho, ou seja, deixar um pouco de carbono no final da fusão, com os seguintes objetivos:

- Se no final da fusão houver carbono, em torno de 0,15%, a quantidade de FeO na escória será menor;
- Retirada de nitrogênio existente no aço, pela geração de bolhas de CO [2].

O controle de oxigênio não é fácil, pois depende de alguns fatores entre eles:

- A variação de ferrugem ou carepa (FeO) que entra nas carga que implica em variação na quantidade de carbono, necessária para a redução deste óxido;

- Interrupções no processo produtivo que causam variações nos níveis de oxidação;
- Variações nas quantidades de oxigênio injetadas por problemas operacionais, como por exemplo, falta de oxigênio ou vazamentos nos tubos [2].

2.5. Termodinâmica das reações

A constante de equilíbrio da reação carbono- oxigênio (equação 7) é dado por:

$$K = p_{CO}/a_C a_O \quad \log K = (1168/T) + 2,07$$

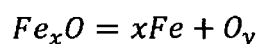
Onde a p_{CO} é em atmosferas e as atividades do carbono e do oxigênio são equivalentes as % de C e O em soluções de baixa concentrações [4].

Para uma dada pressão de CO, o produto $[\%C][\%O]$ diminui com o aumento da concentração de carbono. Para teores de carbono abaixo de 0,5%, a uma temperatura de 1600°C, o equilíbrio do produto $[\%C][\%O]$ é de 0,002 para 1 atm de CO. Para concentrações de carbono acima de 0,03%, o produto da reação é basicamente CO com uma pequena quantidade de CO₂. [7].

Estudos feitos por El-Kaddah e Robertson mostram que ao contrário do que se previa, que o carbono aumenta o coeficiente de atividade do oxigênio no ferro líquido. Porém os resultados de El-Kaddah e Robertson concordam com o valor de $[\%C][\%O] = 0,002$ para baixas concentrações de carbono [7].

A solubilidade do oxigênio no ferro líquido em equilíbrio com o óxido de ferro líquido, em temperaturas entre 1530-1700°C foi primeiro determinado por Taylor e Chipman [7]. Mais tarde, Dittin et al. estenderam este equilíbrio para temperaturas acima de 1960°C [7]. Todos os dados podem ser representados pela equação 10:

Equação 10



$$\text{Log}\{[O\%]/a_{FeO}\} = -(6380/T) + 2,765$$

Onde a_{FeO} é a atividade do óxido de ferro em relação ao $Fe_xO_{(1-x)}$ em equilíbrio com o ferro líquido; x aumenta de 0,98 em 1527°C para 1 em 2000°C. A solubilidade do oxigênio em ferro líquido em equilíbrio com amostras de escória

de CaO- FeO- SiO₃ podem ser estimadas pela atividade do FeO da equação 10[7].

Para uma determinada atividade de oxigênio, a relação Fe³⁺/Fe²⁺ na escória varia com a composição, por exemplo, aumenta com a basicidade. Ao representar o equilíbrio metal- escória, é de costume usar o ferro total (como óxido) nas escórias como %ΣFeO, 3%-8% MgO, 3%-8%MnO, 6%-26%ΣFeO, 15%-25%SiO₂, 1%-5% P₂O₅, ~1%Al₂O₃. E 0,1%-0,2%S. Para a composição de escória apresentada, o equilíbrio metal-escória em relação à reação carbono-oxigênio, pode ser representada pela seguinte relação para 1 atm de CO:

Equação 11

$$[\%CO][\%\Sigma FeO] \sim 0,25.$$

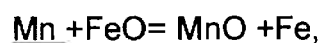
A definição de basicidade para escórias complexas é um tanto arbitrária. Se assumimos para escórias de aciaria que a concentração de CaO e MgO são equivalentes em base molar, e semelhantemente em base molar ½ P₂O₅ é equivalente a SiO₂, em termos de percentual de peso de óxidos, a basicidade da escoria B pode ser definida pela relação da equação 12:

Equação 12

$$B = [\%CaO + 1,4(\%MgO)] / [\%SiO_2 + 0,84(\%P_2O_5)].$$

A reação do manganês entre o metal e a escória pode ser representada pela equação 13:

Equação 13



Onde a relação de equilíbrio para uma temperatura constante é, em relação de peso em porcentagem,

Equação 14

$$K_{Mn} = (\%MnO) / [\%Mn](\%\Sigma FeO).$$

Em ligas de aço, a atividade do manganês é proporcional a esta concentração. Porém, a relação dos coeficientes de atividade dos óxidos $\gamma_{\text{MnO}}/\gamma_{\text{FeO}}$ aumentam com o aumento da basicidade da escória. Por essa razão a relação de equilíbrio k_{Mn} diminui com o aumento da basicidade da escória [8].

Reavaliando os dados fornecidos por Turkdogan [9], obtém-se para a relação de equilíbrio k_{Mn} em escórias básicas de aciaria:

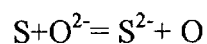
$$K_{\text{Mn}} = 6/B.$$

Sendo assim, para uma basicidade B dada, o equilíbrio da distribuição de manganês entre metal e escória é diretamente proporcional a concentração de óxido de ferro [7].

Por causa da larga diferença, mas energias livres de formação de SiO_2 e FeO e a baixa atividade do SiO_2 em escórias básicas, o silício no aço é rapidamente oxidado durante o processo. A quantidade de silício presente no aço é menos que 0,005% [7].

Podemos representar a troca do enxofre - oxigênio entre o metal e a escória pela reação da equação 15:

Equação 15



Para o qual a relação de equilíbrio é dada por:

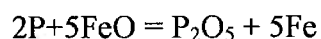
Equação 16

$$K_s = \{(\% \text{S})/[\% \text{S}]\}(\% \Sigma \text{FeO}).$$

O efeito da composição da escória no coeficiente de atividade do enxofre e no óxido de ferro na escória é tal que a constante de equilíbrio k_s diminui com a diminuição da basicidade da escória. Estudos mostram que k_s é também função da soma $\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5$ na escória [7].

A reação do fósforo com o metal e a escória é representada pela equação 17:

Equação 17



$$k_p = (\%P_2O_5)/[\%P]^2(\%\Sigma FeO)^5.$$

Balajiva and co-workers fizeram uma investigação detalhada dessa relação e acharam que em escórias complexas a constante de equilíbrio k_p aumenta com a diminuição de temperatura e aumenta a concentração de óxido de cálcio na escória. Esta reação de equilíbrio é representada pela seguinte relação empírica, baseados nos estudos de Balajiva and co-workers [7]:

$$\text{Log } K_p = 10,78(\%CaO) - 0,00894t - 6,245.$$

Onde t é a temperatura [7].

2.6. Escória

A escória é uma solução ou mistura não metálica formada por óxidos, como o óxido de cálcio (CaO) e a sílica (SiO₂). A escória encontra-se sobrenadante ao aço [13].

A origem da escória está no processo de fabricação e na composição química do aço que se deseja vazar do forno para a panela. O processo de fabricação de aço é um gerador de óxidos, que são provenientes da reação chamada de “oxidação de elementos químicos com o oxigênio que existe no aço líquido”. Os principais óxidos gerados são FeO – Wustita, MnO, SiO₂, Cr₂O₃, Cr₃O₄ e P₂O₅. A escória deve incorporar esses óxidos formados visando com que o aço atinja a composição química e protegendo o arco elétrico e diminuindo o desgaste dos refratários [12].

O ferro presente no aço líquido reage com o oxigênio injetado formando o FeO. Os óxidos formados sempre estarão em equilíbrio com uma quantidade de oxigênio dissolvido no banho. Essa quantidade pode ser medida, e se chama oxigênio ativo. À medida que for colocado oxigênio no banho, mais óxidos serão formados (FeO), até o limite de dissolução do oxigênio no banho, que é de 2300 ppm a 1600°C [12].

O óxido de ferro, estando líquido e tendo menor densidade que o aço líquido, sobe para a escória e é absorvido por ela. Assim, permite que mais oxigênio seja dissolvido no aço, formando mais óxido de ferro líquido. Da mesma forma

que o ferro é oxidado, outros elementos (Si, Mn e P, por exemplo) também são oxidados, subindo para a escória [12].

Alguns desses elementos formam óxidos com mais facilidade do que outros. Esta "facilidade" pode ser entendida no diagrama de Ellingham, como mostra a figura 9.

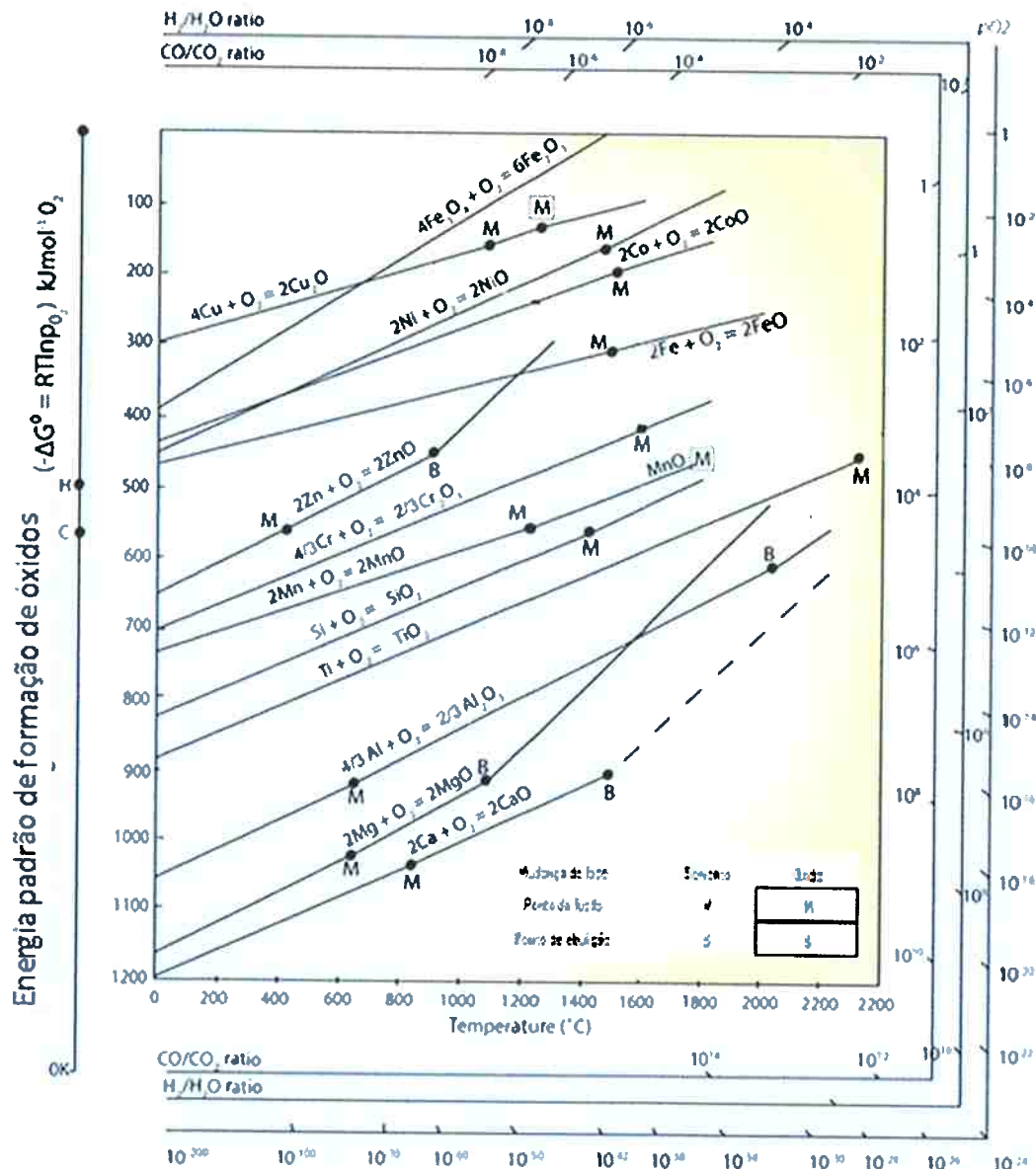


Figura 9 - Diagrama de Ellingham (Ellingham H. J. T., J Soc Chem Ind (London) 63 125 (1944)).

Ao plotar-se um dado sistema metálico irá oxidar reduzir ou permanecer como um óxido ou metal puro, o diagrama de Ellingham não indica a taxa quantitativa

da reação, apenas a probabilidade de sua ocorrência. Podemos utilizar o diagrama de Ellingham para determinar a relativa facilidade através do qual o metal pode ser oxidado ou um óxido pode ser reduzido. Metais que se encontram no alto do diagrama são mais fáceis de serem reduzidos (metais nobres), neste caso estamos estudando os metais que tem mais facilidade de serem oxidados, portando estão localizados na base do diagrama.

Para uma pressão de oxigênio (P_{O_2}) superior ao valor de equilíbrio a uma dada temperatura, o metal será oxidado. Por outro lado, para uma pressão parcial de oxigênio, que é inferior ao valor de equilíbrio a uma dada temperatura, o metal será reduzido [14].

Os óxidos formados normalmente são líquidos, mas o carbono se oxida na forma de gases CO e/ou CO_2 , fazendo a escória ficar espumosa. A escória não é formada apenas pela oxidação dos metais presentes no banho metálico. Muitas vezes a sucata carregada no forno apresenta uma quantidade relativa de óxidos, principalmente provenientes de carepa ou ferrugem, que contém FeO e terra que possui SiO_2 em grandes quantidades. [12].

As escórias possuem várias características, dentre elas temos como as mais importantes a basicidade a viscosidade e a densidade.

2.6.1 Basicidade

Os óxidos presente na escória podem ser divididos entre óxidos básicos ou ácidos. A tabela 4 mostra alguns óxidos básicos e óxidos.

Tabela 4 - Relação de óxidos básicos e ácidos.

Óxidos Básicos	Óxidos Ácidos
CaO	SiO_2
MgO	Al_2O_3
FeO	P_2O_5
MnO	Cr_2O_3

A relação da quantidade destes óxidos presentes na escória são o que fornecem a basicidade da escória.

Como citado anteriormente iremos utilizar a basicidade binária, na qual consideramos apenas a relação de cal e sílica.

$$B = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

Escórias que apresentam esta relação maior do que 1,5 são chamadas de escórias básicas, e quando a relação é menor do que 1,5 a escória é ácida [12].

2.6.2 Viscosidade

A viscosidade está relacionada com a fluidez da escória, quanto mais viscosa for a escória, menos fluida ela será.

A viscosidade da escória no forno elétrico influi no processamento do aço, principalmente na velocidade das reações. Quanto menor a viscosidade da escória maior a velocidade das reações químicas no aço, que por consequência desgasta mais os refratários. O ideal seria que nas laterais a escória fosse mais viscosa e menos viscosa no centro do forno [12].

A escória é influenciada pela temperatura, quanto maior a temperatura, menor será a viscosidade da escória; e pela composição química dela com a presença de compostos fluidizantes, como fluorita (CaF_2), óxido de ferro (FeO), óxido de Manganês (MnO), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Os compostos que aumentam a viscosidade da escória são chamados de refratários, são eles óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) [12].

2.6.3 Densidade

As escórias possuem densidade entre 2 a $4g/cm^3$, enquanto o aço possui densidade próxima de $7g/cm^3$. Esta variação da escória é devido a sua composição. Uma escória com densidade de $3,6g/cm^3$ apresenta a seguinte composição: 40% CaO , 30% FeO e 30% SiO_2 a $1600^\circ C$.

A tabela 5 mostra a composição química típica de uma escória empregada em fornos elétricos para fabricação de aço baixo/médio carbono [12].

Tabela 5 - Composição típica de escória para aço baixo e médio carbono [13].

Composto	%
CaO	35-50
SiO ₂	10-25
FeO	20-45
MgO	5-15
Al ₂ O ₃	4-12
MnO	4-10
P ₂ O ₅	<1
CaF ₂	<1

Escórias básicas

Em 1945 Temkin propôs uma teoria aplicada a “Escórias Básicas” que já vinha sendo notada por alguns pesquisadores. Essa Teoria ficou conhecida como “A Teoria Iônica das Escórias”. Temkin postulou a existência de íons no lugar de moléculas. Lançou um novo conceito de basicidade, medido pelo número de íons O^{2-} livres existentes na escória. Essa teoria apresentou-se mais consistente em relação à teoria molecular, mas havia alguns princípios metalúrgicos que ainda não estavam bem esclarecidos. Foi então que Flood e Grjotheim consagraram a teoria iônica. Através de um postulado capaz de estimar a constante de equilíbrio para uma reação entre metal e escória, por intermédio de outras constantes que envolvem reações binárias simples [14].

A solubilidade do oxigênio no ferro, de acordo com os estudos na literatura feita por Cruz, é de 0,23% a 1600°C, para uma escória saturada de FeO, isto é para o equilíbrio da reação $[Fe] + [O] \rightarrow (FeO)$. Este elemento apresenta um ligeiro desvio negativo em relação ao comportamento ideal nas soluções diluídas.

A sua saturação no ferro líquido em equilíbrio com o (FeO), conforme a reação citada é dada pela equação 18:

Equação 18

$$\log[\%O_s] = -6320/T + 2,734$$

Sendo %O_s = solubilidade máxima de oxigênio no ferro líquido a temperatura T (K) numa escória saturada de (FeO) [16].

O comportamento dos elementos como, por exemplo, o oxigênio no ferro líquido, é influenciado pelo efeito de outros elementos de liga nos aços como: carbono, silício, manganês, alumínio e cromo. Estes efeitos podem ser avaliados através dos coeficientes de interações (e_i^j), conforme apresentado na tabela 6:

Tabela 6- Coeficientes de interação e_i^j dos elementos no aço a 1600°C ($\times 10^{-2}$).

i/j	C	Si	Mn	O	P	Al	Cr
O	-45	-15	0	-20	-3,3	-120	-6,4

Aplicando-se a expressão desenvolvida por Wagner, em sistemas multicomponentes para determinação do coeficiente de atividade Henryana (f_i), tem-se:

Equação 19- Coeficiente da atividade Henryana.

$$\log f_i = e_i^i * \%i + e_i^j * \%j + \dots + e_i^n * \%n$$

Onde:

f_i = Coeficiente de atividade Henryana (para o padrão 1% em peso de i) do componente i na liga complexa.

e_i^j = Coeficiente de interação.

$i\%$, $j\%$ = Porcentagem do elemento de liga.

Assim, o coeficiente de atividade Henryana para o oxigênio dissolvido no aço seria dado por:

Equação 20

$$\log f_0 = - 0,45 * (\%C) - 0,15 * (Si) - 0,20(\%O) - 0,033 * (\%P) - 1,2 * (Al) \\ - 0,064 * (\%Cr)$$

Escória oxidante

Após o primeiro cestão, utiliza-se oxigênio para cortar a sucata, facilitando a sua fusão. É nesse momento que a escória já se trona oxidante, pois já ocorre a oxidação de alguns metais [12].

Posteriormente, após o aço já estar líquido, o oxigênio é injetado no forno, criando condições oxidantes no banho. Um indicador do nível de oxidação da escória é FeO + MnO. Quanto mais desta mistura estiver presente na escória, mais oxidante ela estará [12].

Escória espumante

A geração de gases é de grande importância para se obter uma escória espumante. O principal gás é CO, seguido do CO₂, já que é formado em menor quantidade.

O CO pode ser produzido de duas formas: Ou pela reação do carbono injetado no aço com o oxigênio, ou da reação do carbono com o óxido de ferro, liberando CO.

Portanto, se tivermos um controle do FeO da escória, teremos uma boa escória espumante.

Quanto menor o tamanho das bolhas de gás formadas, mais estável será a escória espumante.

O gás CO, mas em pequenas quantidades, também pode ser obtido através da injeção de oxigênio que reage com o carbono, porém esse oxigênio injetado também irá reagir com o ferro presente no banho e formar o óxido de ferro, que aumenta as perdas metálicas. Além disso, estas reações geram muito calor e aumentam a temperatura do banho que aumenta a quantidade de FeO [12].

A escória espumante é obtida com a injeção de carbono e oxigênio no banho, mas é importante que se tenha um controle das quantidades injetadas, para que se tenha um equilíbrio para se manter constante a quantidade de FeO. Uma relação ideal entre $O_2(m^3/min)$ e $C(kg/min)$ seria de 0,85 [12].

2.6.4 Equilíbrio metal-escória na produção de aço

A reação de equilíbrio líquido metal-escória tem sido estudado extensivamente, ambos experimental e teórico são aplicados os princípios termodinâmicos e físico e químico.

Em avaliações dos dados experimentais das reações metal-escória, fica evidente que as constantes de equilíbrio das reações metal-escória varia com a composição da escória em diferentes maneiras, dependendo do tipo de reação. Para algumas reações a basicidade da escória é um parâmetro chave a ser considerado; para outras reações o parâmetro chave pode ser a concentração em massa de óxidos ácidos e básicos presentes na escória [9].

Oxidação do ferro.

A análise dos dados do equilíbrio metal-escória, em termos da atividade e fração molar do óxido de ferro, pode ser escrito como uma simples relação entre a fração mássica $[ppm O]/(\%FeO)$ e a soma dos óxidos ácidos $\%SiO_2 + 0,84 \times \%P_2O_5$, como representado na figura 10, assim como uma relação entre a fração mássica $[ppm O]/(\%FeO)$ e a basicidade da escória como mostra a figura 11 [9].

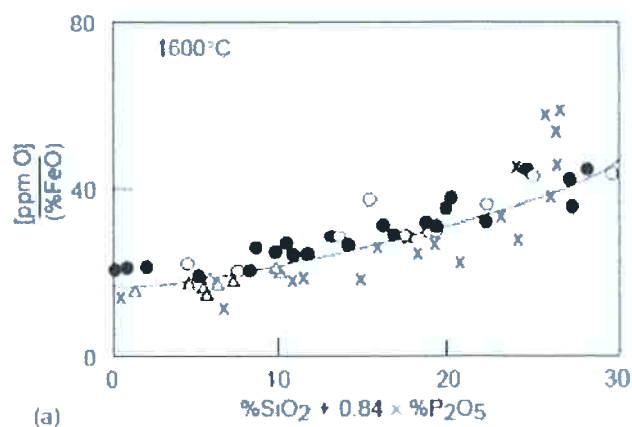


Figura 10 - Razão de Equilíbrio $[ppm O]/(\%FeO) \times \%Si + 0,84 \times \%P_2O_5$ [9].

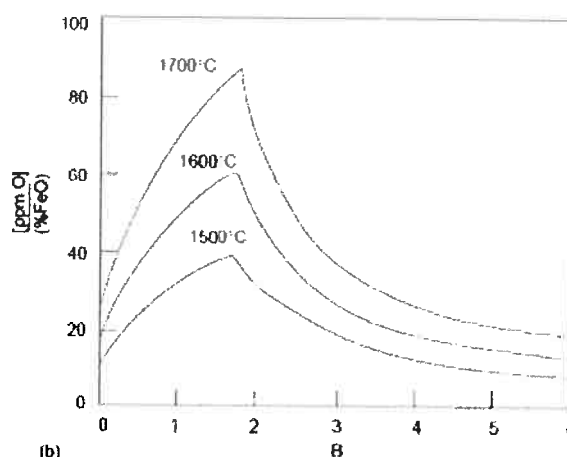


Figura 11- Razão de Equilíbrio [ppm O]/(%FeO) x Basicidade [9].

3. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo relacionar e comparar os dados de corridas de aço com a teoria já existente sobre o assunto em relação à oxidação do banho durante o vazamento para o forno panela em relação à composição da escória e sua basicidade.

4. Materiais e Métodos

Foram analisados dados de corridas de aço, médio carbono, de forno a arco elétrico de uma aciaria do estado de São Paulo. Estes dados serão comparados com os dados da literatura. Foram coletados dados de temperatura, oxidação do banho e composição química da escória proveniente destas corridas.

Estudou-se a solubilidade do teor de oxigênio dissolvido no banho de metal líquido e em relação a quantidade de óxido de ferro presente na escória. Também foram avaliadas as relações de ppm de oxigênio do banho com a basicidade da escória de acordo os dados da literatura.

4.1. Padrão de operação

O aço 1024D segue um padrão de operação, no qual se esperam atingir a composição química do aço, quantidade de oxigênio presente no banho e

temperatura de vazamento do forno elétrico para o forno panela. Os dados se encontram nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Composição química do aço 1024D

Elemento	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni	%Mo	%V
mín	0,22	0,10	0,55						
máx	0,28	0,35	0,85	0,050	0,050	0,300	0,300		0,500
obj	0,25	0,15	0,60						
Elemento	%Cu	%Sn	%Al	%Ti	%Nb	%Zn	%Pb	Mn/Si	
mín								> 3,0	
máx	0,400	0,150	0,020	0,010	0,050	0,050	0,010		
obj									

Tabela 8 - Atividade do oxigênio no banho

RESTRICÇÕES	ATIVIDADE DE OXIGÊNIO	< 850	ppm
	P de vazamento	< 0,020	%
	RINSAGEM	ARGÔNIO	

Tabela 9 - Temperaturas de Vazamento do FEA para FP.

TEMPERATURA DE VAZAMENTO		
MÍNIMA	1620	°C
OBJETIVO	1630	°C
MÁXIMA	1650	°C

4.2. Dados

Foram coletados dados de composição da escória, após o vazamento do forno elétrico e os dados de temperatura e oxidação do banho metálico também referente ao vazamento do aço.

Os dados correspondem aos meses de março, abril e junho do ano 2013. Os dados coletados correspondem a 3% do total de corridas neste período de tempo, devido ao fato de não serem todas as corridas que se há análise de escória. Os dados de ppm O, foram coletados com medidor celox.

Tabela 10 - Dados de Temperatura e oxidação do banho.

Corrida	Temperatura (°C)	[O] PPM
21139245	1627	499
21139255	1614	576
21139262	1650	618
21139265	1617	511
21139270	1653	772
21139275	1637	498
21139280	1632	670
21139319	1618	645
21139405	1637	466
21139410	1597	421
21139430	1624	596
21139462	1622	522
21139475	1652	674
21139565	1618	506
21139572	1624	770
21139585	1624	707
21139590	1661	769
21139594	1629	525
21139675	1630	620
21139972	1610	479
21141175	1646	799
21141246	1633	674
21141247	1628	375
21141248	1624	524
21141250	1633	681

Tabela 11 - Composição Química da Escória.

CaO	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	S	F
36,47	12,52	27,67	4,67	10,02	3,89	0,99	0,62	0,09	3,69
38,10	12,37	26,87	4,40	10,29	3,99	1,00	0,61	0,10	3,66
38,60	11,57	25,84	4,19	10,88	3,71	1,02	0,60	0,09	3,64
34,65	12,06	31,04	4,63	9,62	3,77	0,89	0,61	0,06	3,70
33,93	12,12	31,81	4,71	9,73	3,77	0,91	0,62	0,13	3,70
36,79	13,57	24,09	4,43	11,56	4,19	0,97	0,59	0,08	3,58
33,76	11,43	34,01	4,57	9,10	3,38	0,85	0,59	0,08	3,70
32,64	11,99	31,55	4,91	9,84	3,52	0,98	0,76	0,10	3,68
31,49	11,24	26,25	4,81	6,84	3,48	0,87	0,64	0,04	3,44
33,28	12,23	30,36	4,90	10,18	3,90	0,95	0,61	0,09	3,67
33,38	12,43	23,32	5,14	7,08	4,53	0,93	0,65	0,03	3,47
28,74	10,66	37,40	4,32	9,10	4,33	0,76	0,60	0,06	3,75
33,08	11,60	32,33	4,41	9,94	4,19	0,77	0,62	0,07	3,71
34,32	13,69	27,66	4,83	9,92	4,12	0,79	0,56	0,08	3,63
32,47	12,69	29,27	4,95	10,79	5,76	0,74	0,61	0,09	3,73
31,49	11,97	32,62	4,37	9,73	5,56	0,70	0,59	0,07	3,65
29,45	11,44	35,66	4,39	9,32	5,51	0,69	0,58	0,06	3,66
33,00	12,85	27,82	4,66	10,46	5,84	0,71	0,58	0,06	3,62
33,44	12,76	30,53	4,79	11,30	4,11	0,71	0,59	0,11	3,84
33,00	12,11	24,93	4,55	8,05	3,45	0,71	0,62	0,11	1,37
32,03	11,47	39,51	4,85	6,91	3,67	1,06	0,66	0,10	0,26
35,64	13,27	33,23	4,86	7,12	3,53	1,08	0,65	0,08	0,31
35,04	13,42	34,59	4,87	7,19	3,60	1,12	0,65	0,08	0,29
35,65	13,37	33,50	4,86	6,94	3,55	1,11	0,66	0,12	0,24
33,15	12,97	38,47	4,83	6,52	3,08	1,08	0,66	0,15	0,34

Alguns óxidos da escória apresentam algumas semelhanças e podem ser “agrupados” para uma melhor visualização e entendimento, principalmente se foram analisados em diagramas ternários, como segue na tabela 12.

Tabela 12- Composição da escória óxidos com alguma "semelhança"

CaO+MgO	SiO₂+P₂O₅	FeO+MnO
46,48	13,51	32,34
48,39	13,37	31,27
49,48	12,59	30,03
44,27	12,95	35,67
43,66	13,03	36,52
48,35	14,55	28,52
42,87	12,29	38,58
42,47	12,97	36,46
38,33	12,10	31,06
43,46	13,18	35,26
40,46	13,35	28,47
37,84	11,41	41,72
43,02	12,37	36,74
44,24	14,48	32,49
43,26	13,42	34,22
41,22	12,68	36,99
38,77	12,12	40,04
43,46	13,55	32,47
44,74	13,46	35,32
41,05	12,82	29,48
38,94	12,53	44,36
42,76	14,35	38,08
42,23	14,54	39,46
42,59	14,48	38,36
39,67	14,05	43,30

Tabela 13- Dados de basicidade da escória e relação de ppm de oxigênio por %FeO na escória.

Basicidade	FECH (Fechamento)	FeO + MnO	SiO ₂ + 0,84P ₂ O ₅	[ppmO]/(%FeO)
2,91	100,62	32,34	13,35	18,03
3,08	101,38	31,27	13,21	21,44
3,34	100,13	30,03	12,42	23,92
2,87	101,03	35,67	12,80	16,46
2,80	101,42	36,52	12,88	24,27
2,71	99,86	28,52	14,39	20,67
2,95	101,48	38,58	12,15	19,70
2,72	99,96	36,46	12,82	20,44
2,80	89,08	31,06	11,96	17,75
2,72	100,16	35,26	13,03	13,87
2,69	90,95	28,47	13,20	25,55
2,70	99,73	41,72	11,29	13,96
2,85	100,72	36,74	12,24	20,85
2,51	99,60	32,49	14,35	18,29
2,56	101,09	34,22	13,30	26,31
2,63	100,76	36,99	12,56	21,67
2,58	100,74	40,04	12,01	21,57
2,57	99,60	32,47	13,44	18,87
2,62	102,16	35,32	13,35	20,31
2,73	0,00	29,48	12,71	19,21
2,79	100,52	44,36	12,36	20,23
2,69	99,76	38,08	14,18	20,29
2,61	100,84	39,46	14,36	10,84
2,67	99,99	38,36	14,30	15,64
2,56	101,24	43,30	13,87	17,70

A tabela 9 mostra os valores de temperatura e oxidação do banho no vazamento para cada corrida. As tabelas 11 e 13 mostram os dados de escória e basicidade para as mesmas corridas da tabela 9.

5. Resultados e Discussões

Os dados das corridas de aço foram analisados em faixas de temperatura e faixas de basicidade para se encontrar a melhor relação.

As faixas de temperaturas analisadas foram:

- I- 1586-1620 (°C)

II- 1622 -1641(°C)

III- 1642- 1661 (°C)

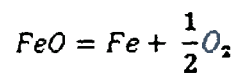
E a basicidade binária foi analisada em apenas duas faixas:

I- 1,59 – 2,50

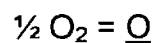
II- 2,51-3,34

Primeiramente comparou-se os valores de FeO em função do ppm O, nas 3 faixas de temperaturas

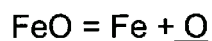
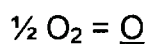
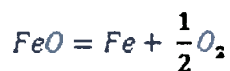
A relação entre a atividade de FeO na escória e o teor de oxigênio dissolvido no aço pode ser analisado, pelas reações (para uma temperatura de 1650°C):



$$\Delta G^\circ = 62050 - 14,95 T \text{ (cal)}$$



$$\Delta G^\circ = -28000 - 0,69T \text{ (cal)}$$



$$\Delta G^\circ = 34050 - 15,64T \text{ cal}$$

$$\Delta G^\circ = 3974,24 \text{ cal}$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln (a_O / a_{FeO})$$

$$R = 1,987 \text{ cal/K. mol}$$

$a_O / a_{FeO} = 0,35$

Colocando-se em um gráfico obtém-se uma reta teórica para comparação com os dados experimentais, considerando a atividade do oxigênio como sendo sua concentração e a atividade do FeO segundo a lei de Rault, com comportamento ideal.

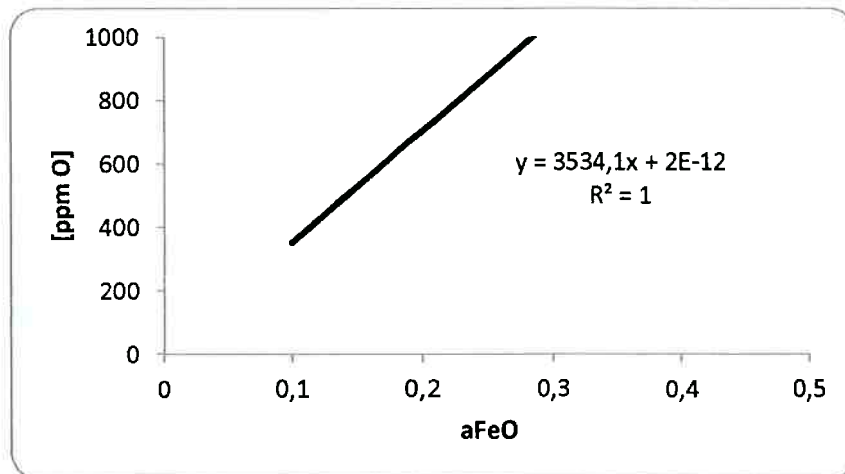


Figura 12 - Relação teórica [ppmO] x a_{FeO} .

Colocando os dados das corridas nesta relação para as três faixas de temperaturas e duas faixas de basicidades encontraram-se os seguintes resultados:

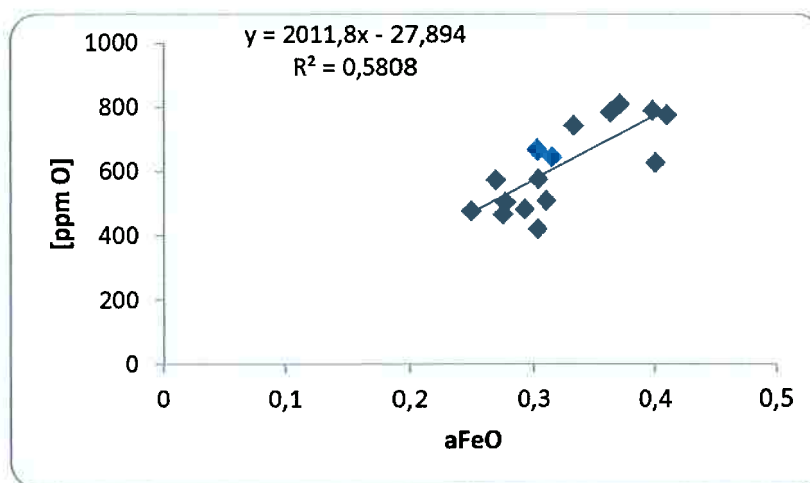


Figura 13 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} na escória para temperaturas I.

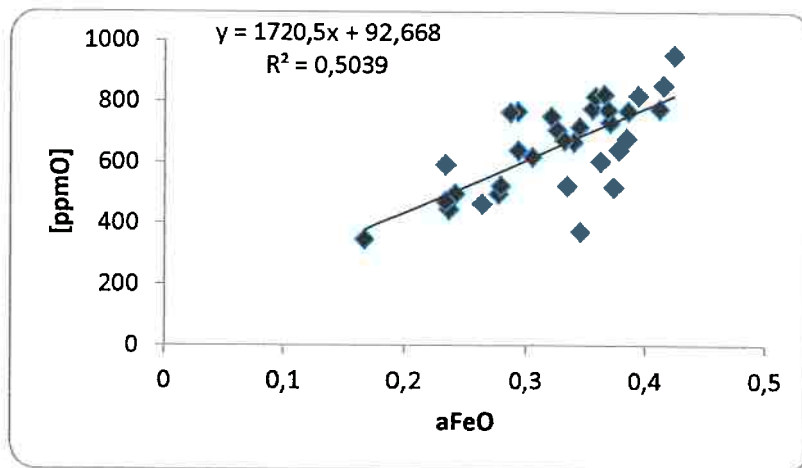


Figura 14 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} para temperaturas II.

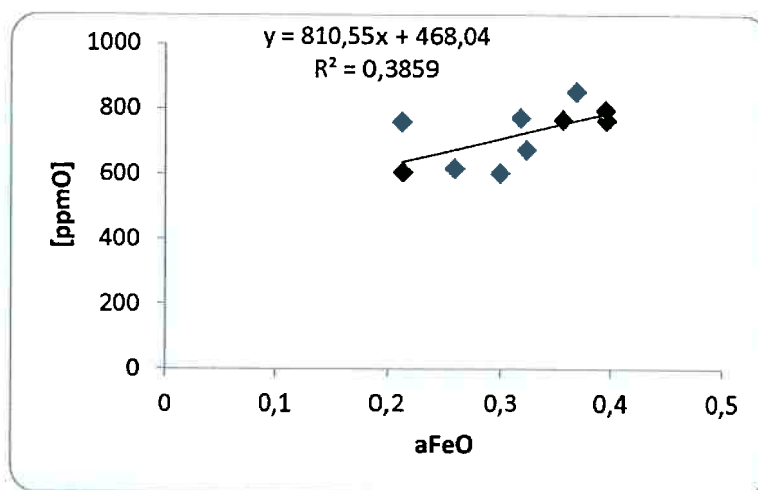


Figura 15 - Dados de oxidação do banho e a_{FeO} da escória para temperaturas III.

Os gráficos das figuras 13, 14 e 15 mostram os coeficiente de correlação para a relação de oxidação do banho e a quantidade de FeO no banho metálico, que não apresentaram uma boa relação com valores entre 0,3 e 0,5. Pode-se observar também que o coeficiente angular, das retas obtidas dos pontos experimentais, diminui com o aumento da temperatura.

Colocando os dados das corridas sobre a curva teórica da figura 12, obteve-se o gráfico da figura 16, abaixo.

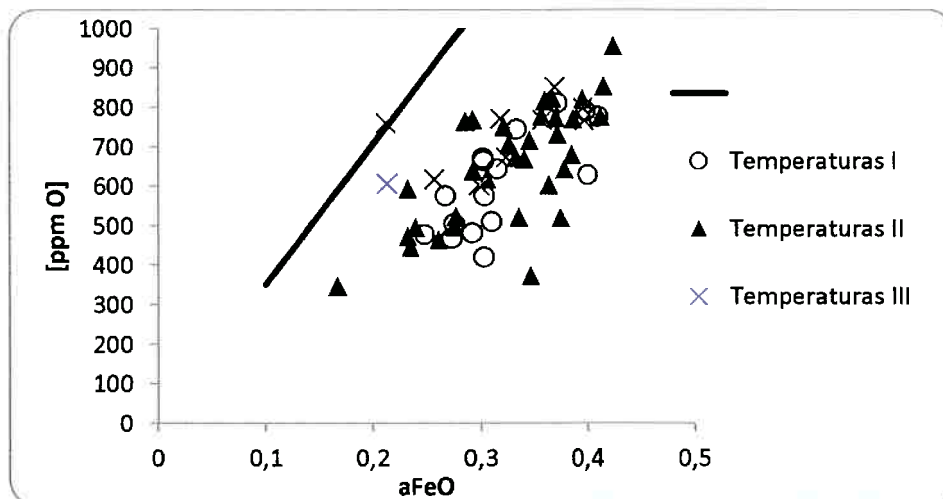


Figura 16 – Gráfico de comparação dos dados das corridas com linha teórica.

O gráfico da figura 16 mostra que os dados das corridas apresentam uma relação aproximada a da reta teórica, os dados ficaram um pouco abaixo do esperado pela curva teórica.

Observa-se que os valores experimentais do teor de oxigênio são inferiores aos esperados, indicando que a atividade do FeO nas escórias não seria menor do que a teórica.

Comparando-se os dados de oxidação do banho em relação à porcentagem de FeO na escória para duas faixas de basicidade, obteve-se os seguintes gráficos abaixo.

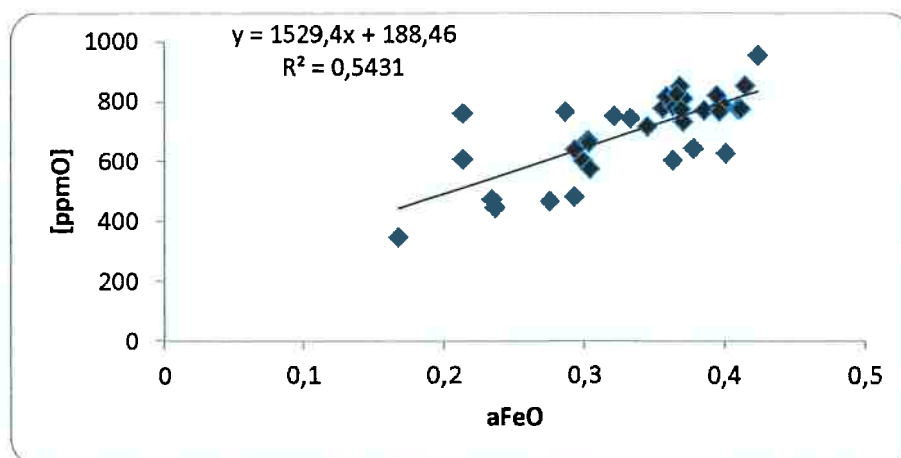


Figura 17 - Relação de ppm O₂ e a_{FeO} para basicidade I.

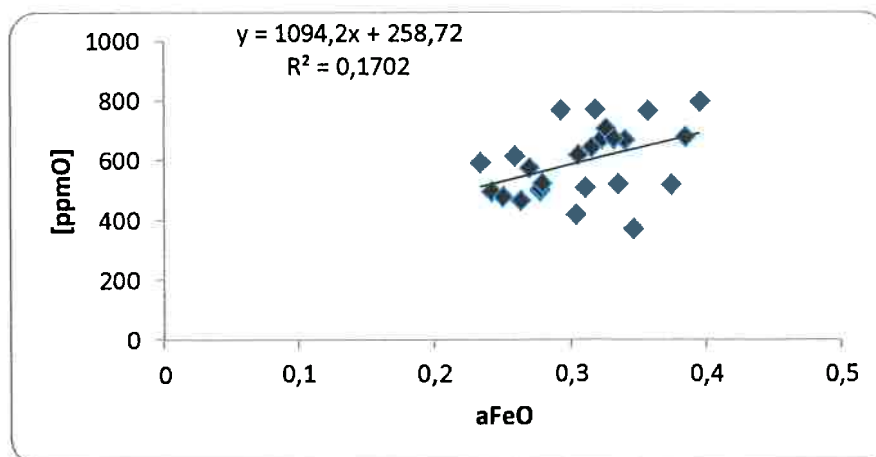


Figura 18 - Relação de ppm O2 e a_{FeO} para basicidade II.

Os gráficos das figuras 17 e 18 mostram que não existe correlação entre os dados de oxidação do banho e %FeO, assim como nos dados de para as faixas de temperatura. Para as faixas de basicidades, o coeficiente angular das retas também diminui com o aumento da basicidade.

Para uma determinada quantidade de óxido de ferro a oxidação do banho encontra-se um pouco abaixo do teórico, o ferro estaria sendo consumido pelo oxigênio e não estaria retornando para o banho, como a atividade do FeO aumenta com a basicidade, diz-se que a basicidade estaria um pouco acima do esperado.

A atividade do FeO depende da composição da escória, como pode ser verificado na figura 19 a seguir:

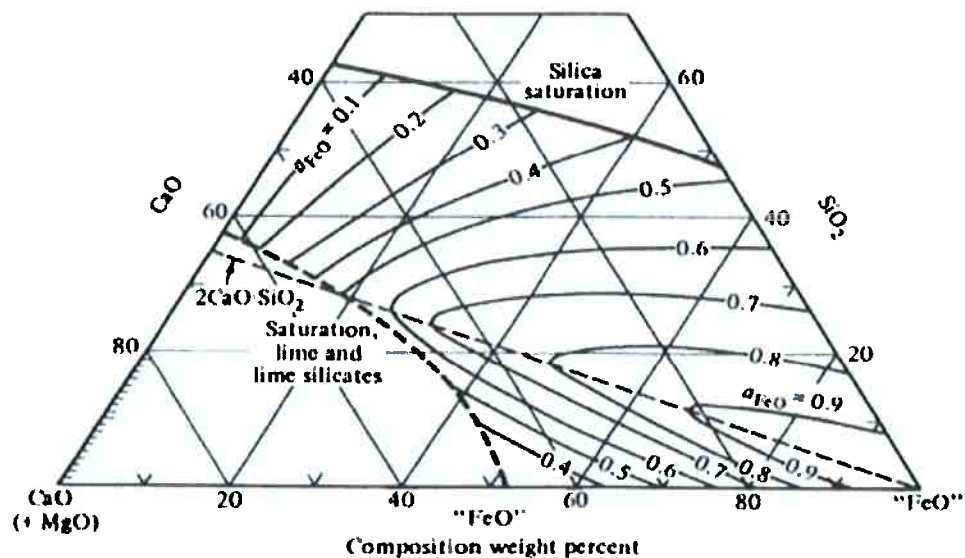


Figura 19- Atividade do FeO em escória de SiO_2 -CaO-FeO em equilíbrio com o ferro a 1600°C . [15]

Observa-se que a atividade do FeO aumenta com a basicidade da escória. É usual levar em conta a composição da escória através dos gráficos das figuras 10 e 11.

O primeiro gráfico compara a relação descrita acima com $\%\text{Si} + 0,84\%\text{P}_2\text{O}_5$, que são os óxidos ácidos da escória.

Primeiramente relacionaram-se estes dados para as três faixas de temperaturas determinadas anteriormente.

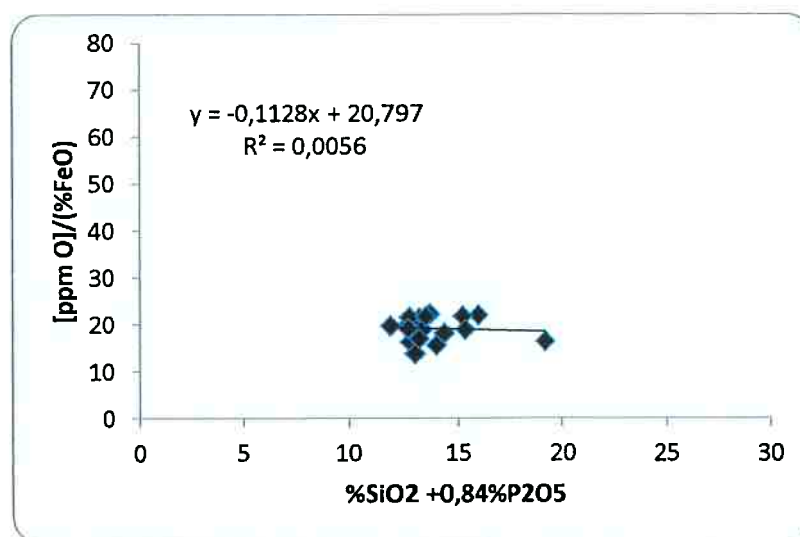


Figura 20 - Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\%\text{FeO})$ x óxidos ácidos para temperaturas I.

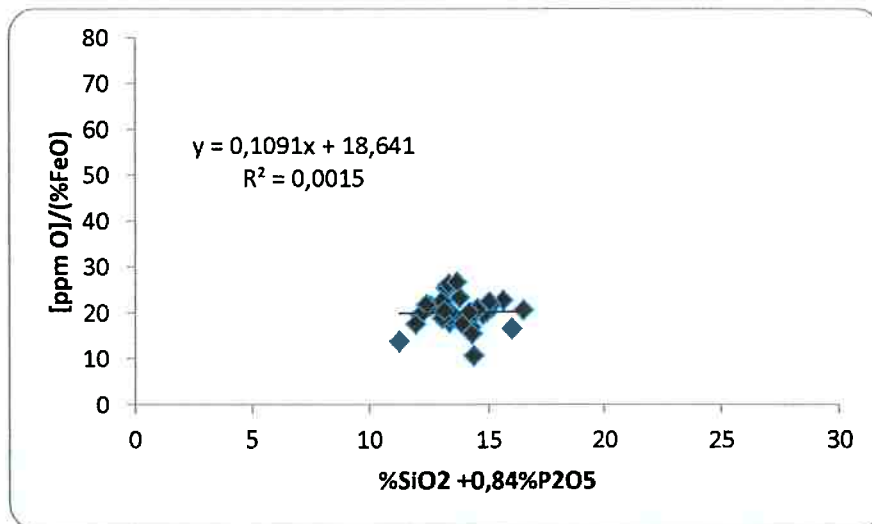


Figura 21- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x óxidos ácidos para temperaturas II.

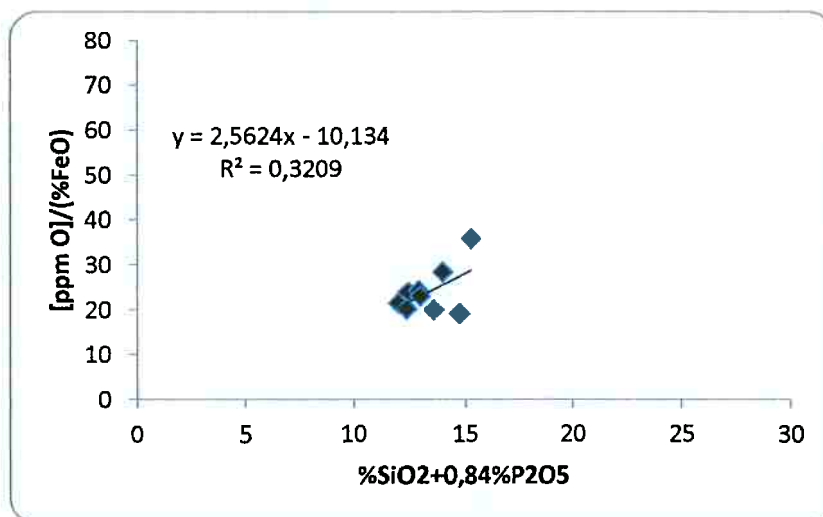


Figura 22- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x óxidos ácidos para temperaturas III.

Os gráficos das figuras 20, 21 e 22 mostram o coeficiente de correlação entre a relação de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$, estes coeficientes foram parecidos para as figuras 20 e 21 e diferente para a figura 22. Para as figuras 20 e 21 o coeficiente angular das retas ficaram próximos para as duas faixas de temperatura, porém para a terceira faixa de temperatura, figura 22, o coeficiente angular foi maior.

Colocando estes dados no gráfico da literatura, temos o seguinte gráfico, figura 23.

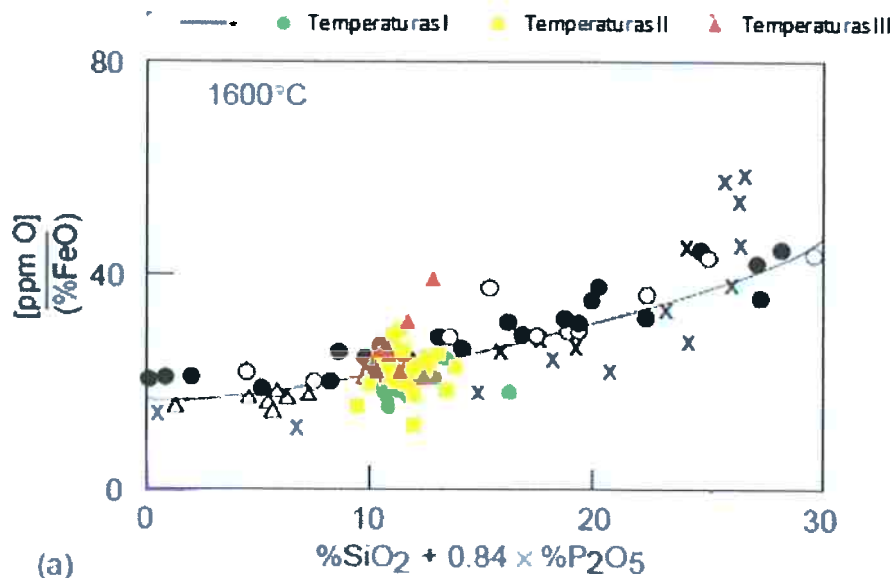


Figura 23- Dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ em comparação com dados da literatura [9 - modificado].

Os dados se encontram numa faixa de 0 a 40 para $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ e de 10 a 20 para as quantidades de óxidos ácidos na escória.

A figura 23, mostra dados de experimentos da literatura e por cima foram colocados os dados coletados na usina que ficaram próximos da reta teórica, com alguns pontos mais distantes.

Os dados anteriormente analisados também foram comparados para as duas faixas de basicidade estipuladas.

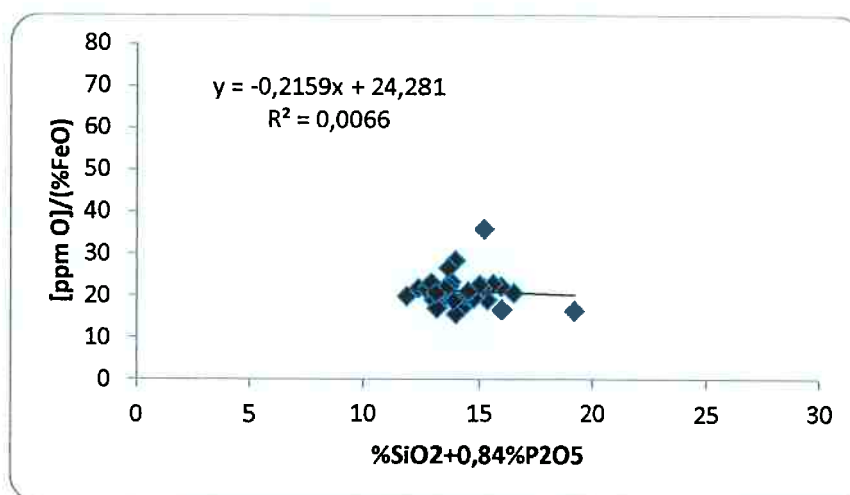


Figura 24- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{óxidos ácidos}$ para basicidade I.

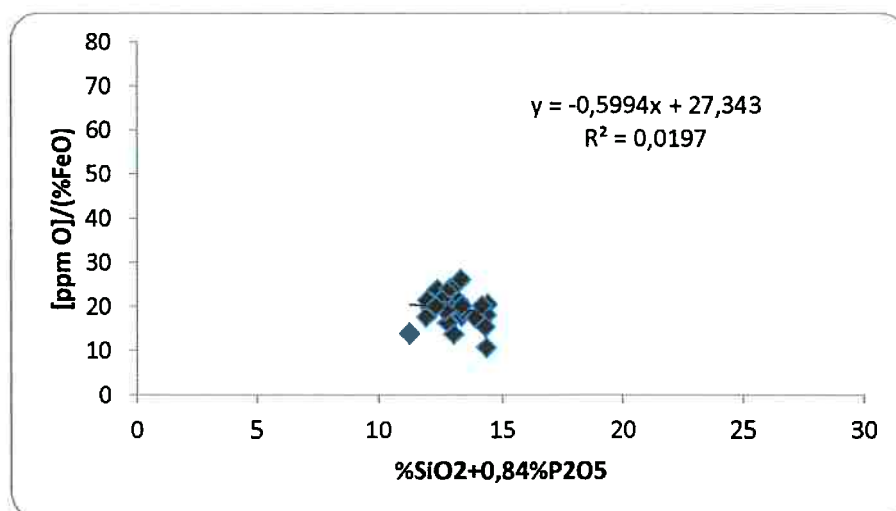


Figura 25 - Gráfico de $[ppm O]/(\%FeO)$ x óxidos ácidos para basicidade II.

As figuras 24 e 25 não apresentaram correlação entre os dados, mas os dados não diferem muitos dos obtidos para as faixas de temperaturas I, II e III. Assim como os dados de temperatura colocaram-se os dados dos gráficos das figuras 24 e 25, sobre o gráfico da teoria.

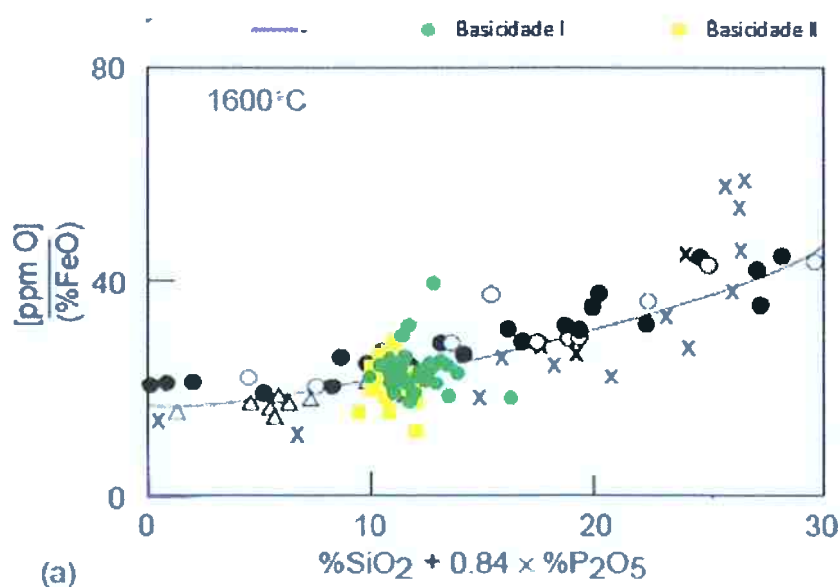


Figura 26 - Dados de $[ppm O]/(\%FeO)$ x óxidos ácidos em comparação com dados da literatura [9 - modificado].

Os dados se encontram numa faixa de 0 a 40 para $[ppm O]/(\%FeO)$ e de 10 a 20 para as quantidades de óxidos ácidos na escória.

Assim como nos gráficos das figuras 23 a 26, que mostram os dados das corridas estão próximos aos dados experimentais da literatura, assim como estão próximos da curva teórica.

Em comparação da relação de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ com a basicidade foram obtidos os seguintes dados:

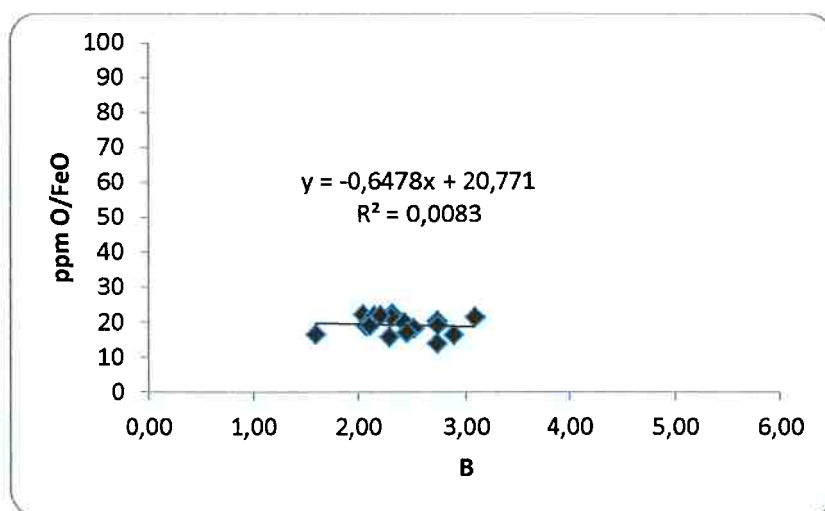


Figura 27 - Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x basicidade para temperaturas I.

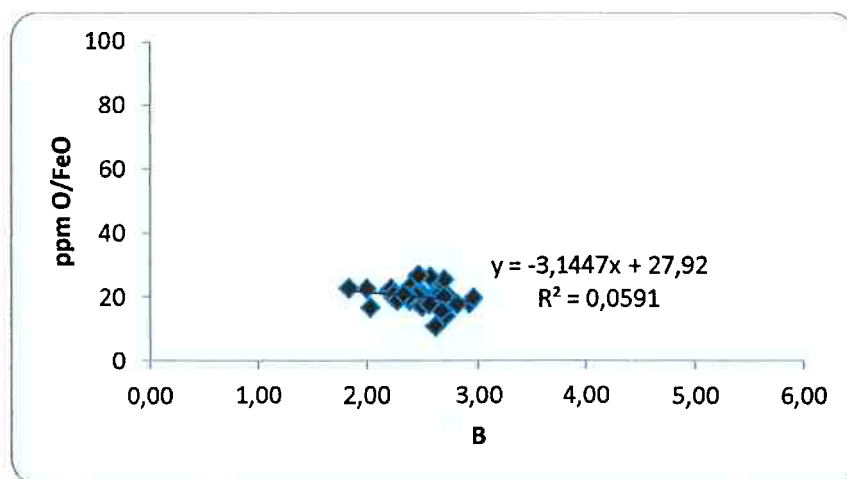


Figura 28- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x basicidade para temperaturas II.

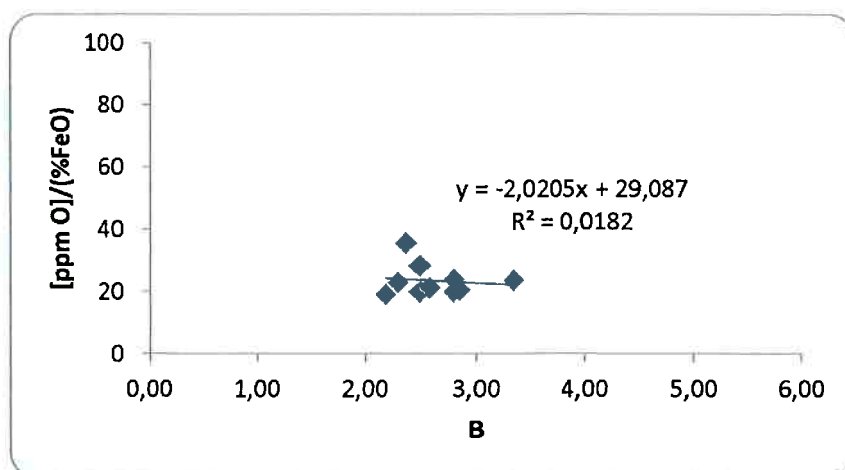


Figura 29- Gráfico de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x basicidade para temperaturas III.

As figuras 27, 28 e 29 mostram que não há nenhuma correlação entre os dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ em função da basicidade. Neste caso o coeficiente angular varia em relação as três faixas de temperatura.

Novamente colocaram-se os dados das corridas para as três faixas de temperatura sobre as curvas teóricas da figura 11, como seguem abaixo.

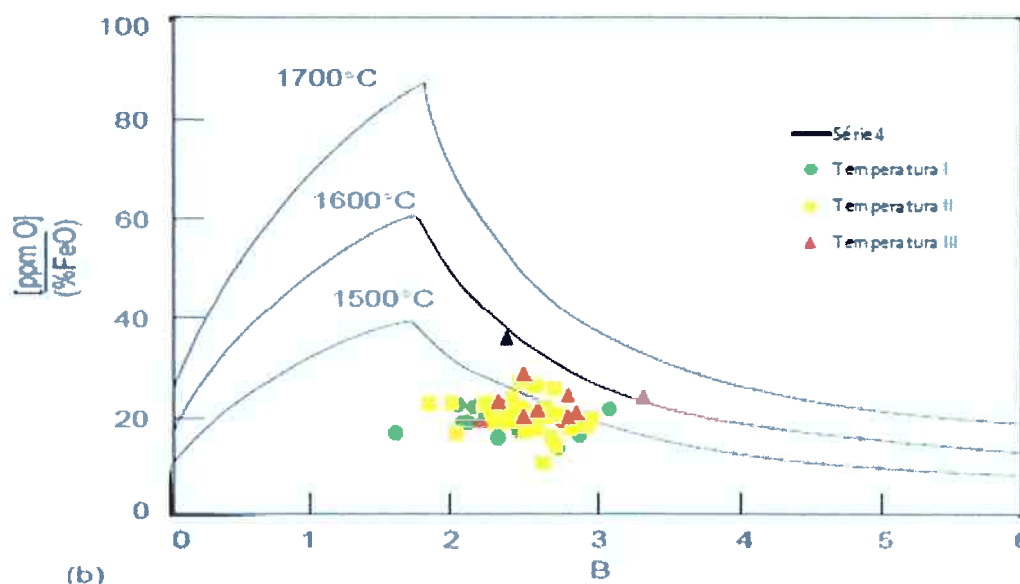


Figura 30 - Dados de $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ x basicidade em comparação com dados da literatura [9 - modificado].

Os dados encontram-se numa faixa de basicidades entre 2 a 4 e com relação $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO})$ entre 10 a 40.

Na figura 30 os dados das corridas encontram-se próximos das linhas teóricas, esperava-se que os dados de temperatura I, ficassem mais próximos da linha teórica de 1500°C e assim por diante as temperaturas II com a curva de 1600°C e as temperaturas III entre as curvas de 1600°C e 1700°C. Porém se encontram muito mais concentrados entre 1500° e 1600°.

A figura 30 mostra que a basicidade está de acordo com o esperado, apenas a relação $[\text{ppmO}]/(\% \text{FeO})$ que se encontrou um pouco abaixo esperado pelas faixas de temperatura, ou seja a oxidação do banho está um pouco abaixo.

Como a basicidade está dentro do esperado e a atividade do FeO também está de acordo com o esperado, pode-se dizer que o oxigênio está sendo consumido por outros elementos para formação da escória, ou pelo carbono para a formação dos gases CO/CO₂. Não há informações sobre o carbono no aço na hora do vazamento do forno elétrico, então não é possível fazer tal análise.

Sobre a questão de os coeficientes angulares das retas mudarem com a variação da temperatura e da basicidade, não foi possível tirar nenhuma conclusão neste trabalho.

6. Conclusões

Comparando os dados obtidos das corridas nos meses de março, abril e junho de 2013, com o padrão de operação da usina, pode-se concluir que a faixa de temperatura está entre 1597-1661°C, e está praticamente dentro do padrão de produção de que vai de 1620-1650, sendo que foram poucos os dados que se encontraram fora desta faixa, considerando que representa uma pequena faixa de dados, apenas 3%, em relação ao total de corridas durante o período analisado de março, abril e junho de 2013.

Para os valores de oxidação do banho os dados encontram-se de 375 a 799 ppm, e que se encontram dentro do esperado do padrão que tem que ser inferior a 850ppm.

Em relação à composição de escória os valores de %FeO encontram-se numa faixa de 23,32 a 39,51% enquanto espera-se que seja em torno de 31,21%.

Em relação à análise dos dados com relação às curvas teóricas de $[\text{ppm O}] \times \% \text{FeO}$, $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \% \text{SiO}_2 + 0,84 \times \% \text{P}_2\text{O}_5$ e $[\text{ppm O}]/(\% \text{FeO}) \times \text{basicidade}$, para as faixas de temperatura e basicidade estipuladas, pode se concluir que os dados não apresentaram nenhuma linearidade, com coeficientes de correlação muito baixos.

Podemos concluir que os dados das corridas do aço 1024D dos meses de março, abril e junho de 2013, encontram-se dentro do esperado pela literatura, e que o equilíbrio metal-escória tem sido mantido. A pequena variação encontrada na oxidação do banho está dentro do esperado, porém algumas vezes acontecem casos especiais em que estes valores saem do esperado e seria interessante que se tivesse dados sobre a quantidade de carbono no banho na hora do vazamento para maior controle e também uma análise sobre a relação do coeficiente angular das retas obtidas nos dados experimentais em relação à variação de temperatura e basicidade.

7. Referências Bibliográficas

- [1] VAZ, Guilherme Demberg. **Quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, Rio de Janeiro, Abril de 2011.
- [2] Apostila Gerdau de Capacitação; **ACI-011 Operação Básica de Fusão e Refino em Sucata em Fornos Elétricos Sucata e Gusa Sólido**; Vários Autores;2008.
- [3] BIRAT, J.P., **A future study analysis of the technological evolution of the EAF by 2010**. Revue de Metallurgie, 2000(Novembre): p. 1347
- [4] CHRIST, F.S.; **Melhorias no Aquecimento de placas de aço de uma aciaria elétrica**. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001
- [5] Apostila SENAI – **Metalurgia dos Aços**- Leandro Ferreira – 28 de Setembro de 2011.
- [6] BRADASCHIA, Clovis; **Siderurgia para Não- Siderurgistas**; Volume I; ABM – Associação Brasileira de Metais; São Paulo 1986.
- [7] NAGASAKA,T.;FRUEHAN, R.J. **Metall. Mater. Trans. B**. 1994. Vol. 25B, pp. 245-53.
- [8] TURKDOGAN, E.T. **Physical Chemistry of high temperature technology**. United States Steel Corporation Research Laboratory, Academic Press, 1960.
- [9] FRUEHAN, Richard J.; **The Making, Shaping and Treating of Steel**. The AISE Steel Foundation, 11 Edition, 1998.

- [10] SAIN,D.R.; BELTON, G.R. **Metall. Trans. B.** 1976, vol. 7B, p. 235; 1978, vol. 9B, pp. 403-07.
- [11] MIN,D.J.;FRUEHAN, R.J. **Metall. Trans. B.** 1992, vol. 23B, pp. 29-37.
- [12] Apostila Gerdau de Capacitação. **ACI-012 Formação de Escórias em fornos de fusão e refino Primário.** Vários Autores. 2008.
- [13] RAO, Y. K. **Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes.** p. 375, Fig. 9-3.
- [14] LEANDRO,C.A.S.; **Estudo do processo de desfosforação aplicado a fornos elétricos a arco.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo,1994.
- [15] C.R.Taylor and J. Chipman. **Thermochemistry for Steelmaking.**Vol.II, Addison-Wesley,Reading, Mass.,1963.