

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO RENDIMENTO METÁLICO DE UMA ACIARIA ELÉTRICA ¹

Cláudio Correa do Nascimento ²

Maurício Waineraich Scal ³

José Adilson de Castro ⁴

Resumo

Rendimento Metálico é o índice que compara a quantidade de Carga Metálica, incluindo as ligas, necessária para a produção de uma determinada quantidade de tarugos de aço. É um dos mais importantes indicadores das Aciarias de alto desempenho em todo mundo, sobretudo pelo impacto do rendimento no custo do emprego e nos indicadores específicos de consumo. Ao longo deste trabalho, a partir de experimentos realizados em escala industrial em um Forno Elétrico de 100 t de capacidade de aço líquido, serão determinados os principais parâmetros de influência no rendimento metálico através de um modelo parametrizado e serão analisados os resultados das diversas corretivas propostas para incrementar consistentemente este indicador sem modificações significativas no nível de qualidade da sucata ou do ferro gusa.

Palavras-chave: Forno elétrico a arco; Rendimento metálico; Escória.

STUDY OF THE INFLUENCE PARAMETERS IN THE METALLIC YIELD OF AN ELECTRIC STEELMAKING

Abstract

Metallic Yield is the index that compares the amount of Metallic Charge used as raw material in the steelmaking process and the quantity of steel produced, and is the most important index of high performance Meltshops in worldwide, especially because of its influence in the charge cost and in some specific consumption index. Throughout this work, from experiments carried out on industrial scale in an Electric Arc Furnace with a capacity of 100 metric tons of liquid steel, the main plots responsible for the Metallic Yield will be determined through a parametric model and will be proposed corrective actions in the process to increase consistently this indicator without upgrading the quality level for scrap or pig iron.

Key words: Electric arc furnace; Metallic yield; Slag.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico; M. Sc.; Assessor Técnico de Processos, Gerdau Cosigua

³ Engenheiro Metalúrgico; M. Sc.; Consultor Técnico, Gerdau Aços Longos S/A

⁴ Engenheiro Metalúrgico; Ph.D.; Professor Adjunto, Universidade Federal Fluminense

1 INTRODUÇÃO

A produção de aço utilizando fornos elétricos a arco (FEA) tem mantido um crescimento contínuo por todo mundo, ocupando lugar de destaque em diversos países, como a principal rota para fabricação de aço.

Nos últimos anos, a fabricação de aços a partir do FEA apresentou significativa evolução, conforme apresentado por Pfeifer.⁽¹⁾ Nos custos de produção do aço em plantas semi-integradas, a parcela relativa ao processamento e emprego da sucata contribui com aproximadamente metade do montante, ficando evidenciada a importância que a matéria-prima tem no processo e nos custos de produção. Portanto, em função da magnitude do emprego da sucata no processo de produção do aço, qualquer variação no preço, na qualidade ou características físicas e químicas da sucata, impacta diretamente no desempenho dos processos de aciaria e no custo final do aço produzido.

Ao longo deste trabalho irá se verificar a influência de diversos parâmetros de processo no rendimento metálico da aciaria. Será proposto um modelo que permita compreender o efeito do processo de fusão e refino, e propor maneiras de aperfeiçoá-lo a partir da redução do Fe presente na escória, reduzindo assim os custos de fabricação do tarugo na Aciaria e conseqüentemente aumentando sua competitividade.

1.2 Compreendendo o Rendimento Metálico

Rendimento Metálico é a relação utilizada para mensurar a quantidade de Carga Metálica contida no carregamento que é convertida em Aço. O Rendimento Metálico pode ser expresso então, pela seguinte relação:

$$Y = \frac{W_{TA}}{W_{carga}}$$

W_{TA} : peso total de bons tarugos produzidos
 W_{carga} : total de carga metálica + total de Fe ligas adicionadas na fabricação

Índices de Rendimento Metálicos elevados estão atrelados à redução de perdas metálicas no processo fusão, refino e solidificação do aço e conseqüentemente ao aumento da produtividade.

Em termos gerais, o rendimento metálico depende tanto da qualidade dos materiais que compõem a carga quanto do processo de fabricação do aço. No que diz respeito à carga metálica, o rendimento metálico irá aumentar de acordo com o aumento do percentual de Fe total. Isto implica uma redução das impurezas (limpeza) e voláteis, dentre outras características da sucata. O rendimento também depende da composição química da carga, por exemplo, do teor de carbono e de residuais presentes na carga. No que diz respeito ao processo de fabricação os fatores que levam a um aumento do rendimento metálico são aqueles que reduzem os níveis de óxido de Ferro presente na escória. Cada variável tem um impacto diferente. O propósito deste trabalho é analisar o impacto das variáveis de processo no rendimento metálico, modelando o processo de um forno elétrico a arco, tornando possível realizar diversas simulações com diferentes condições de contorno que ocorrem neste processo.

Um desdobramento típico do rendimento metálico para usinas semi-integradas pode ser vista na Figura 1.

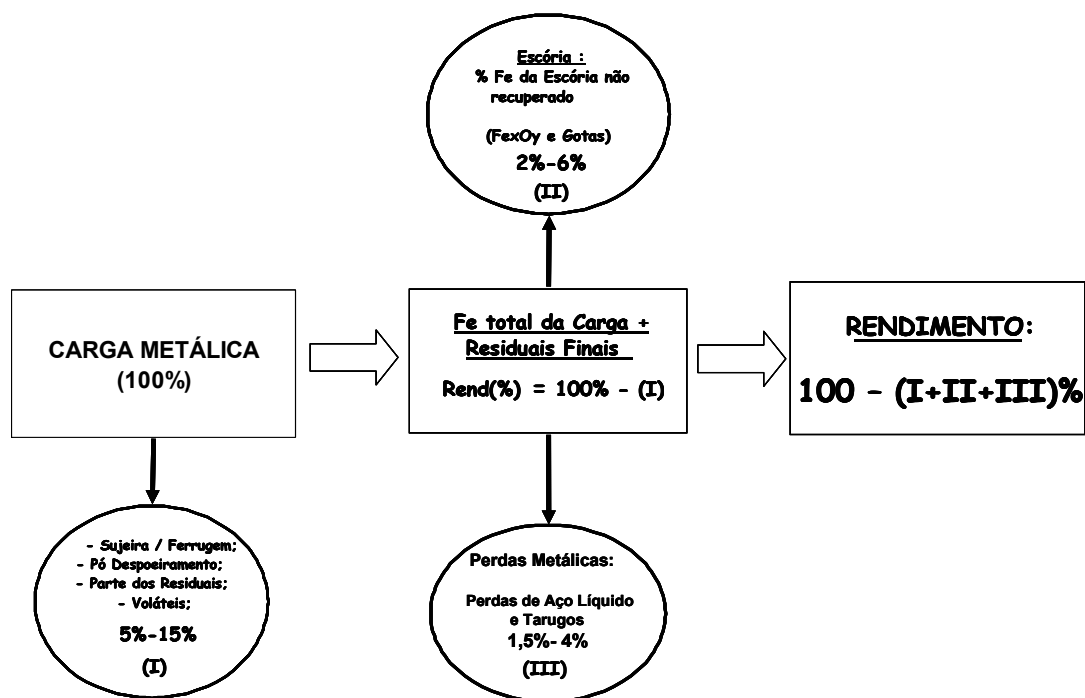


Figura 1: Desdobramento Típico do Rendimento Metálico.⁽²⁾

Na Figura 1 se podem observar as fontes de perdas e seus respectivos impactos % no valor final deste indicador. Fica claro que a maior parcela de perdas, tipicamente, é referente às características da carga metálica, a qual contém diversos componentes que não serão diretamente aproveitados na fabricação do aço, tais como, sujeira e ferrugem das sucatas, a parcela de pó que é captada pelo sistema de despoeiramento, parte dos residuais e voláteis presentes na carga metálica. Apesar de representar a maior parcela de perda para o rendimento, não será abordado de maneira intensiva, pois a mesma é definida em função do preço, disponibilidade e momento do mercado, fatores que dificilmente poderão ser influenciados por este trabalho.

As demais perdas do rendimento, que também corresponde a uma parcela significativa do rendimento, serão analisadas, quantificadas e, mais especificamente as perdas pela escória do FEA, serão o foco das ações corretivas levantadas por este trabalho.

2 METODOLOGIA

Foi realizado, a critério de comprovação experimental, o balanço de massa de corridas consecutivas, para que fosse possível quantificar de maneira precisa o valor das perdas metálicas da aciaria, tais como barrado (porta do forno), panelas (fundo de panela e basculamento), distribuidor e tarugos, valores reais de rendimento, perdas para o despoeiramento, assim como a característica e a massa total de escória gerada. Foram mantidas todas as práticas operacionais utilizadas durante o período, assim como se utilizou lotes de gusa e mix de sucatas com características similares aos utilizados normalmente.

Para que se pudesse ter uma análise dinâmica do comportamento das perdas pela escória na forma de óxidos, um método para quantificação de massa/vazão de escória pela porta do FEA durante o refino foi elaborado, utilizando-se métodos de

análise de imagens gravadas. Baseado neste modelo pode-se estimar a vazão de escória para cada intervalo da corrida e determinar-se uma curva que associa a vazão de escória pela porta ao longo do tempo. Associando-se estes valores à composição química instantânea da escória ao longo da corrida, puderam-se identificar os momentos críticos para a perda na forma de Fe_xO_y pela porta.

Para associar o volume estimado de escória que sai pela porta do FEA ao longo da corrida com a massa da escória, calculou-se a densidade da mesma, baseando-se na composição química instantânea da escória e na sua temperatura estimada.

O valor da densidade de escórias compostas por CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃, segundo Barretet e Thomas,⁽³⁾ é dado por:

$$\rho_1 = \left(1,45428 + \frac{1290,08}{T(^{\circ}C)} + 0,000330571(CaO + MgO)^2 + 0,000130989(Al_2O_3)^2 - 0,0000483744(SiO_2)^2\right)$$

O valor da densidade de escórias compostas por FeO-MnO é dado por:

$$\rho_2 = \left(3,6 + \frac{1290,08}{T(^{\circ}C)}\right)$$

Desta forma, o valor geral para a densidade da escória para o sistema do FEA será:

$$\rho_{Total} = (\%CaO + \%MgO + \%SiO_2 + \%Al_2O_3)\rho_1 + (\%FeO + \%MnO)\rho_2$$

Para a caracterização química de escória, utilizou-se a técnica de análise de espectrometria a partir de raios-X de fluorescência, aliada em alguns casos a análises de difração de raios-x.

Tendo os valores da evolução da densidade da escória ao longo da corrida é necessária agora a determinação da variação do volume da escória que sai pela porta do forno ao longo do tempo. Para isso, realizou-se a filmagem da saída de escória durante a corrida, conseguindo desta forma, estimar o volume baseado em dimensões conhecidas da porta do FEA.

As estimativas para evolução da massa de escória e ferro que sai pela porta do FEA ao longo do tempo, com base no modelo desenvolvido são demonstradas na Figura 2.

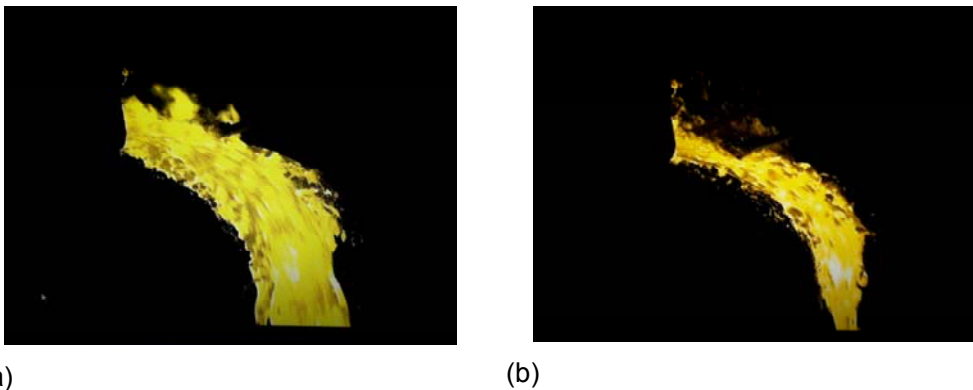


Figura 2: Exemplo de avaliação da vazão através de imagens do FEA. Figura (a) vazão de 859 kg/min e Figura (b) vazão de 386 kg/min. (valores considerados de acordo com a técnica de análise da filmagem do FEA).⁽²⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados do Balanço de Massa Inicial da Aciaria

Com base nos dados obtidos a partir do balanço de massa inicial, realizado em 158 corridas, as perdas do rendimento metálico da aciaria se distribuem conforme o gráfico da Figura 3.

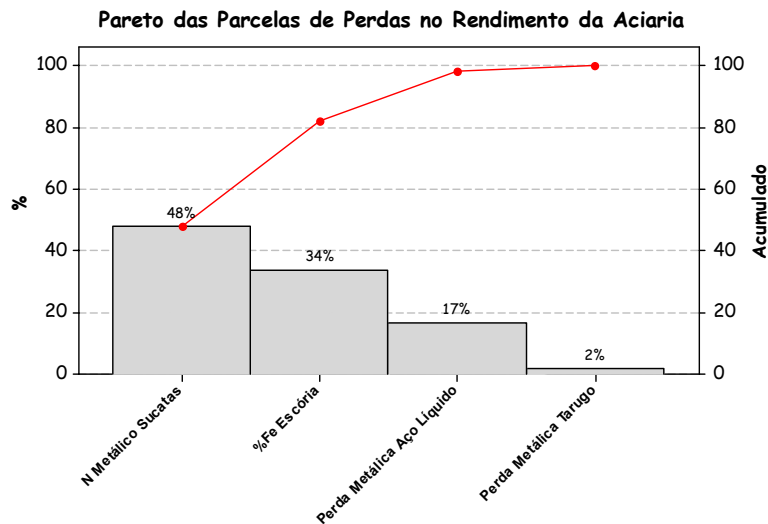
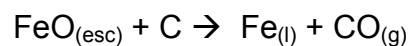


Figura 3: Pareto ilustrando as fontes de perdas do Rendimento Metálico da Aciaria.

A Figura 3 mostra o acerto de se priorizar as perdas referentes ao % de Ferro presente na escória do FEA.

3.2 Evolução do % de Óxido de Ferro na Escória do FEA

Durante a fusão da carga no FEA, os níveis de FeO, podem atingir valores elevados de até a 55-80% da massa. Nesta condição tem-se um banho plano, com formação de escórias com uma baixa capacidade de espumação, acarretando em um elevado consumo de energia elétrica e de refratário do forno. Estas também são as razões de ser necessário manter a oxidação do ferro sob controle durante a fusão da carga. Para que isso seja possível, ao longo dos últimos anos a injeção de Carbono para reduzir os óxidos de ferro em escórias complexas de fornos tem se tornado uma prática comum. Vários modelos matemáticos desta reação de redução foram publicados. Esses artigos descrevem com detalhes os mecanismos da reação química entre o Carbono e o FeO em escórias complexas de fornos. A equação da redução do %FeO pode ser descrita por:



Desta forma, segundo Gupta,⁽⁴⁾ pode-se considerar que no início da reação ($t=0$), a concentração de Fe (produto) gerado por esta reação é igual a 0. Após certo intervalo de tempo (t_a) a concentração de Fe será X e a concentração do FeO (%FeO) será (%FeO^a). Sendo assim, é possível calcular a taxa de redução do FeO através de:

$$\frac{d(\%FeO)}{dt}$$

Assumindo-se que a redução do %FeO é uma equação de primeira ordem, se pode considerar que:

$$\frac{d(\%FeO)}{dt} = K[(\%FeO) - (\%FeO^a)] \quad (1)$$

onde:

- (%FeO) é a concentração de FeO na escória;
- t é o power-on (tempo);
- K é a constante cinética; e
- (%FeO^a) é a concentração de FeO na escória após o intervalo de tempo t .

Integrando-se a equação (1) se tem:

$$-\ln[(\%FeO) - (\%FeO^a)] = Kt + C$$

onde C é a constante de integração que pode ser avaliada utilizando-se a condição inicial na qual t e (%FeO^a) são iguais a zero.

Sendo assim:

$$-\ln(\%FeO) = C$$

Substituindo-se este valor de C na equação anterior obtém-se:

$$K = \frac{\ln(\%FeO) - \ln[(\%FeO) - (\%FeO^a)]}{t}$$

que representa o valor da constante da reação da redução do %FeO.

No gráfico demonstrado na Figura 4 tem-se a taxa de redução de FeO típica do período de realização dos testes industriais ao longo da corrida.

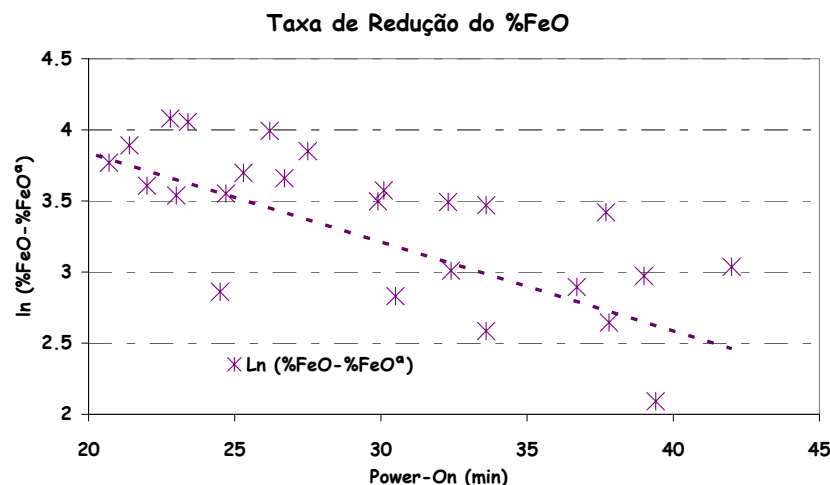


Figura 4: Taxa de Redução do FeO da Escória durante o primeiro balanço de massas.

A amostragem realizada indicou um elevado teor de FeO no início do refino. Desta forma, o momento de saída de escória pela porta é fundamental, por que, quanto mais cedo a escória sair pela porta, maior será o teor de Fe presente e, por conseguinte, maiores as serão as perdas no Rendimento Metálico.

Sendo assim, além de trabalhar-se na redução dos teores de FeO da escória, foi necessária a elaboração de um plano de ação a partir do qual se pode atrasar ao máximo o momento de saída de escória pela porta do forno alterando-se a inclinação do FEA, altura do barrado, nível de fundo úmido, entre outros parâmetros e antecipar a injeção de C por uma lança situada em um dos painéis do FEA.

A saída de escória iniciava-se a partir dos 19,4 minutos de power-on. Com as modificações das práticas operacionais, conseguiu-se retardar a saída de escória pela porta em pelo menos quatro minutos.

Este maior tempo de permanência da escória no interior do forno, além de reduzir as perdas através da menor saída de material pela porta, fornece um maior tempo para reação de redução do FeO da escória pelo C injetado.

3.3 Impacto do Total de Oxigênio no %FeO da escória do FEA

Visando obter uma quantificação do impacto do O₂ no teor de FeO da escória, realizaram-se duas corridas experimentais, com características idênticas no que diz respeito a carga fria e demais parâmetros de processo, distinguindo-se somente o total de O₂ injetado. O resultado pode ser visto no gráfico da Figura 5.

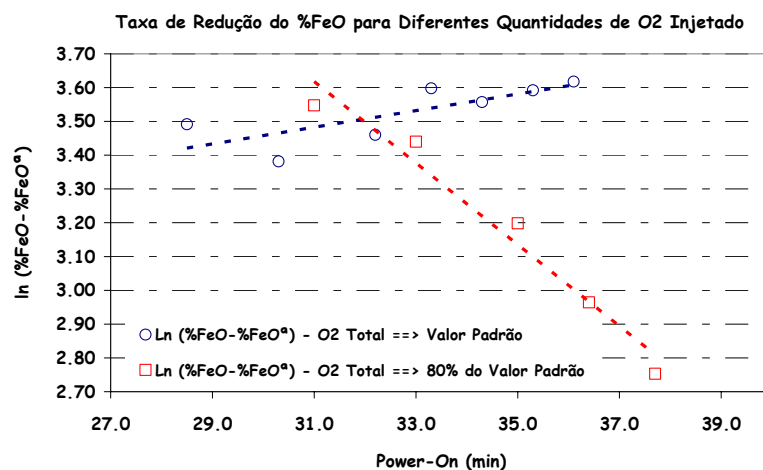


Figura 5: Taxa de Redução do %FeO da Escória para Diferentes Quantidades de O₂ Injetado (valor padrão X 80% do valor padrão).

3.4 Impacto do Total de Carbono Injetado no %FeO da escória do FEA

Realizando-se testes simulares aos do tópico anterior, procurou-se comparar o efeito da quantidade de C injetado no banho. Os resultados são apresentados na Figura 6.

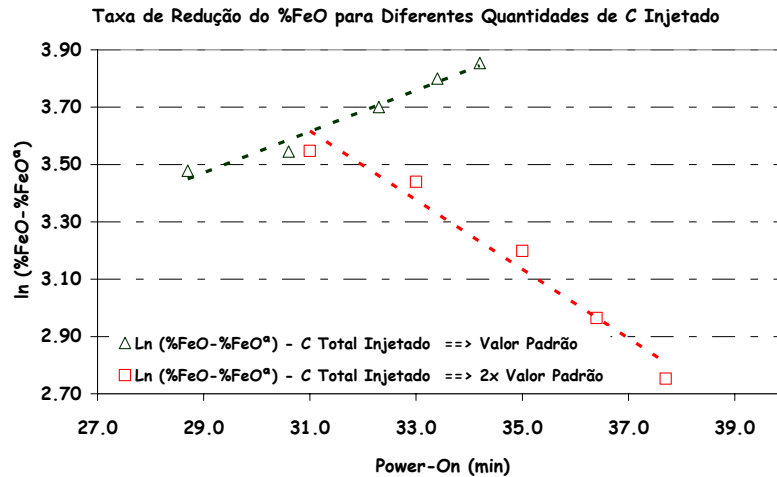


Figura 6: Taxa de Redução do %FeO da Escória para Diferentes Quantidades de C Injetado (valor padrão X 2 vezes o valor padrão).

A injeção de C reduzida, mantendo-se a quantidade de O₂ injetada, mostrou-se mais crítica para o controle do %FeO da escória. A menor quantidade injetada resultou em um elevado aumento a uma taxa de crescimento de 1,5 pontos percentuais por minutos no teor de FeO presente na escória.

As análises indicaram que o excesso de O₂ no FEA acarreta no aumento do %FeO da escória, reduzindo-se desta maneira o rendimento metálico. Da mesma forma que a injeção de C deverá ser suficiente para que não ocorra o aumento do %FeO resultando no mesmo problema.

3.5 Impacto da Massa Total de Escória e Basicidade no %FeO da Escória do FEA

Foram realizados testes adicionais nos quais foram adicionadas diferentes quantidades de cal calcítica no FEA para que se pudesse avaliar o impacto tanto do volume de escória contido no FEA quanto da basicidade na taxa de redução do FeO. Os resultados podem ser observados na Figura 7.

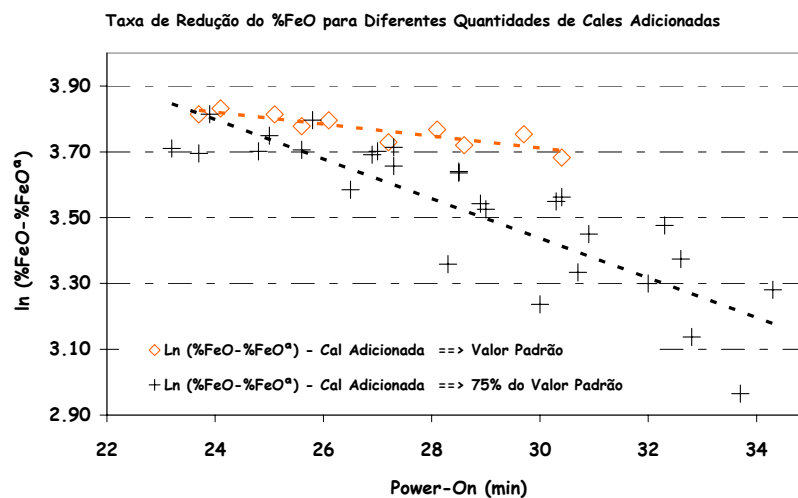


Figura 7: Taxa de Redução do %FeO da Escória para Diferentes Quantidades de Cal Calcítica adicionadas no FEA (valor padrão X 75% do valor padrão).

Os resultados dos experimentos mostram que a quantidade de escória do forno, parâmetro diretamente proporcional a quantidade de cal calcítica adicionada, exerce uma forte influência na taxa de redução do % FeO ao longo da corrida. Isto se comprova a partir do fato de que apesar dos teores iniciais de FeO das corridas dos dois experimentos serem similares, nas corridas do experimento no qual se utilizou 75% do valor padrão de cal calcítica adicionada, observou-se uma queda significativamente maior do %FeO da escória apresentado um percentual final menor que os das corridas do experimento com uma maior quantidade de cal.

3.6 Modelo de Regressão para a Estimativa da Taxa de Redução do %FeO da Escória ao Longo do Tempo

A aplicação de modelos estatísticos é hoje em dia uma valiosa ferramenta para a análise e predição de comportamentos dos mais diversos processos.

Modelos empíricos vêm sendo aplicados amplamente na Siderurgia para a predição de indicadores críticos de processo, tais como consumo específico de energia elétrica, consumo de eletrodos, rendimento metálico, etc. Para o seu desenvolvimento, utilizam-se os mais diversos parâmetros de processo de maneira a direcionar a tomada de ações, baseando-se em fatos e dados reais do processo em questão.

Baseando-se nos dados das corridas coletados nos testes, foram elaborados modelos de regressão linear para a predição do cálculo do %FeO e da taxa de redução do %FeO ($\ln(\%FeO - \%FeO^a)$), utilizando-se técnicas de regressões estatísticas.

Estes modelos utilizam como dados de entrada as seguintes variáveis:

P_{on} → Power-On da Corrida (min);

O_2 → O_2 Total / Carga Metálica Total da Corrida (Nm^3/t);

C_{inj} → Carbono Total Injetado (kg/t);

C_{car} → Carbono Total da Carga (kg/t);

Cal_{cit} → Cal Calcítica / Carga Metálica Total da Corrida (kg/t).

As equações determinadas pelo modelo são apresentadas a seguir:

$\% FeO = 66,1 - P_{on} + 0,363 O_2 - 0,559 C_{inj} - 1,92 C_{car} + 1,16 Cal_{cit}$ (para cálculo do % FeO) e;

$\ln(\%FeO - \%FeO^a) = 4,26 - 0,0501 P_{on} + 0,0344 O_2 - 0,0400 C_{inj} - 0,0564 C_{car} + 0,0376 Cal_{cit}$ (para cálculo da Taxa de Redução do % FeO).

A título de validação do modelo, realizaram-se corridas experimentais alterando-se os valores das variáveis de entrada do modelo. Os resultados são apresentados na Figura 8.

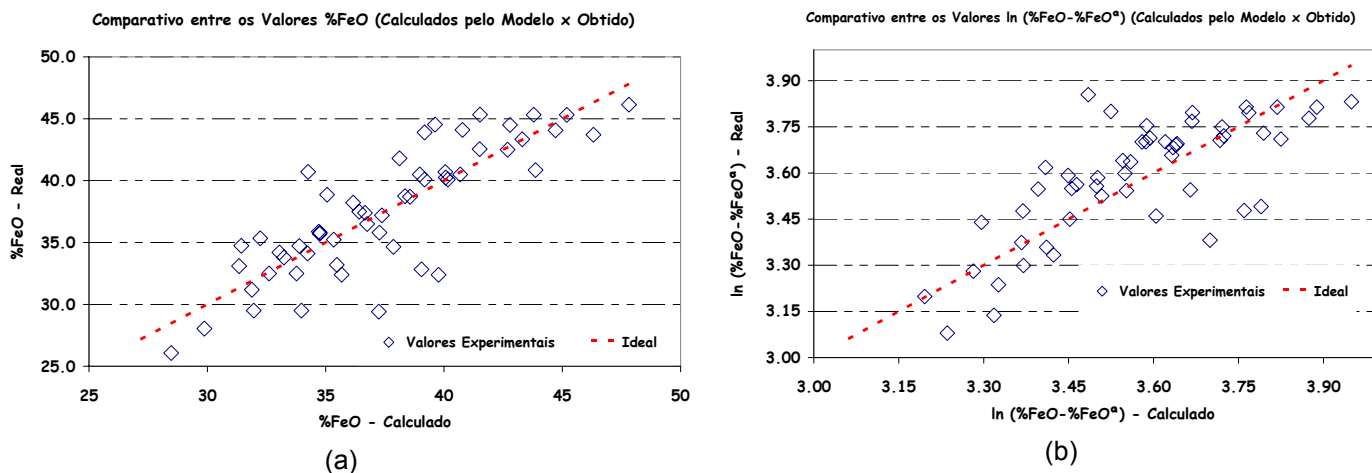


Figura 8: Gráfico comparativo do %FeO (a) e Taxas de Redução do %FeO (b) da Escória ao longo do tempo calculado pelo Modelo e de Corridas Experimentais.

O modelo apresentou resultados satisfatórios, no que diz respeito ao teor de FeO da escória, apresentando um R^2 aproximado de 73%. Já na predição da taxa de redução ao longo do tempo, os valores calculados não foram tão apurados. Este desvio do modelo com relação ao resultado experimental se deve ao fato de a taxa depender de parâmetros dinâmicos, tais como vazão dos injetores e da injeção de carbono, que ditam a cinética da reação de redução. Por abordar valores de entrada estáticos (somente o início e fim da corrida) os valores calculados apresentam pequenos desvios em relação aos valores reais obtidos no FEA.

No entanto, para quantificação da influência de cada variável de entrada no valor do indicador, ambos os modelos se mostram muito úteis.

Por exemplo, com base no modelo para cálculo do %FeO, se pode afirmar que a o Carbono contido na Carga (C_{car}) é, dentre as variáveis consideradas pelo modelo, o parâmetro de maior influência no %FeO inicial da escória. Desta forma, para um melhor controle do %FeO no momento inicial de saída de escória pela porta do FEA deve-se aumentar a quantidade de C presente na carga. Ou, para compensar um período no qual é necessário utilizar uma maior quantidade de O_2 na corrida, deve-se compensar aumentando a quantidade de C na carga na proporção de 0,2 kg/t de Carbono a mais na carga para cada 1 Nm^3/t a mais injetado no banho, caso não seja desejado alterar o %FeO da escória.

Já com relação à taxa de redução do %FeO, todos os parâmetros apresentam influência similar no valor calculado pelo modelo. De maneira análoga a anterior, a cada 1 kg/t a mais de cal calcítica adicionada no FEA deve-se injetar 0,9 kg/t de C a mais na corrida para que se mantenha o nível de FeO da escória.

3.6 Comportamento do %FeO da Escória Após as Alterações

Uma análise comparativa entre a quantidade total de Fe pela porta de escória do FEA e de Ferro antes e após as alterações é demonstrada na Figura 9.

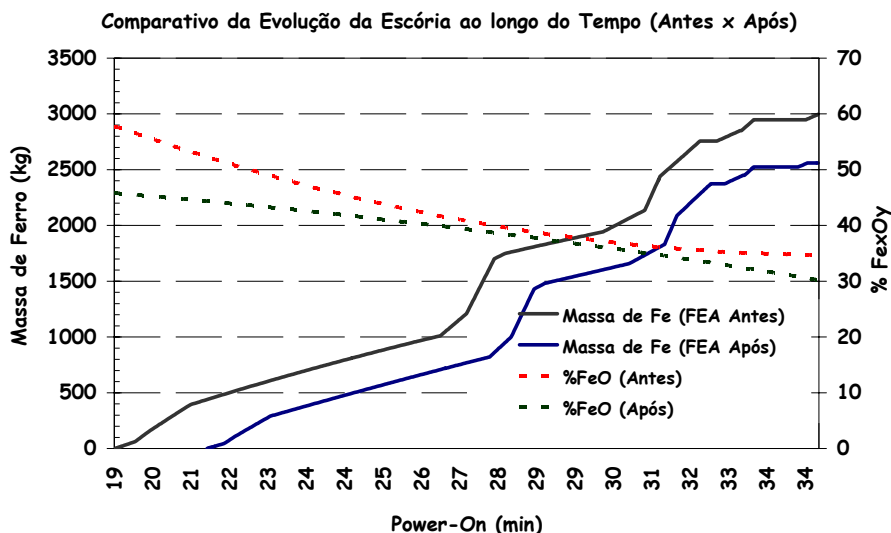


Figura 9: Análise Gráfica Comparativa entre as Perdas de Fe pela Escória antes x após a aplicação do modelo.

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 9, pode-se observar que a diferença entre a quantidade de escória dos períodos analisados é oriunda do adiamento do momento de início de saída de escória pela porta do FEA. Este adiamento é função do menor volume de escória presente no forno, devido à menor adição de cales, aliada as práticas operacionais. O menor volume de escória retarda o momento no qual a massa total do FEA alcança o patamar da porta causando o transbordamento da escória para fora do mesmo. Além disso, o menor volume de escória no FEA requer uma menor quantidade de carbono injetado para reduzir o %FeO.

O maior benefício, no que diz respeito ao rendimento metálico, está na liberação de escória através da porta do FEA com níveis mais baixos de %FeO dissolvidos na mesma. A maior quantidade de C injetado aliada ao menor volume de O₂ injetado, resulta em menores teores de %FeO na escória. Além disso, como dito anteriormente, a maior permanência da escória no interior do FEA possibilita um maior tempo para que a reação de redução do %FeO ocorra.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados conclui-se que:

(a) As perdas de Ferro pela escória do FEA na forma de Óxidos (Fe_xO_y) representavam cerca de 34% das perdas no Rendimento Metálico e foram reduzidas para 23% através das alterações propostas pelo trabalho. O conhecimento da evolução dos óxidos da escória conduziu ao controle do momento de saída de escória pela porta do FEA, mudanças nas práticas de Injeção de O₂ e C e adição de cales

(b) A realização de Balanços de Massas a nível industrial se mostrou uma ferramenta consistente para a identificação e quantificação das fontes de perda do Rendimento Metálico da Aciaria e necessária para previsão do peso da escória;

(c) Foi proposto um método de quantificação da vazão mássica de escória pela porta do FEA ao longo do tempo da corrida a partir de filmagens da operação. O mesmo se mostrou satisfatório, porém há necessidade de se realizar uma maior amostragem, correlacionando-se esses valores de vazão com parâmetros dinâmicos de operação do FEA. Este estudo já está sendo desenvolvido atualmente;

(d) O maior tempo de permanência da escória no FEA aliada a uma melhor prática de escórias possibilitou não só incrementos no Rendimento Metálico, como também melhorias na escória espumante. As alterações no %MgO e no %FeO confirmam a eficácia das mudanças para o processo do FEA;

(e) A quantidade de O₂ e Carbono injetados, bem como a quantidade de Cal Calcítica adicionada mostraram uma forte influência no %FeO da escória. É necessário balancear seus valores para que se alcance um rendimento metálico satisfatório sem prejudicar significativamente outros indicadores do FEA, tais como custo da carga metálica, consumo de energia elétrica e eletrodos, refratários e outros;

(f) O Modelo de Regressão para cálculo do %FeO ao longo do tempo se mostrou muito importante para quantificar o impacto de cada variável analisada e permitir ações corretivas adequadas, em síntese, ajustes dos parâmetros de processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a equipe da aciaria da Gerdau Cosigua pelo comprometimento com os testes realizados. Também agradecem a todos da Pós-Graduação do curso em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense e a Gerdau Cosigua, representada pelo Engenheiro Jose Luiz Lopes de Sousa, pela oportunidade para o desenvolvimento de trabalhos técnicos que proporciona o contínuo aprendizado de estudantes de metalurgia e colaboradores da empresa.

REFERÊNCIAS

- 1 PFEIFER, H.; KIRSCHEN, M. *Thermodynamic analysis of EAF energy efficiency and comparison with a statistical model of electric energy demand*. Germany: Institute of Industrial Furnaces and Heat Engineering in Metallurgy, 2005.
- 2 NASCIMENTO, C.C. Estudo do rendimento metálico em fornos a arco elétrico. 2008. p 23 – 137. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial Metalúrgica) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.
- 3 BARRET, L.R.; THOMAS, A.G. *The making, shaping and treating of steel*. 11. ed. Pittsburgh, Pa : The AISE Steel Foundation, 1998. v.: Steelmaking and refining.
- 4 GUPTA, C.K. *Chemical metallurgy: principles and practice*. Weenheim, Wiley-VCH, 2003.