

## **AVALIAÇÃO DA ESCÓRIA DE FEA E FP EM RELAÇÃO À VIDA ÚTIL DOS REFRATÁRIOS**

J. P. Ferreira<sup>1</sup>, S. R. Bragança<sup>2</sup>

1. Magnesita Refratários S.A.

2. Universidade Federal do Rio Grande Sul – DEMAT/UFRGS

Av. Osvaldo Aranha 99/705 PoA-RS 90035-190

saulorb@ufrgs.br

### **RESUMO**

*A indústria siderúrgica busca continuamente melhorias no desempenho dos refratários, como forma de melhorar sua competitividade, em um mercado caracterizado pela competição global. Um dos principais fatores de desgaste de refratários é a corrosão química, a qual está diretamente relacionada com a qualidade das escórias. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta resultados da monitoração da qualidade da escória de forno elétrico a arco (FEA) e forno panela (FP), principalmente quanto à basicidade, teor de MgO e a oxidação da escória. Os resultados foram relacionados com o desempenho do revestimento refratário na panela de aço. As alterações realizadas mostraram que estes permaneceram íntegros, propiciando um aumento de tempo de serviço.*

Palavras-chaves: refratários, aciaria, escórias.

### **INTRODUÇÃO**

A indústria siderúrgica mundial vive uma fase de intensa transformação, caracterizada pela competição global, maturidade de mercado e contínua busca para redução de custos. Esses fatores levam os grandes “players” deste mercado a se tornarem globais, especialistas e focados no seu segmento de atuação.

A indústria de refratários brasileira está situada entre as mais avançadas do mundo, com produtos de alta qualidade, obtendo excelentes resultados. O indicador de consumo específico de refratários (kg de refratário/t de aço produzido) é compatível com os melhores valores mundiais. Assim, atualmente pode-se encontrar

consumos específicos de refratários em indústrias siderúrgicas brasileiras dedicadas à produção de aço carbono, com valores em torno de 5 kg /t.

Essa evolução foi obtida através de insumos cada vez mais nobres e melhorias substanciais nos processos de fabricação do aço.

Neste trabalho os mecanismos de desgaste que afetam o desempenho dos refratários dolomíticos em panela de aço serão detalhados. Embora os fatores térmicos e mecânicos sejam importantes, o enfoque será os fatores que contribuem ao mecanismo de desgaste químico. Este será avaliado em relação à compatibilidade entre escória e refratário, fazendo-se o levantamento de dados referentes ao FEA e FP, da seguinte maneira:

- Comportamento na oxidação da escória do FEA
- Comportamento na oxidação (FeO+MnO) da escória de chegada do FP
- Relação de Basicidade (CaO/SiO<sub>2</sub>) no FP
- % de MgO no FP
- Comportamento das escórias no diagrama ternário CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO

As alterações nos procedimentos operacionais que foram propostas no processo industrial serão analisadas. O resultado esperado é uma evolução na vida média das panelas de aço dessa aciaria.

### Estado da arte

As reações químicas entre a escória e o material refratário teriam como força motriz reduzir a energia livre do sistema à custa da integridade do material refratário, objetivando o alcance de uma composição mais próxima do equilíbrio entre as fases presentes. Nessa questão eminentemente termodinâmica, a temperatura desempenha fundamental importância na velocidade da definição das composições de equilíbrio entre as fases presentes. A cinética das reações químicas envolvidas é favorecida por solicitações mecânicas (como erosão, esforços de compressão, flexão e tração) que podem gerar trincas e que por si só, já exercem forte influência no desgaste dos tijolos refratários <sup>(1)</sup>.

O processo de corrosão pode ser definido como um tipo de interação entre a fase sólida e a fase líquida. O processo de corrosão é chamado também de resistência à escória. Esta resistência é primeiramente determinada pelo equilíbrio entre as fases. Assim, uma escória saturada em uma determinada fase sólida não ataca o refratário nessa determinada fase <sup>(2)</sup>.

Os mecanismos de ataque dos refratários em fornos industriais é um fenômeno complexo que se dá não apenas pelo desgaste químico, mas também pelo desgaste físico e mecânico (erosão e abrasão), mecanismos estes que atuam sinergeticamente. O aspecto teórico do ataque químico do refratário pela escória líquida se dá pela penetração via a porosidade aberta e pela dissolução das fases refratárias na escória. A taxa de corrosão é função de muitas variáveis, incluindo temperatura, composição da interface líquido-refratário, densidade do líquido, viscosidade, difusividade e a taxa de agitação. Conseqüentemente, durante a penetração, especialmente a altas temperaturas, o líquido e o sólido reagem. Isto faz algumas das variáveis, como ângulo de contato e tensão superficial, variarem com o tempo. A reação pode gerar fases no estado sólido, líquido, gás ou combinação entre eles. O produto da reação pode ficar aderido ao refratário, formando uma camada intermediária entre refratário e escória (sólido ou líquido viscoso). Um exemplo de camada passivadora é a formação de uma camada densa de silicato dicálcico ( $C_2S$ ) nos refratários dolomíticos atacados pela sílica contida na escória <sup>(3)</sup>.

Jansson et al. <sup>(4)</sup>, em seus estudos sobre desgaste de refratários dolomíticos, observaram que o decréscimo na taxa de dissolução com o aumento do teor de MgO nas escórias pode ser atribuído a um menor gradiente de concentração escória/refratário (conhecida força motriz do processo corrosivo) e a elevada viscosidade da escória.

## **METODOLOGIA**

Para a realização dos testes foram selecionadas as propriedades que apresentam maior influência no desgaste químico dos refratários dolomíticos, de acordo com as referências bibliográficas consultadas: a relação de basicidade das escórias ( $CaO/SiO_2$ ), o teor de MgO e o teor de FeO.

A metodologia consistiu na análise dos dados de produção de corridas na Aciaria Elétrica da Gerdau Riograndense. Esta Aciaria opera com dois Fornos Elétricos a Arco e dois Fornos Painelas com as mesmas características técnicas e capacidade de produção. As propriedades das escórias de forno panela são de comportamento básico para todos os tipos de aços produzidos, tendo como principal finalidade a compatibilidade com os refratários dolomíticos utilizados na panela. Dessa forma, os maiores constituintes dessas escórias são os elementos CaO, MgO

e SiO<sub>2</sub>. As amostras foram analisadas por fluorescência de raios X, de acordo com metodologia adotada na empresa.

Com o objetivo de se analisar a vida útil média das painéis desta Aciaria, o comportamento químico das escórias é avaliado através da coleta de amostras das mesmas, somente para o Forno Elétrico a Arco 2 (FEA2) e o Forno Painel 2 (FP2), observando que os outros fornos apresentam comportamento semelhante. A Tabela 1 apresenta o número de amostras e o momento de amostragem. O termo “FP início” se refere ao momento de chegada da escória no forno painel.

Tabela 1: Amostras de escórias por equipamento para análise dos dados.

Local	FEA final	FP Início
Quantidade de Amostras (unidades)	610	610

O período de acompanhamento dessas escórias foi de setembro de 2008 a outubro de 2009. Os meses de dezembro de 2008 e janeiro de 2009 foram descartados, tanto para análise do comportamento químico das escórias quanto para a vida média das painéis dessa aciaria, pois ocorreram diversas interrupções no processo produtivo. Para análise didática os dados foram estratificados em três períodos, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Período de monitoração dos dados de escórias/vida média de painéis

Período 1 (2008)			Período 2 (2009)					Período 3 (2009)			
Set	Out	Nov	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante o período de análise, conforme a Tabela 2, serão apresentados por equipamento FEA e FP da seguinte forma:

- Comportamento na oxidação da escória do FEA
- Comportamento na oxidação (FeO+MnO) da escória de chegada do FP
- Relação de Basicidade (CaO/SiO<sub>2</sub>) e teor de MgO no FP
- Comportamento das escórias no diagrama ternário CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO
- Evolução na vida útil das painéis na Aciaria

### Comportamento na Oxidação da Escória do FEA

Na Figura 1, pode-se avaliar a oxidação da escória do FEA em três períodos. De acordo com essa figura, pode-se avaliar uma forte redução do teor de FEO a partir do período 7, segundo período de acompanhamento dos testes. Devido a interrupções operacionais causadas pela injetora convencional na região do canal EBT, foi decidido a remoção da mesma do equipamento. Com um ponto a menos de injeção, principalmente no modo purga, melhorou-se a eficiência total do oxigênio injetado. Reduzindo-se a quantidade injetada com baixa vazão e pouca capacidade de penetração no banho, a superfície da escória é menos oxidada, reduzindo-se assim a presença de FeO na escória. Com isto também se reduziu a vazão total do oxigênio do Forno.

A redução do FeO espera-se ser benéfica aos refratários uma vez que este óxido é fundente em relação ao MgO, sendo por vezes considerado o principal fator de desgaste dos refratários<sup>3,5</sup>.

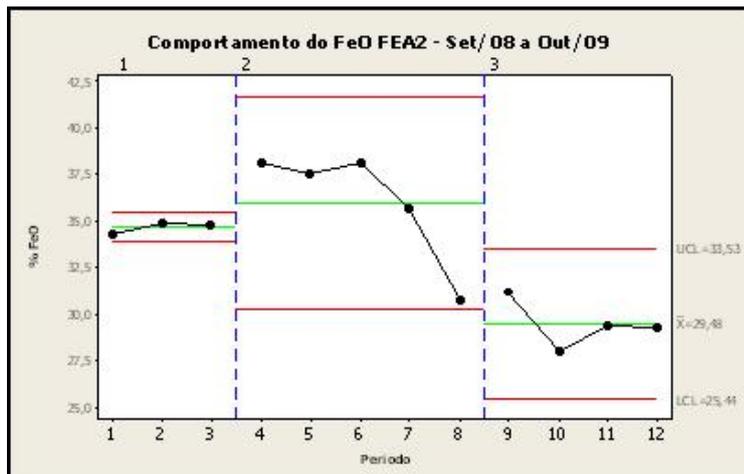


Figura 1: Oxidação da Escória (%FeO) por período Forno Elétrico a Arco 2 (FEA2).

#### Comportamento na Oxidação da Escória de Chegada do Forno Panela

Devido à redução do percentual de óxido de ferro na escória do FEA era esperada uma redução na oxidação da escória de chegada do Forno Panela. Esta oxidação é também influenciada pelos elementos desoxidantes utilizados durante vazamento ou após vazamento do aço líquido.

Na Figura 1 pode ser visto uma redução no percentual de FeO do FEA no período 8. Uma redução FeO+MnO pode também ser visualizada no período 8 da Figura 2. Porém nos períodos seguintes o FeO da Figura 1 apresenta redução e estabilidade, enquanto que a Figura 2 apresenta uma elevação FeO+MnO. Este

comportamento está associado à alteração da carga fria, já que a elevação na utilização da gusa reduziu o % Mn no banho metálico, exigindo a adição deste elemento no FP2, com um rendimento inferior ao adicionado durante vazamento do aço líquido.

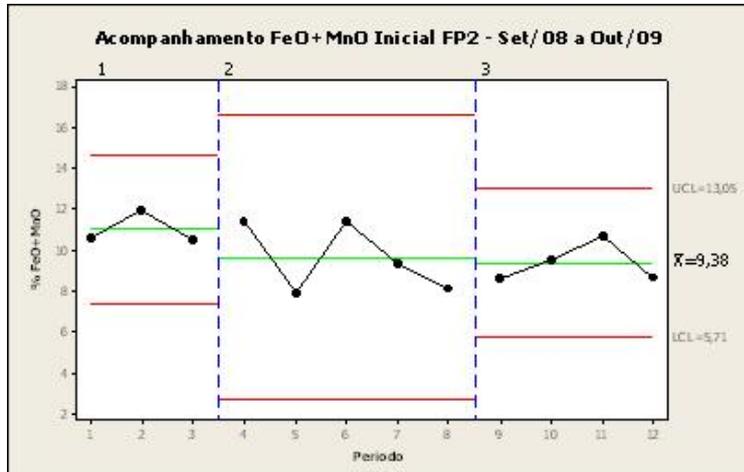


Figura 2: Oxidação da Escória FeO+MnO por período no Forno Panela 2 (FP2 inicial).

#### Relação de Basicidade (CaO/SiO<sub>2</sub>) no Forno Panela

O aumento da basicidade da escória em geral diminui a taxa de corrosão dos refratários, já que o aumento do teor de CaO leva a compostos de maiores temperaturas de fusão de acordo com o diagrama CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>. A variação de basicidade e do teor de ferro podem levar a diferentes mecanismos de deterioração de refratários (Lee e Zhang, 2004). A formação e manutenção de uma camada protetora de silicato dicálcico no revestimento desempenham papel fundamental no aumento da vida útil de refratários dolomíticos. Esta técnica é chamada de refratário *in situ*, porém o seu controle não é trivial, podendo-se perder a camada protetora, dependendo da qualidade da escória e das condições operacionais<sup>6</sup>.

Os dados analisados mostram um período em que a basicidade está relativamente baixo o que levou à elevação de 40% em peso da cal calcítica no vazamento. Assim, houve uma variação no comportamento da basicidade binária das escórias na aciaria em estudo, levando a um aumento abrupto da razão CaO/SiO<sub>2</sub> no segundo período de análise (Figura 3).

Os menores valores no Forno Panela da basicidade, no primeiro período de acompanhamento dos testes (Figura 3), está relacionado com a alteração da areia

de vedação do canal EBT, onde foi inserido no processo um produto com maior teor de sílica. Face a isso, foram alteradas as quantidades de cal calcítica no vazamento, com o objetivo de elevar a basicidade e reduzir o ataque químico, pois nesse período o teor de óxido de ferro na escória dos Fornos Elétricos apresentava-se com valores elevados conforme pode ser visto na Figura 1. Nesse período o revestimento dolomítico das placas de aço não apresentava a formação de uma camada protetora sobre a superfície do mesmo, sendo caracterizadas como “lavadas” no jargão industrial.

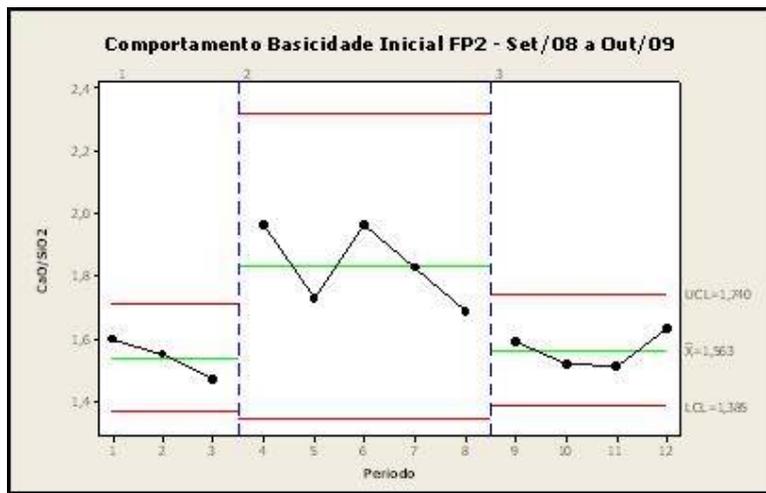


Figura 3: Basicidade Binária por período no Forno Painel 2 (FP inicial).

O segundo período, de acordo com a Figura 3, apresentou uma elevação na basicidade binária da escória, devido ao aumento da quantidade de cal calcítica durante o vazamento do aço, como dito anteriormente. Com essa alteração era esperado que o desgaste químico do revestimento dolomítico fosse minimizado, devido à formação de uma camada protetora na superfície do refratário, mesmo com o Forno Elétrico operando com elevados teores de óxido de ferro. Como previsto, nesse período, foi observado a formação da camada passivadora (*coating*) na superfície do revestimento, porém esta apresentava instabilidade, permanecendo por curtos períodos de tempo na panela. Durante o acompanhamento dessas panelas na produção do aço, foi percebida a presença deste revestimento na linha de escória e não na linha de metal. Averiguou-se também uma maior frequência de acúmulo de escórias no fundo dessas panelas. Salienta-se que escórias com basicidade elevadas apresentaram nessa aciaria um período curto de fração líquida, dando origem a uma rápida solidificação dessa escória e consequentemente

deposição no fundo das panelas. Este fenômeno é também chamado de “fundo alto” nas panelas.

A redução da basicidade no terceiro período, referente à Figura 3, proporcionou a aderência de escória na face do revestimento refratário, na região da linha de escória e linha de metal das panelas do fluxo de produção. Tal efeito contribuiu para a redução do desgaste químico do revestimento refratário, como será visto no item 4.5 (Evolução na vida Média das Panelas na Aciaria). Portanto, atribui-se à redução da basicidade para valores da ordem de 1,56 no FP2, aliadas à redução da oxidação da escória, a formação de *coating* nas panelas.

#### Teor de MgO na Chegada do Forno Panela

A Figura 4 mostra o comportamento do % MgO nas escórias do Forno Panela, logo após o vazamento do FEA. O período 1 revela que o teor de MgO nas escórias encontram-se com valores da ordem de 7,87 %. A alteração realizada do primeiro para o segundo período consistiu em introduzir, no processo de produção, a adição de cal dolomítica durante o vazamento do aço. Essa alteração deslocou a concentração média de MgO para 9,83 %. No terceiro período, as concentrações médias elevaram-se para 11,45 %, e os valores percentuais de MgO foram igualmente elevados, devido às alterações dos demais constituintes dessa escória.

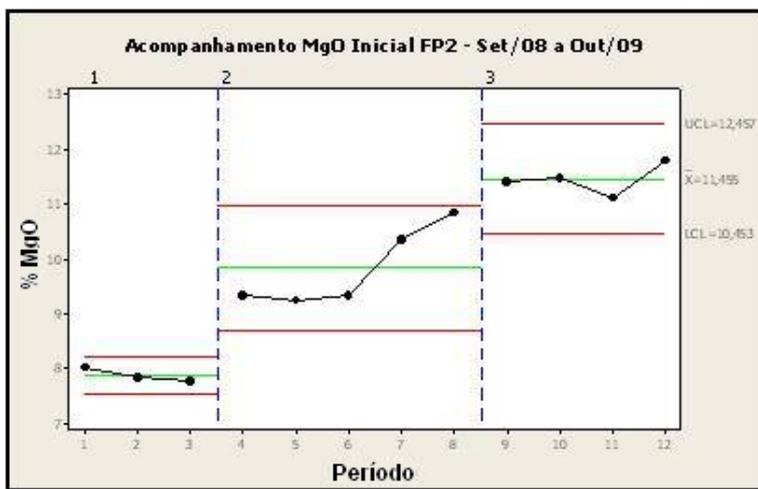


Figura 4: % MgO por período na Chegada do Forno Panela 2 (FP inicial).

#### Comportamento das escórias no diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>

Para análise no diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> os dados foram estratificados de acordo com os três períodos já mencionados, utilizando-se a média

de cada período para os valores de CaO, MgO e SiO<sub>2</sub> (Tabela 3). Para inserir os dados no diagrama (Figura 5) foi necessário calculá-los para a base 100%, isto é, a soma desses três elementos deve representar 100%. Foi introduzido no diagrama uma linha de iso-basicidade correspondente a CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 1,5 (Figura 5). De um modo geral as composições das escórias estão de acordo com as recomendações da literatura, ou seja, próximo da saturação em MgO e CaO para refratários dolomíticos<sup>(7,8)</sup>.

Tabela 3: valores referentes aos períodos plotados no diagrama da Figura 5, referentes ao Forno Panela 2 (FP2).

Período	% CaO	% MgO	% SiO <sub>2</sub>
Período 1	54,96	9,31	35,71
Período 2	56,91	11,59	31,48
Período 3	52,41	13,61	33,96

Na figura 5 pode ser observado o comportamento químico das escórias nos três períodos de acompanhamento dos testes.

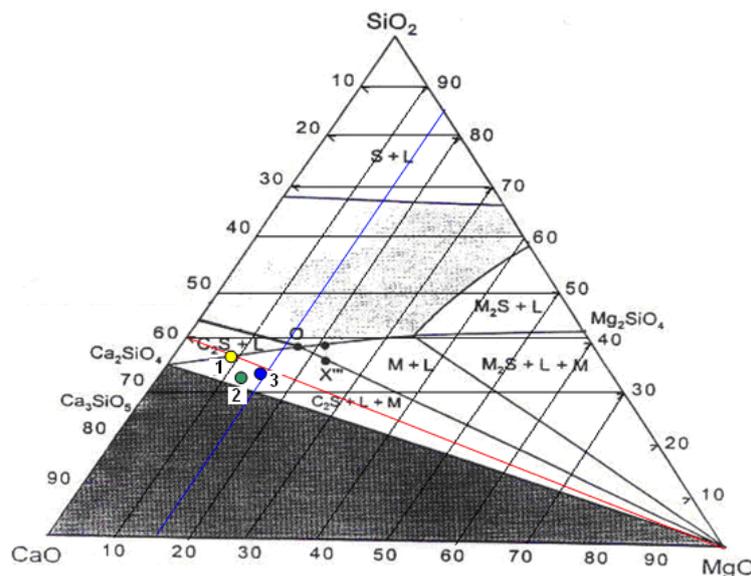


Figura 5: Comportamento das escórias FP2 no Diagrama Ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>. Plotados os períodos 1, 2 e 3 .

De acordo com as Figura 5, pode-se afirmar que as escórias no período 1 de acompanhamento dos testes, apresentavam em suas composições somente a presença do silicato de dicálcio e uma fração líquida. As alterações no processo de

produção do aço anteriormente citadas, deslocam a composição química das escórias para a região onde existe a formação do silicato de dicálcio ( $C_2S$ ), fração líquida e MgO precipitado (período 2). É importante analisar também a elevação na basicidade binária quando comparados o período 2 e o período 1. Já no período 3, existe uma redução na basicidade e aumento no teor de MgO desse equipamento.

### Evolução na vida média das Painelas na Aciaria

Na Figura 6 pode ser avaliada a evolução na vida média das painelas. O estudo proposto de avaliar os fatores de desgastes químicos que geram impacto na performance dos revestimentos dolomíticos, utilizados na painela em questão, explicam esse ganho significativo à aciaria, em termos de vida útil do revestimento refratário. A Figura 6 mostra um aumento na vida média de painelas com tendência ascendente.

A evolução na vida média de painelas foi de 20% quando comparado as médias do período 1 com o período 3. A evolução entre o mês que apresentou a performance mais baixa de 120 corridas por painela (set/2008), com relação a melhor performance de 179 corridas por painela (out/2009), corresponde a 32%.

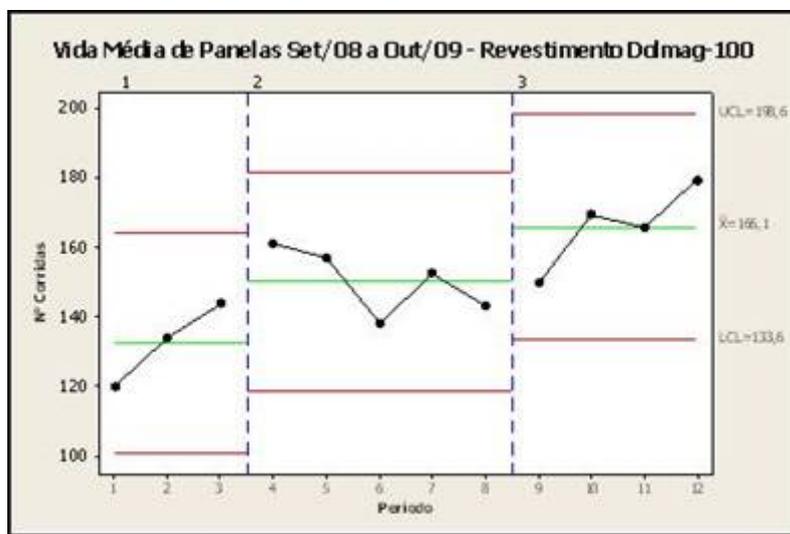


Figura 6: Evolução na vida útil das Painelas (FP2 e FP3) na Aciaria.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as alterações nos parâmetros que apresentam grande influência no desgaste químico dos refratários dolomíticos, baseado em estudos laboratoriais e teóricos, comprovaram-se em experimentos industriais.

Assim, conseguiu-se uma melhora na vida útil do revestimento refratário, a partir do controle do teor de FeO e MgO e da razão CaO/SiO<sub>2</sub>, nas escórias.

A redução do óxido de ferro na escória do Forno Elétrico a Arco (FEA), com as alterações na carga fria e no sistema de injeção de oxigênio no FEA, proporcionou um melhor controle da escória do Forno Panela (FP), já que a escória de passagem do forno para a panela de aço apresentou melhor qualidade. Isto permitiu um melhor ajuste na basicidade binária das escórias no FP, com ganho potencial à diminuição do desgaste do revestimento refratário.

A basicidade elevada nas escórias de refino secundário neste processo prejudicou a formação da camada protetora de silicato de dicálcio, não sendo possível se observar essa camada nas panelas. A redução da basicidade para valores próximos a 1,6 e a redução da oxidação da escória favoreceram a formação do revestimento protetor na superfície do revestimento, alterando a taxa de remoção dos produtos da reação entre escória e refratário, dando origem a formação do *coating*.

A utilização de cal dolomítica possibilitou a elevação na concentração do óxido de magnésio na escória. Considera-se este fator diretamente responsável pela redução do desgaste do revestimento, devido à redução no gradiente de concentração do MgO entre escória e refratário.

As alterações no processo de produção do aço proporcionaram uma elevação na vida média das panelas de aço dessa aciaria, atingindo uma melhoria de performance em média de 20% no número de corridas.

### **Referências Bibliográficas**

1. Brosnan, D.A. "Corrosion of refractories", In: Refractories Handbook, edited by Schacht, C.A., Marcel Dekker INC., New York, 2004.
2. Jansson, S., Brabie, V., Jönsson, P. Corrosion mechanism and Kinetic behavior of MgO-C refractory material in contact with CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO slag. Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 34, p. 283-292, 2005.
3. Lee, W.E Zhang, S., Direct and Indirect slag corrosion of oxide and oxide-c refractories. VII International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

4. Jansson, S., Brabie, V., Jönsson, P. Corrosion mechanism of commercial doloma refractories in contact with CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO slag. *Ironmaking and Steelmaking*, v.5 n.2, p. 99-107, 2008.
5. Mattila, R.A., Vatanen, J.P. Harkki, J.J., Chemical wearing mechanism of refractory materials in a steel ladle slag line, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v.31, 241-245, 2002.
6. Lee, W.E., Moore, R.E., Evolution of in situ refractories in the 20<sup>th</sup> century, *J.Am. Ceram. Soc.*, v.81 n.6, 1385-1410, 1998.
7. Pretorius E.B., Carlisle, R.C., Foamy Slag Fundamentals and Their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking, *Iron and Steelmaker*, 1SS, 26(10), 1999, pp. 79-88.
8. Gonçalves, G.E., Diagramas de equilíbrio aplicados as escórias e refratários na aciaria elétrica. Seminário ABM Refratários para siderurgia, Belo Horizonte, p. 37-54, mar. 2000.

## **EVALUATION OF FEA AND LF SLAGS QUALITY IN RELATION TO REFRACTORY LINING LIFE**

### **ABSTRACT**

The steel industry is continually seeking improvements in the performance of refractories, as a way to improve their competitiveness in a global market. One of the main causes of refractory wear is chemical corrosion, which is directly related to the quality of the slag. Therefore, this paper presents results of the work in which it was monitored the slag quality in EAF (electric arc furnace) and LF (ladle furnace), considering mainly the basicity, MgO content and slag oxidation. The results were related to the performance of the refractory lining in the steel ladle. The changes carried out in the industry process kept refractory lining intact, even though there was an increase in the service time.

Key-words: refractories, steelmaking, slags.