

# OTIMIZAÇÃO DA ESCÓRIA NO PROCESSO “SLAG SPLASHING” EM BOF \*

Marcos Venturoli Auad<sup>1</sup>  
Luiz Fernando Andrade e Castro<sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo avaliar as considerações mais importantes para a práticas do *slag splashing*, com respeito a adequação da escória, buscando otimizar as condições de contorno a serem consideradas para o uso da técnica com eficiência para a proteção do revestimento refratário em BOF (*Basic Oxygen Furnace*).

**Palavras-chave:** *Slag Splashing*; Proteção do revestimento refratário; BOF; Condicionamento de escória.

## IMPROVEMENT OF SLAG AT “SLAG SPLASHING” PROCEDURE AT BOF

## Abstract

This paper intend to evaluate the most importante considerations related with slag splashing procedure regarding slag conditioning, in order to optimize the boundary condition to be consider for basic oxygen furnace lining wear rate decrease.

**Keywords:** Slag Splashing; Wear rate lining decrease; Basic oxygen furnace; Slag conditioning.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista formado na EEUFMG, Consultor na Auad e Godoy Consultores Ltda, Mestrando no PPGEM.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 “*Slag Splashing*”

O *slag splashing* é hoje a técnica mais moderna de reparação preventiva do material refratário. Parâmetros operacionais do sopro de nitrogênio, tais como vazão, altura de lança são atualmente bem estabelecidos nas prática operacionais das aciaria de *BOF* (*basic oxygen furnace*) que utilizam o processo. Entretanto as práticas atualmente adotadas para correção de escória são baseadas em experiência dos operadores ou modelos bastante simples que não conseguem prever a sua variabilidade. O objetivo deste trabalho é tentar avaliar as dificuldades e possibilidades de construir modelos mais efetivos para o condicionamento da escória para o *slag splashing*.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no trabalho, foi buscar através de dados de literatura, e o levantamento de dados obtidos através do software *Digitizelt (Imac)* a construção de diagramas *ISD* (Diagramas Isotermicos de Solubilidade). Também foram estabelecidas regressões lineares e não lineares para fazer previsões através do software *Wizard (Imac)*.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adequação da escória do processo para o procedimento de *slag coating* ou ao *slag splashing* é uma das mais importantes variáveis para se obter um melhor desempenho do revestimento refratário do *BOF*. A grande dificuldade para obtenção de uma prática mais eficiente é devida de se prever durante a operação as condições de cada corrida, decidir sobre a melhor ação visando um bom *slag splashing*.

Um modelo para previsão correta da adição do *slag splashing* passa pela correta estimativa das propriedades da escória durante o *slag splashing*. As características principais a definirem esta escória são: Viscosidade, e fases sólidas formadas, principalmente, na temperatura na qual o processo ocorrerá. A grande dificuldade para criação de tais modelos está na construção de um modelo que preveja a evolução de temperatura no inicio do processo, até o seu término e qual será a evolução da composição da escória. Também a previsão de quais as fases e o do percentual de fases sólidas formadas do processo mostra uma grande dificuldade na sua previsão, uma vez que as informações sobre a evolução da temperatura e a composição química da escoria não estarão disponíveis a tempo do inicio do processo. E muitas das mesmas só serão disponíveis apos o término do procedimento. O conhecimento das fases sólidas é de fundamental importância uma vez que através delas é que é possível a real estimativa da viscosidade e da durabilidade que a prática de *slag splashing* terá.

### 3.1 – Viscosidade de escórias de alta basicidade

O efeito de fases sólidas sobre a viscosidade das escórias, altamente básicas tem maior preponderância do que a viscosidade da escória completamente líquida conforme mostra a Equação 1 de Eisten-Roscoe[1].

É necessário avaliar o valor crítico da fração de partículas sólidas acima do qual a escória viscosidade começa a aumentar abruptamente conforme Figura 1. Einstein-Roscoe propôs uma equação que descreve viscosidade de uma escória contendo fases sólidas.

$$\eta_e = \eta_0 \times (1 - a\theta)^{-n} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $n=5/2$  para partículas esféricas;  $a$  é estabelecido como 1,35 e  $\eta_0$  é a viscosidade das escórias líquidas. (2)

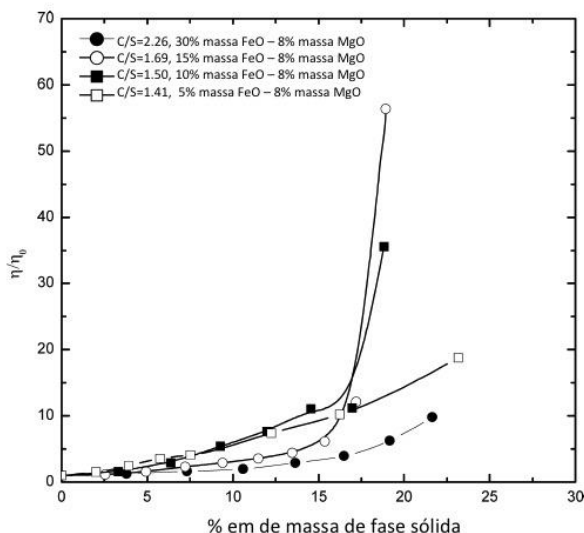


Figura 1 – Evolução da % de fases sólidas com a viscosidade relativa [1].

A figura 1 mostra que valor da viscosidade é muito sensível a variações de composição química e temperatura pois com a alteração da fração de sólidos de 12 a 25% modificará significativamente a viscosidade. Este efeito pode ser visto também na Figura 2 onde variações de 25 K na temperatura dobram o valor da viscosidade.

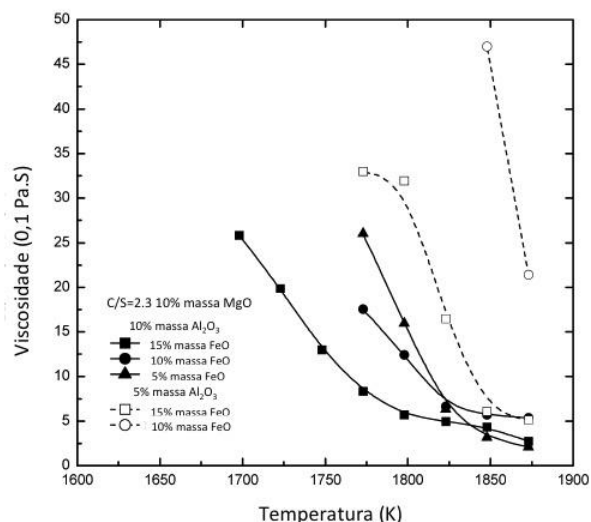
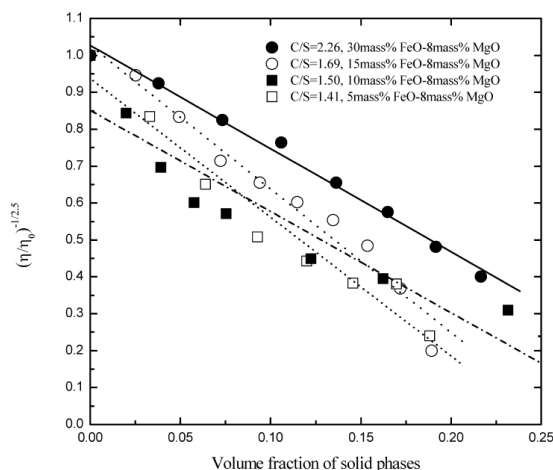


Figura 2 – Evolução da viscosidade com a temperatura e composição [1].

Ao se linearizar o gráfico da Figura 2 obtemos a Figura 3. As equações de regressão mostram intercepto próximo a 1 ou seja com a fase sólida igual a zero, a viscosidade

é próxima da viscosidade líquida, mas que a inclinação, no caso real fica entre 2,74 a 3,89 dependendo do teor do FeO, ou seja diferente do 1,35 previsto na Equação 1.



**Figura 3** – Evolução da volume fracionário de fases sólidas com a viscosidade relativa [1].

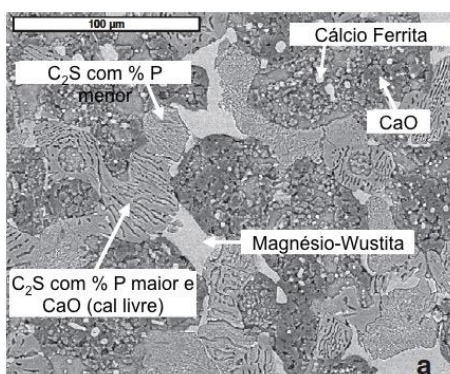
Entretanto é possível fazer uma previsão da percentagem de sólidos para estimar qual a viscosidade final para uma escória, usando-se o modelo com o coeficiente sendo uma função do percentual de FeO e da basicidade [2].

O FeO deve ser estimado em função dos dados que estarão disponíveis ao fim do sopro, (oxigênio solúvel, temperatura fim de sopro e composição química do aço ao final do sopro).

## 2.2 Fases sólidas e quantidade de fases sólidas

Na literatura existem investigações bem fundamentadas sobre comportamento das fases em escórias de *BOF*. As fases presentes na escória sofrem uma influência significativa das velocidade de resfriamento [3]. No cálculo da viscosidade para escórias de alta basicidade, é necessário saber a quantidade de fases sólidas presentes. Também é essencial o conhecimento de quais as fases sólidas estarão presentes na escória para a condição de contorno da corrida em análise.

São mostradas as fases estáveis para *BOF* em condições de resfriamento em ambiente industrial, conforme Figura 4.



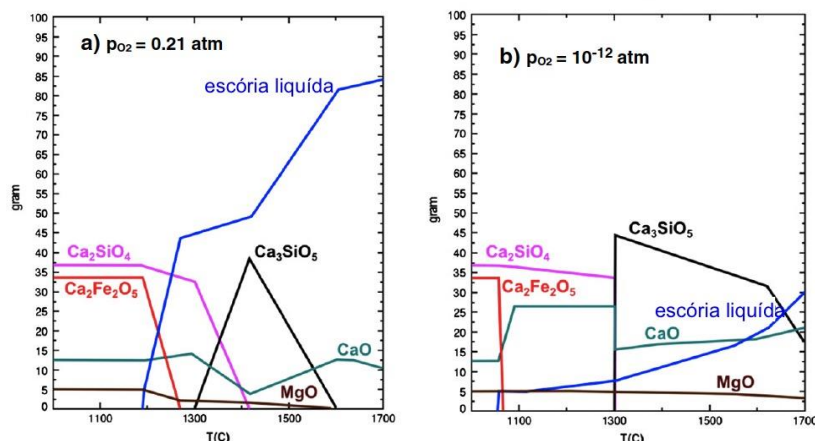
**Figura 4** – Fases presentes na escória de *BOF* com condições de resfriamento de área industrial [3].

Conforme literatura foram analisadas escórias de *BOF* e para a amostra presente na Figura 4 com condições de resfriamento em área industrial. As fases presentes estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Fases presentes em escória de *BOF* para resfriamento em área industrial [3]

Fase presente	% Fase
C <sub>2</sub> S (2CaO.SiO <sub>2</sub> com maior teor de P)	22,0
C <sub>2</sub> S (2CaO.SiO <sub>2</sub> como menor teor de P)	29,4
Cálcio Ferrita	20,7
CaO Livre (com FeO <sub>x</sub> )	13,2
Magnésio Wustita [(Mg.Fe) <sub>ss</sub> O]	13,1
Periclásio (com FeO <sub>x</sub> )	1,7

Analisando a evolução das fases durante o resfriamento, para condições de alta oxidação,  $P_{O_2} = 0,21$  atm (Figura 5a) e baixa oxidação  $P_{O_2} = 10^{-12}$  atm (Figura 5b), podemos ver que campos de escórias líquidas para temperatura de 1973 K passa de 85 gram para 35 gram. Este comportamento da escória também é retratado nos estudos de viscosidade [1].



**Figura 5a e 5b** – Simulação das fases presentes na escória de *BOF* durante a sequência de solidificação [3].

### 2.3 Diagramas *ISD*

A construção dos diagramas de isotérmicos de saturação (*ISD* – *Isotherm Saturation Diagram*) com saturação dupla em MgO e CaO, é uma técnica extensamente utilizada e reportada em literatura [2,4] para a produção de escória espumante (*Foamy Slag*) em fornos elétricos a arco (*EAF*). Através da previsão de basicidade, FeO, MgO e temperatura é possível construir os *ISD* para as escórias do sistema e conhecer em quais condições serão possíveis. A escória espumante que depende fundamentalmente da basicidade e por conseguinte do tipo de fases sólidas formadas, bem como sua quantidade relativa. As fases principais de interesse para o sistema em questão seriam o C<sub>2</sub>S e a magnésio wustita conforme mostra o *ISD* genérico (Figura 6) usado para a prática de escória espumante. Segundo Mills et al [5] para uma boa prática de slag splashing um balanço entre fases de alto ponto de fusão e baixo ponto de fusão, é fundamental não só pelo ajuste da viscosidade, mas porque fases de alta refratariedade funcionam como isolantes e barreiras a corrosão e decarbonetação do refratário. Já as fases de

baixo ponto de fusão atuam como ligantes para aderências das fases de alto ponto de fusão [6].

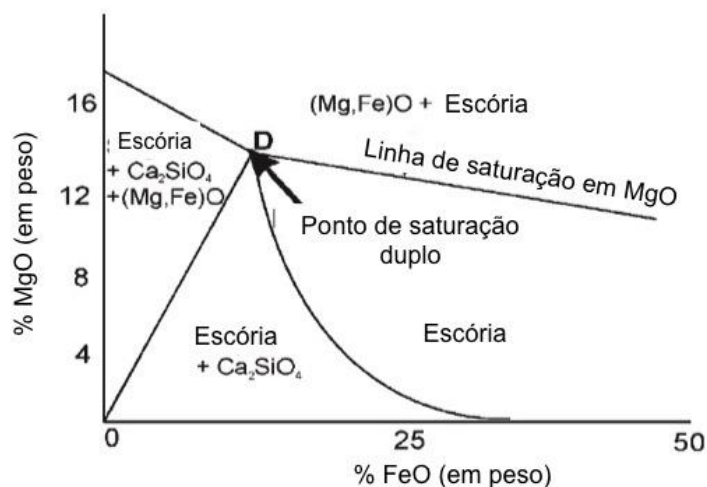


Figura 6 – Diagrama genérico ISD usado para a prática de escória espumante [4].

Devido a similaridade das temperaturas e análises químicas das escórias, os mesmos podem ser utilizado para avaliação das condições operacionais e quais intervenções devem ser feitas para o condicionamento das escórias para o processo de *slag splashing* em BOF.

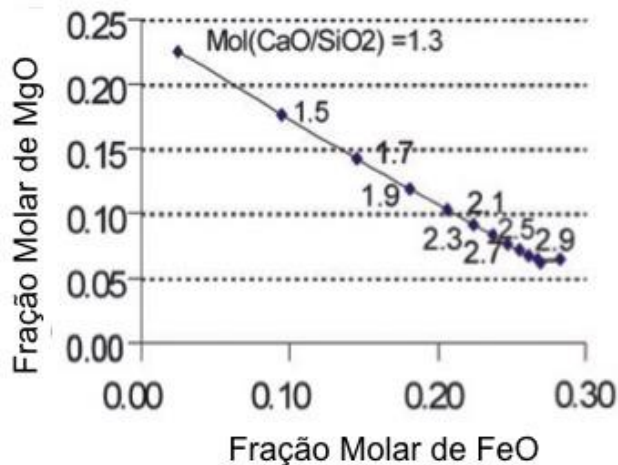


Figura 7 – Efeito da basicidade para o ponto de dupla saturação com temperatura em 1873 K e  $P_{O_2} = -4,722$  [4].

Também através dos ISD é possível introduzir o efeito de outros óxidos como o  $Al_2O_3$  e o  $MnO$  presentes na escória de BOF. Esta análise é feita através da introdução de basicidades ternárias.

## 2.4 Previsão da variação da temperatura no início e ao longo do processo de *slag splashing*

Conforme já descrito no texto a temperatura é um fator preponderante também no tipo de fase formada, na quantidade de fases sólidas e também na viscosidade e portanto, qualquer modelo necessariamente, tem que fazer uma previsão da mesma. Entretanto a previsão traz um grau de dificuldade grande uma vez que após verificada a temperatura de fim de sopro, várias variáveis impactam na evolução da temperatura. Uma proposta de modelo de balanço térmico é feita na Figura 8. As variáveis de maior dificuldade para um balanço térmico estão ligadas as perdas térmicas, devidas a transmissão de calor por convecção, radiação e convecção as quais trazem um grau alto de dificuldade para serem estimadas. Também o tempo é uma variável importante e qualquer balanço térmico deve ser feito em função dos tempos de processo, para retirada de escória e também para início do slag splashing propriamente dito.

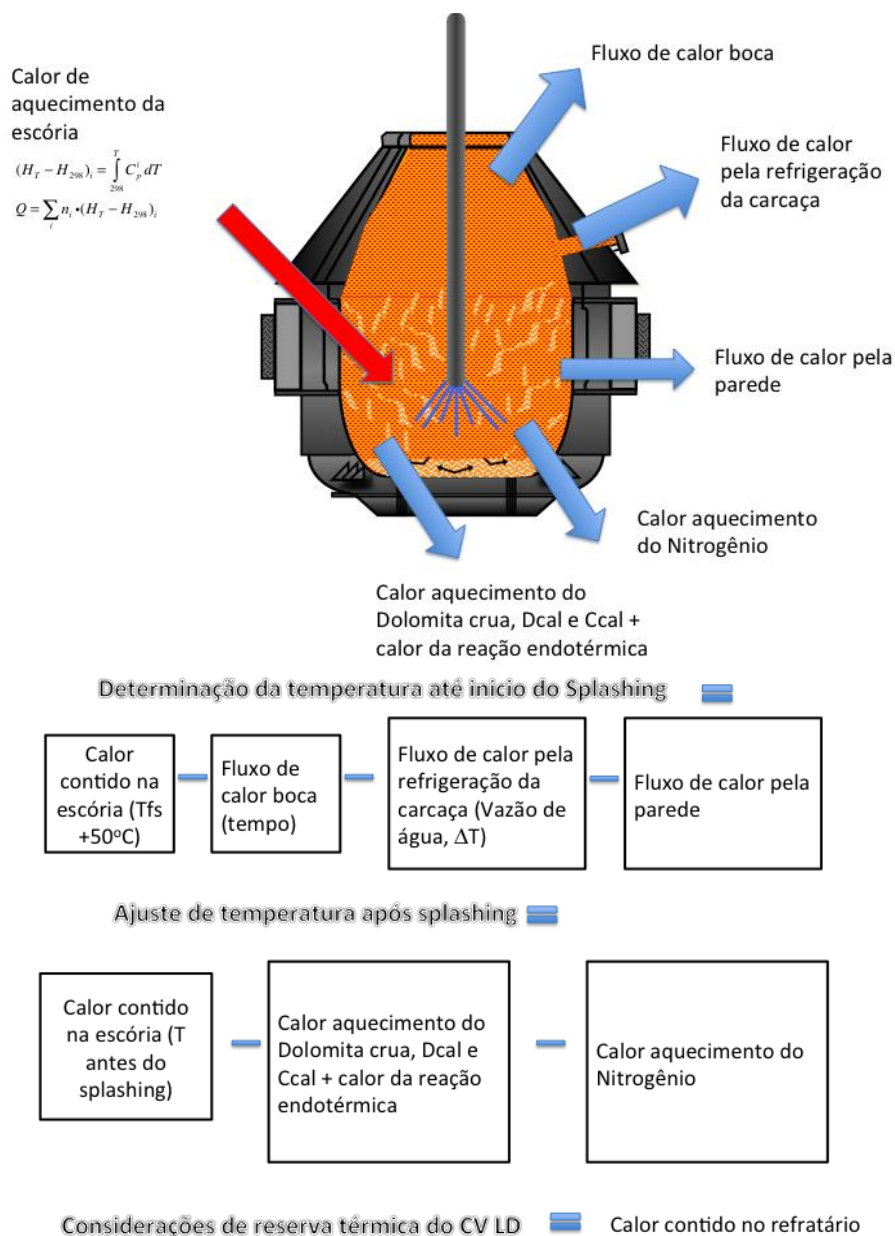


Figura 8 – Esquema de balanço térmico para *slag splashing* para BOF.

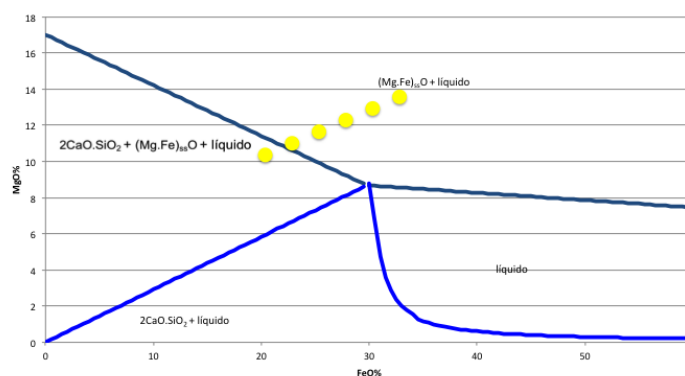
## 2.5 Considerações de ordem prática sobre o modelo do processo de *slag splashing*

Portanto devido a todas estas incertezas advindas da dificuldade de se obter dados confiáveis, a melhor abordagem é a de se ater aos parâmetros disponíveis que são a temperatura final de sopro do banho metálico, oxigênio solúvel, análise da composição final do aço ao final de sopro.

Estes parâmetros podem fornecer informações para um modelo que de forma incipiente já começam a aparecer nas usinas. O modelo é ajustado em função de práticas operacionais e precisa contemplar algumas questões que tem forte impacto sobre a característica da escória:

- Ressopros sem subsequente análise de temperatura, oxigênio solúvel e composição química;
- Adições de minério de ferro, sínter ou pelota após 85% do sopro, as quais alteram as condições de equilíbrio da escória e o nível de oxidação da mesma;
- Adições de cal, dolomita crua, Fe-Si, CaSi; briquetes de lama, etc;
- Problemas de built-up de cascão de sola gerando variações de nível de banho.

O modelo usaria uma configuração com escória típica por família de aço que tenham como similaridade padrões de sopro, adições, e fim de sopro visado semelhante, e usando como base a escória típica para estas “famílias”. Seria feita uma análise de equações de viscosidade e de fases líquidas priorizando-se a precipitação de magnésio wustita de alto ponto de fusão (alto teor de MgO). No *ISD* da Figura 9 o campo assinalado em amarelo seria um campo ótimo para a prática do *slag splashing*, ressaltando-se as condições adversas ao condicionamento de escória (FeO acima de 30% e temperatura 1973K).



**Figura 9** – *ISD* com campo para condições ótimas de splashing considerando B3=3,36 e Temperatura 1973K.

Os materiais mais adequados para um modelo de slag splashing seriam: Cal Dolomítica, Dolomita Crua ou materiais ricos em MgO. As experiências e a literatura mostram que o uso deste materiais, tais como sucatas de tijolos usados ou novos (de MgO-C e MgO queimado), resíduos de fabrica, Magnesita, ou briquetes ricos em MgO (Magnesita+Mg(OH)), são muito mais efetivos para reparos pois geram magnésio wustita de alto ponto de fusão conforme mostra o *ISD*. Entretanto este tipo de adição normalmente tem duas desvantagens: maior custo e dificuldade de aplicação um vez que interferem na rotina dos *BOF* ao serem adicionadas nas caixas de sucata. Normalmente estes materiais tem maior custo e ficam em uma



faixa intermediária entre reparos com massas (*gunning ou patching*) e o *slag splashing* de rotina. Com relação a escolha entre cal dolomítica ou dolomita crua, além da questão de custo existem questões de ordem técnica, uma vez que a decomposição da dolomita crua ocorre de uma vez em CaO e MgO, com o controle da reação ocorrendo por transferência de calor o qual gera uma porosidade no material que tem infiltração instantânea da partícula pela escória [7]. Entretanto a dolomita crua tem seu uso limitado devido a questões de reação principalmente em corridas com escórias mais oxidadas que são justamente as que exigem um maior volume de adição. Isto leva a um tempo maior de tratamento da escória ou a riscos operacionais que normalmente levam cada usina a estabelecer um limite que fica em torno de 5 a 10 kg/tonelada de aço líquido.

#### 4 CONCLUSÕES

1. O desenvolvimento de um modelo prevendo as adições de compostos com conteúdo em MgO, visando a formação de magnésio wustita [(Mg.Fe)<sub>ss</sub>O] de alto ponto de fusão deve ser o objetivo principal em modelo de adição para o slag splashing;
2. O uso de *ISD* (Diagramas Isotérmicos de Saturação) assim como geração de escória espumante em *EAF*, é uma ferramenta útil no modelo;
3. O ajuste da quantidade de fases sólidas e fases líquidas é importante não só para a viscosidade, mas também para aderência da escória ao refratário;
4. Uma solução para previsão de temperatura ao início e durante o processo de slag splashing é fundamental para o modelo;
5. É importante que o modelo seja baseado nas informações disponíveis antes da procedimento e também em questões operacionais que irão afetar a escória;
6. Deverão ser investigados o comportamento dos óxidos MnO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG que colaboraram na execução dessa pesquisa e pelo auxílio técnico proporcionado

#### REFERÊNCIAS

- 1 Seok SH, Jung SM, Lee YS, Min DJ. Viscosity of Highly Basic Slags. *ISIJ International*. 2007 June; 47(8): p. 1090–1096.
- 2 Pretorius EB, Carlisle RC. Foamy Slag Fundamentals and their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking. In 1998 Electric Arc Furnace Conference; 1998; New Orleans: ISS. p. 1-24.
- 3 Gautier M, Poirier J, Bodénan F, Franceschini G, Véron E. Basic oxygen furnace (BOF) slag cooling: Laboratory characteristics and prediction calculations. *International Journal Of Mineral Processing*. 2013 May; 123: p. 94-101.
- 4 Bennett J, Kwong KS. Thermodynamic studie of MgO saturated EAF slag. *Iron and Steelmaking*. 2010 March 28: p. 529-535.
- 5 Mills KC, Su Y, Fox AB, Li Z, Thackray RP, Tsai HT. A Review of Slag Splashing. *ISIS International*. 2005 January; 45(5): p. 619-633.
- 6 Yuan Z, Wu Y, Zhao H, Matsuura H, Tsukihashi F. Wettability Between Molten Slag and MgO-C Refractories for the Slag Splashing Process. *ISIJ International*. 2013 January;

53(4): p. 598-602.

- 7 Deng TF, Du SC. Dissolution Mechanism Of Dolomite in Converter Slag at 1873 K. Institute of Materials, Minerals and Mining Journal. 2012 December; 3(1): p. 1-6.