

# ESPUMAÇÃO DE ESCÓRIAS EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO\*

Thiago Durante<sup>1</sup>  
Ana Paula Littig Berger<sup>2</sup>  
Thiago Avelar<sup>3</sup>  
José Roberto de Oliveira<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho buscou um estudo comparativo, em que, sete escórias produzidas em laboratório e quatorze escórias industriais foram analisadas. Assim, baseando-se em suas composições e resultados obtidos com Factsage 7.0, foram medidas as condições de espumação mais vantajosas, tanto em relação às propriedades, quanto à sua composição. Das escórias produzidas em laboratório, a melhor condição de espumação foi observada com uma composição de 8% FeO, 22% MgO, propriedades de 12% de fases precipitadas, uma basicidade ternária entre 1,2 a 1,4, viscosidade a cerca de 0,5 Poise e índice de espumação próximo as 12,31s. As escórias industriais não apresentaram valores dentro destes parâmetros, no entanto, com as análises, foi possível identificar que existem diversas combinações de composições que proporcionem um processo otimizado, todas relacionadas às seguintes melhorias: Redução dos níveis de FeO, visando maiores rendimentos e maior viscosidade das escórias espumantes; Aumento do teor de MgO, buscando a saturação e garantia de segundas fases precipitadas; Aumento do rendimento das reações de carbono, reduzindo suas adições.

**Palavras-chave:** Fornos elétricos a arco; Redução de custos; Espumação de escória; Condicionamento de escória; Índice de espumação.

## SLAG FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACES

### Abstract

This paper carried out a comparative study, in which, seven laboratory produced slags and fourteen industrial slags were analyzed based on its compositions and Factsage 7.0 results, in order to measure the most advantageous foaming conditions both in relation to the properties and composition. From the laboratory slags, the best foaming condition were observed with a composition of 8% FeO 22% MgO, and properties of 12% of precipitated phases, a ternary basicity of 1.2 to 1.4. viscosity at about 0.5 Poise and foaming index closer to 12,31s. The industrial slags did not showed values within these parameters, however, with the analysis, it was possible to identify that there are vast compositions combinations that will provide an optimized process, and all related to the following improvements: reducing the FeO levels, aiming at superior race yields and higher viscosity of foaming slags; Increase of MgO contents pursuing saturation and to provide precipitated second phases; Increase the yield of the carbon reactions, reducing its additions.

**Keywords:** Electric arc furnaces; Cost reduction; Foaming slag; Slag conditioning; Foaming index.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista e Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Vice-presidente e gerente geral, Vesuvius, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira Metalurgista e Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>4</sup> Prof. Dr. do Instituto Federal do Espírito Santo, dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Vitória, ES, Brasil..

## 1 INTRODUÇÃO

A espumação de escórias é uma técnica que consiste no aumento de seu volume para a cobertura do arco elétrico, uma vez que, durante o processo de refino, o arco não está mais coberto por sucata (PRETORIUS e CARLISLE, 1998)[1]. A literatura tem diversas comprovações da eficiência do processo, onde se pode reduzir o consumo de energia de 10 a 30% e o consumo de refratário de 25 a 63% (KWONG, BENNET, et al 2009)[2].

Segundo diversos autores como, Jones [3]; Pretorius e Carlisle [1]; Pfeifer e Kirschen[4], se pode listar os principais benefícios da espumação de escória como sendo:

- Redução do consumo de eletrodos, energia elétrica e refratários;
- Redução nas perdas térmicas para as paredes do forno;
- Maior transferência de calor do arco para o banho, permitindo maiores potenciais de operação;
- Redução na intensidade de ruídos elétricos e sonoros.

Assim, buscando estes benefícios, este trabalho analisará escórias produzidas na dissertação de Avelar[5], e escórias produzidas industrialmente, realizando um estudo comparativo, com a finalidade de avaliar as composições e propriedades de cada escória, levando em conta que, a prática de escórias espumantes apresenta diversas variáveis e nem sempre o processo é de fácil controle.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e métodos

Este artigo se baseou em um estudo comparativo no qual foram analisadas duas situações. Sete escórias tiveram suas propriedades e composições determinadas empiricamente por Avelar[5], servindo de base para as comparações, e quatorze escórias foram avaliadas no processo industrial. As etapas de realização estão descritas nos tópicos abaixo.

- Coleta de dados das escórias de laboratório;
- Análise dos parâmetros das escórias de laboratório.
- Definição das melhores condições de espumação observadas.
- Coleta de dados das escórias industriais.
- Análise das escórias industriais e comparação com as melhores condições observadas.

#### 2.1.1 Coleta de dados

Os dados de composição, altura da escória, e tempo de espumação foram coletados diretamente da dissertação de Avelar[5].

Em seu trabalho foi analisada, inicialmente, uma escória sintética que deu origem a seis escórias finais, denominadas sequencialmente de B01 a B06. Estas escórias foram produzidas com a adição de briquetes fabricados com uma mistura de tijolos refratários de MgO-C e sínter dolomítico.

Para a análise das escórias industriais foram coletadas a composição da escória e a injeção de carbono durante a corrida. A composição foi obtida com a amostragem da escória espumante, retirada diretamente do processo e a análise feita por

espectroscopia de fluorescência de raios-x, com equipamento PANalytical modelo Epsilon 3X. Os dados de injeção de carbono são obtidos diretamente do sistema da empresa, conforme sua adição é prevista nos padrões operacionais de operação.

### 2.1.2 Cálculos com Factsage e Parâmetros analisados

O software Factsage 7.0 foi utilizado para as simulações de equilíbrio das escórias, onde foram carregadas ambas as composições das escórias de laboratório e industriais. A função utilizada foi a “Equilib” com a base de dados “FToxid”, desta forma foram obtidos as frações de fases precipitadas de MgO.

As viscosidades das escórias também foram calculadas com o software em sua função “viscosity”, contudo, apenas a viscosidade na fase líquida é obtida por este método. As escórias de laboratório apresentaram fases sólidas de MgO tendo sua viscosidade efetiva calculada com a equação 1.

$$\eta_e = \eta (1 - 1.35\Theta)^{-5/2} \quad (1)$$

Onde:

$\eta_e$  - Viscosidade efetiva (Poise);

$\eta$  - Viscosidade da fase líquida. (Poise);

$\Theta$  - Fração de fases precipitadas ( $0 < \Theta < 0.74$ ).

Com a coleta de dados os seguintes parâmetros foram calculados, tanto para as escórias de laboratório como as industriais.

- Índice de espumação;
- Consumo de carbono;
- CO formado;
- Basicidade ternária.

O índice de espumação foi calculado por dois métodos diferentes, o primeiro elaborado por Ito e Fruehan[6] e o segundo por Mills e Keene[7], uma vez que, no processo industrial não é viável a medição da altura da escória e o tempo de espumação, o forno industrial conta com movimentos de basculamento e várias etapas de adição de carbono, dificultando tal procedimento, logo, as escórias de laboratório seguiram a equação 2 e a escórias industriais a equação 3.

$$\Sigma = \frac{\Delta h}{v_g^s} \quad (2)$$

Onde:

$\Sigma$  - Índice de espumação (s);

$\Delta h$  - Altura da escória (m);

$v_g^s$  - Velocidade superficial do gás (m/s).

$$\Sigma = 570 \frac{\eta}{\sqrt{\sigma\rho}} \quad (3)$$

Onde:

$\eta$  - Viscosidade da fase líquida (Poise);

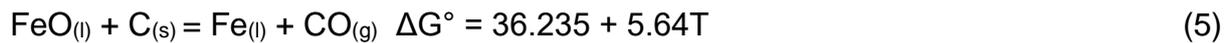
$\sigma$  - Tensão superficial (N/m);

$\rho$  - Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

O Consumo de carbono e a formação de CO, para as escórias laborais, foram calculados conforme a variação de FeO apresentada entre a escória sintética e as seis escórias finais, seguindo a equação 4. Os valores de todos os componentes estão em porcentagem em massa.

$$\Delta\text{FeO} = \% \text{FeO}(\text{escória sintética}) - \% \text{FeO}(\text{escória final}) \quad (4)$$

A variação de FeO esta diretamente relacionada com o carbono consumido e a geração de CO, conforme a reação 5 de redução do FeO nos fornos elétricos.



Assim, obedecendo à estequiometria da reação os valores de carbono consumido e CO formado, em mols, foram obtidos. Sendo o carbono consumido recalculado para massa em quilogramas (kg) e o CO formado em volume, obtendo seu valor em metros cúbicos (m<sup>3</sup>). Estes mesmos procedimentos foram aplicados às escórias industriais.

Por fim, a basicidade ternária tem sua obtenção simples, conforme a equação 6.

$$B_3 = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (6)$$

## 2.2 Resultados e discussão

### 2.2.1 Análise das escórias de laboratório

A tabela 1 mostra a composição das escórias de laboratório, originadas da escória sintética inicial.

**Tabela 1.** Composição química das escórias de laboratório

Escória	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Sintética	28,89	5,08	15,08	2,51	4,95	0,03	0,10	43,15	0,02	0,02	0,12
B01	20,45	31,78	24,65	5,08	9,21	0,14	0,03	8,25	0,10	0,18	0,06
B02	28,97	30,73	22,16	4,55	5,74	0,14	0,12	7,00	0,05	0,22	0,07
B03	30,47	28,97	21,03	4,22	6,31	0,15	0,09	8,29	0,06	0,10	0,02
B04	33,37	22,31	22,80	4,10	8,00	0,18	0,16	8,26	0,06	0,10	0,06
B05	28,31	19,73	21,01	6,76	9,11	0,24	0,15	14,38	0,08	0,06	0,07
B06	29,55	25,49	16,54	4,36	7,82	0,30	0,28	15,27	0,03	0,08	0,02

Valores em porcentagem em massa. Fonte: Avelar[5]

#### 2.2.1.1 Análise do índice de espumação

A tabela 2 apresenta os dados calculados para a obtenção do índice de espumação. Para proximidade de valores com o valor real, foi utilizado uma base de 0,25kg de escória, de acordo com a quantidade de escória produzida nos experimentos de Avelar[5].

**Tabela 2.** Indicadores de espumação, variação de FeO e CO formado das escórias de laboratório

Slag	Altura de espumação (m)	Tempo de espumação (s)	ΔFeO (%Massa)	CO formado (m <sup>3</sup> )	Índice de espumação (s)
B01	0,040	10	34,90	0,0298	2,63
B02	0,025	17	36,15	0,0309	2,70
B03	0,025	23	34,86	0,0298	3,79
B04	0,055	34	34,89	0,0298	12,31
B05	0,030	25	28,77	0,0246	5,99
B06	0,050	26	27,88	0,0238	10,71

Fonte: Autor

O índice de espumação confere uma noção do tempo médio de deslocamento do gás na camada de espuma, logo, reflete todos os valores discutidos neste trabalho

em um ranking onde os maiores valores indicam melhores condições de espumação. Como esperado, a escória B04 apresentou o melhor valor, seguido da escória B06. Assim, pode-se afirmar que para valores do índice de espumação próximos a 12,31s tem-se uma boa espumação.

### 2.2.1.2 Análise da viscosidade efetiva

Seguindo as tendências previstas na teoria, as escórias mais viscosas (B01, B02 e B03), têm menores valores de índice de espumação, similarmemente como observado a escória mais fluída, B05, quando comparado com as escórias B04 e B06.

A figura 1 relaciona a viscosidade efetiva com o índice de espumação, onde se pode observar como o índice é acentuado para as escórias B06 e B04 em relação com as demais, configurando a viscosidade objetivada entre seus valores de 0,443 a 0,499 Poise.

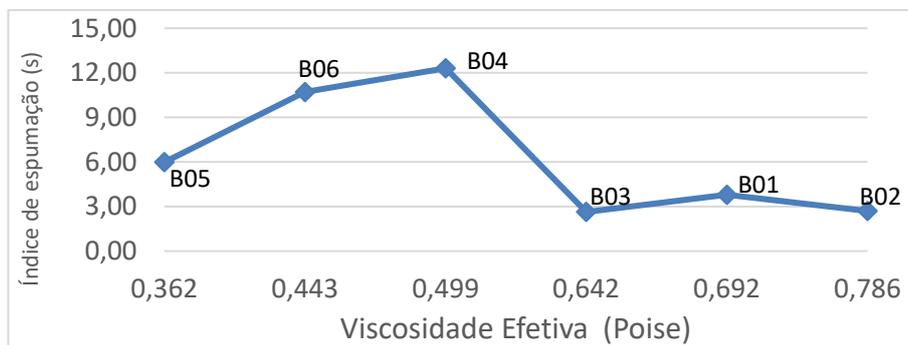


Figura 1. Relação entre o índice de espumação e a viscosidade efetiva. Fonte: Autor.

### 2.2.1.3 Análise do efeito do FeO

A figura 2 abaixo exemplifica bem sobre como, além do FeO, outros parâmetros também interferem na viscosidade das escórias.

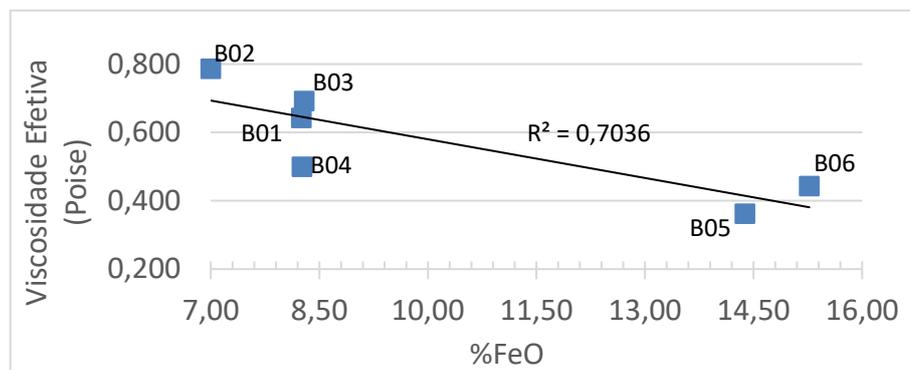
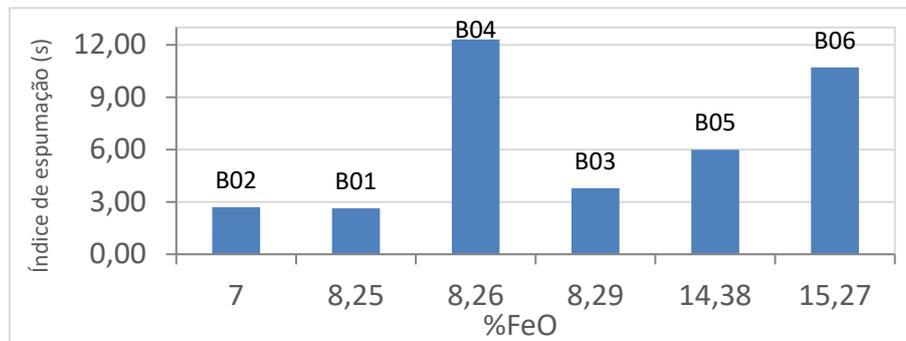


Figura 2. Relação entre a viscosidade efetiva e a %FeO. Fonte: Autor.

Apesar do comportamento linear decrescente, conforme o teor de FeO aumenta, como é esperado, observa-se que para teores semelhantes têm-se viscosidades diferentes. Primeiramente, pode-se analisar a escória B02 que apresenta a menor porcentagem de FeO (7,0%) e a maior fração de fases precipitadas de MgO (0,1904). Portanto, há coerência em ter a maior viscosidade apresentada, no entanto, as escórias B01, B03 e B04, têm valores semelhantes de %FeO, mas suas viscosidades efetivas são díspares, isto ocorre, principalmente, pela diferença de basicidade entre elas, que será discutida no tópico seguinte.

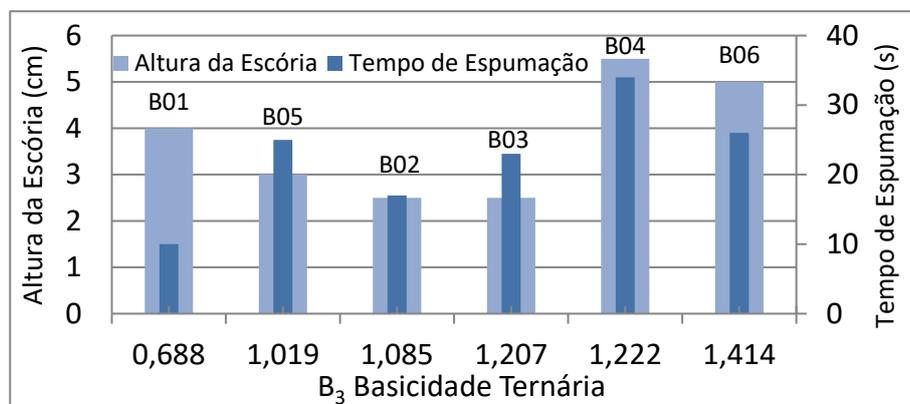
Com a figura 3, é observado como condições de espumação aceitáveis podem ser obtidas com %FeO entre 8,26 a 15,27%. Desta forma, quando analisada esta variável de isoladamente de um ponto de vista industrial, o valor desejado será sempre o menor, no entanto, é possível afirmar que os valores de FeO devem ser utilizados para controlar a viscosidade e, tendo as propriedades favoráveis, as escórias espumantes podem ter diversos teores, sendo o melhor visualizado de 8,26%.



**Figura 3.** Relação entre a %FeO e o índice de espumação. Fonte: Autor.

#### 2.2.1.4 Análise da basicidade

A basicidade afeta tanto a viscosidade quanto os indicadores de espumação, como embasado na literatura e nos gráficos ISD desenvolvidos por Pretorius e Carlisle[1]. A figura 4 apresenta a relação entre a basicidade ternária e a altura e tempo de espumação



**Figura 4.** Relação entre a altura, o tempo de espumação e a basicidade ternária. Fonte: Autor.

Com a figura 4, pode-se ver como as melhores escórias (B04 e B06) de basicidade ternária entre 1,222 e 1,414. Assim, fica claro que os maiores valores de basicidade proporcionaram as melhores espumações. Desta forma, para uma avaliação inicial de uma escória, a basicidade se mostra um fator essencial, porém apenas sua avaliação em separado não é suficiente para trazer uma espumação sucinta, depende também de suas interações com as outras propriedades.

#### 2.2.1.5 Análise do carbono consumido e de CO formado

O carbono consumido, na geração de cada escória, está diretamente relacionado com a formação de gases. Desta maneira, ele foi calculado através da variação do teor de FeO da escória sintética inicial até as formulações finais, e é representado

na tabela 3. O parâmetro de 10t de escória foi utilizado como referência para o cálculo e para se comparar futuramente com os resultados obtidos nas escórias.

**Tabela 3.** Carbono consumido e CO formado

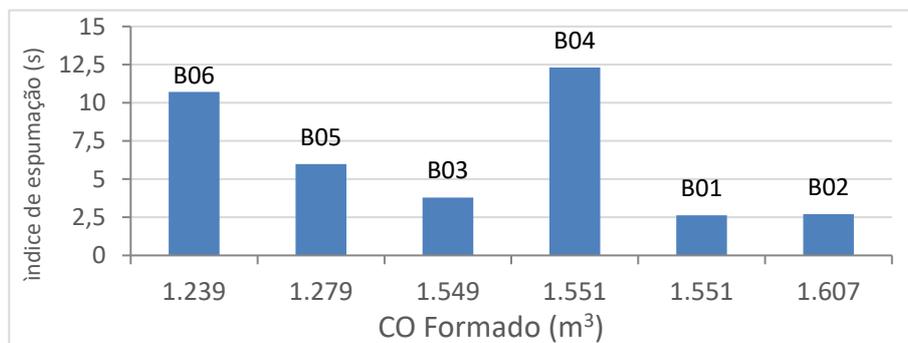
Escória	Carbono consumido (kg)	CO Formado (m <sup>3</sup> )
Sintética	-	-
B01	583,45	1551,14
B02	604,34	1606,69
B03	582,78	1549,36
B04	583,28	1550,69
B05	480,97	1278,69
B06	466,09	1239,13

Fonte: Autor

A quantidade de carbono com os melhores resultados de espumação ocorreu para a escória B04 (583,28kg). No entanto, a escória B06, que também teve resultados satisfatórios de espumação, teve apenas 466,09 kg de carbono consumido. Analisando pela viscosidade das escórias, vê-se que a escória B06 apresenta menor viscosidade, de forma que, mesmo com menor geração de CO, têm-se a segunda melhor altura de espumação observada.

De um ponto de vista industrial, onde é objetivado ter o menor consumo, é desejável que as condições de espumação sejam alcançadas com a melhor eficiência de reação possível, assim, o valor de 466,09 kg de carbono para a escória B06 é mais vantajoso.

A figura 5 demonstra como a configuração é dependente do consumo de carbono, visto que as conclusões são basicamente as mesmas, valores de CO formado em torno de 1553m<sup>3</sup> indicam uma espumação desejável, de acordo com a escória B04, porém, com valores próximos a 1250m<sup>3</sup>, a escória B06 também apresenta condições adequadas de espumação, consumindo menos carbono.



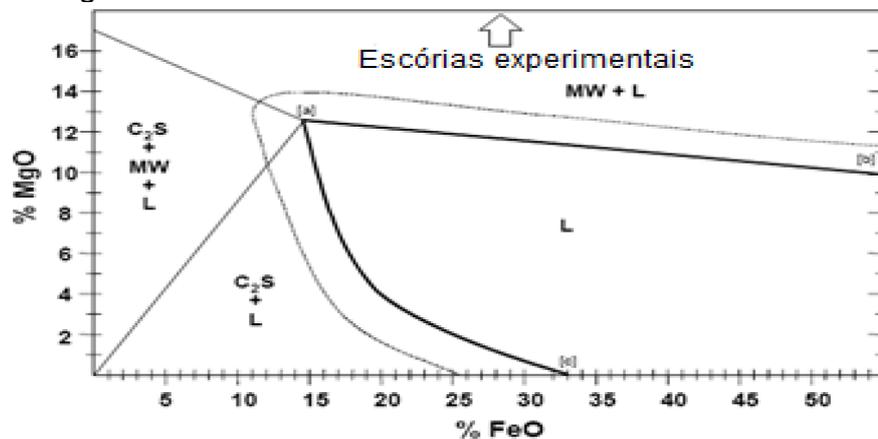
**Figura 5.** Relação entre o índice de espumação e o CO formado. Fonte: Autor

### 2.2.1.6 Efeito do MgO e suas fases precipitadas

A saturação em MgO é essencial para o processo, no qual são visados não só a melhora na formação de bolhas e da espumação em si, mas também a proteção do refratário do forno. Sendo assim, seu efeito é de suma importância para esta análise. Fases precipitadas de MgO exercem a função de aumentar a viscosidade e criar pontos de nucleação de bolhas, porém, seu excesso pode causar o aumento indesejado da viscosidade.

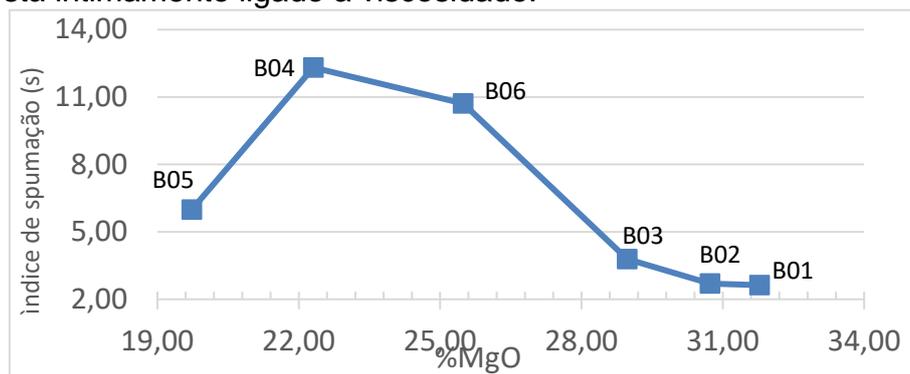
Com auxílio dos diagramas ISD elaborados por Pretorius e Helmut [8], na figura 6, se comprova a supersaturação das escórias de laboratório, uma vez que o menor

valor de MgO observado foi de 19,73% para a escória B05, e mesmo este já se encontra acima da área do gráfico, onde há a formação de magnésio-wustita e líquido. Assim, tem-se que os valores são muito superiores a linha [a]-[b] de saturação do MgO.



**Figura 6.** Diagrama de solubilidade isotérmica para o sistema  $\text{CaOSiO}_2\text{-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ , basicidade ternária de 1,5. Fonte: Pretorius e Helmut [8].

A figura 7 apresenta os resultados da %MgO comparados com o índice de espumação, é evidente que a estrutura do gráfico se assemelha com a figura 1 feita para a viscosidade efetiva em relação com o índice, demonstrando como o MgO também está intimamente ligado a viscosidade.



**Figura 7.** Relação entre o índice de espumação e a %MgO. Fonte: Autor

## 2.2.2 Propriedades desejadas para a espumação de escória

Com todos estes parâmetros analisados, um grupo de propriedades foi alcançado, proporcionando um método de espumação baseado nestas propriedades.

Para alcançar um índice de espumação otimizado é necessário o ajuste da viscosidade da escória, principalmente com o controle das quantidades de FeO.

É verificado que viscosidades entre 0,443 e 0,499 Poise e %FeO entre 8 a 15% proporcionam índices de espumação aceitáveis.

O controle de FeO é feito com base nas adições de carbono, assim, para esta manutenção, é recomendado uma adição de cerca de 6,5 a 7,5kg de carbono por tonelada de aço, que formarão aproximadamente  $20\text{m}^3$  de CO por tonelada de aço produzido.

A saturação em MgO é tão importante quanto o controle de FeO, sendo sua injeção necessária para a qualidade da espumação. É aconselhado cerca de 15% de MgO, de acordo com os diagramas ISD, no entanto, o ponto de saturação do MgO varia de acordo com a basicidade ternária, logo, isto é válido para valores de basicidade  $B_3$

próximos a 1,5, maiores basicidades requerem menor teor de MgO para atingir a saturação.

### 2.2.3 Análise das escórias industriais

Sete corridas foram analisadas de forma a se comparar a escória do início da espumação com sua evolução ao final do processo. Na tabela 4 é apresentada a composição final obtida para cada corrida.

**Tabela 4.** Composição química final das escórias industriais

Corrida	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	S
C1	21,59	6,59	14,10	5,00	6,64	0,92	0,77	38,24	0,08
C2	23,99	7,17	15,21	5,42	7,24	0,71	0,90	33,56	0,09
C3	25,91	8,82	16,10	6,12	7,20	0,64	0,81	31,31	0,08
C4	21,04	6,39	11,16	4,18	5,08	0,91	0,81	46,19	0,09
C5	20,20	7,36	12,17	4,85	5,15	0,78	0,75	43,84	0,09
C6	23,08	7,76	13,16	4,47	5,77	1,04	0,88	42,13	0,09
C7	23,76	6,98	13,55	4,17	5,75	1,53	0,86	38,61	0,10

Fonte: Autor

#### 2.2.3.1 Análise do índice de espumação e viscosidade

O modelo de Mills e Keene foi aplicado utilizando a equação 3, os resultados são mostrados na tabela 5.

**Tabela 5.** Densidade, tensão superficial, índice de espumação e viscosidade das escórias industriais

Corrida	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Tensão superficial (N/m)	Índice de espumação (s)	Viscosidade (Poise)
C1	3268	0,573	1,976	0,150
C2	3194	0,569	2,246	0,168
C3	3153	0,568	2,505	0,186
C4	3383	0,587	1,561	0,122
C5	3342	0,583	1,730	0,134
C6	3322	0,580	1,818	0,140
C7	3258	0,574	1,924	0,146

Fonte: Autor

As escórias C2 e C3 apresentam os melhores resultados para o índice de espumação. O modelo se provou condizente com o que será abordado nas análises de propriedades e composição seguintes, sendo possível para aplicação em análises que utilizem os mesmos padrões, ou seja, para escórias que não tem formação de fases precipitadas.

Segundo a tabela 5, têm-se as maiores viscosidades observadas para as escórias C2 e C3, de 0,168 e 0,186 Poise, respectivamente, o que apresenta fluidez acima do desejado, sendo o valor objetivado cerca de 0,500 Poise. Com isso, era esperado que o gás não permanecesse tempo suficiente na escória para uma boa espumação, justificando os baixos valores de índice.

#### 2.2.3.2 Análise do teor de FeO

Inicialmente pode-se observar que as escórias industriais tem uma %FeO elevada em comparação com as escórias avaliadas por Avelar[5], de maneira que enquanto os valores das melhores escórias espumantes B04 e B06 são de 8,26 e 15,27%,

respectivamente, tem-se como menor valor das escórias industriais 31,31% para a corrida C3. Isto é um fator que justifica seus menores valores de viscosidade, visto que, como já discutido, o FeO atua de forma a aumentar sua fluidez.

Também é notável que em uma produção industrial seja desejável a menor quantidade possível de ferro na escória, pois este valor afeta no rendimento do metal líquido, logo, é apropriado a redução no teor de FeO, além de adequar a escória espumante, para a obtenção de um melhor rendimento.

Com a figura 8, vê-se como os teores de FeO ao final do processo atuam no índice de espumação, de forma que, fica claro como a redução em sua concentração aumenta o índice de espumação.

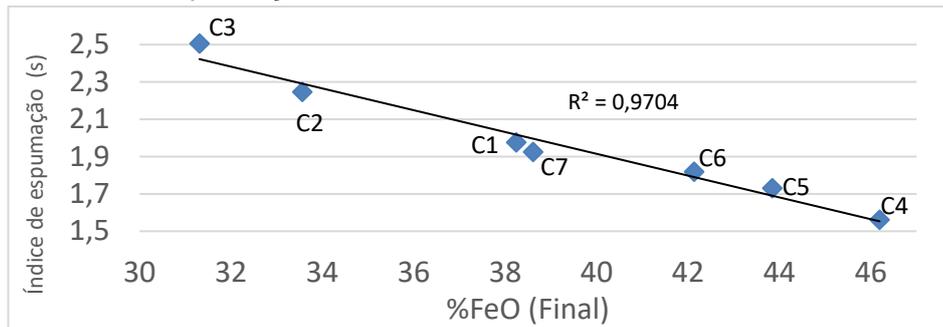


Figura 8. Relação entre o índice de espumação e a %FeO. Fonte: Autor

### 2.2.3.3 Análise da basicidade

A basicidade não é um fator determinante na qualidade da espumação, já que se adequa aos valores praticados e atua de forma a proporcionar conjuntamente com a composição e as propriedades da escória uma boa espumação, vide sua influência na saturação do MgO e na viscosidade, assim como proposto por Pretorius e Carlisle[1].

Os valores são apresentados na tabela 6

Tabela 6. Basicidade ternária das escórias industriais

Corrida	B <sub>3</sub> Basicidade ternária
C1	1,13
C2	1,16
C3	1,17
C4	1,37
C5	1,19
C6	1,31
C7	1,34

Fonte: Autor

É perceptível que as corridas C1, C2, C3 e C5, apresentam basicidades muito próximas, o mesmo ocorre para C4, C6 e C7. Assim, sabe-se que seu efeito na saturação de MgO e na viscosidade é semelhante para estes conjuntos.

Com o valor otimizado da basicidade ternária se encontrando entre 1,22 e 1,41, tem-se que todas as corridas se encontram próximas de tais proporções, mas, não é possível afirmar que suas espumações são desejáveis apenas com este dado.

#### 2.2.3.4 Análise do consumo de carbono e CO formado

Os valores de carbono consumido foram calculados da mesma maneira que para as escórias experimentais, onde foi utilizado o patamar de 10t de escória, como próximo do praticado industrialmente. A tabela 7 apresenta os resultados e os valores de carbono injetado, sua participação na reação de redução de FeO e o volume de CO formado

**Tabela 7.** Carbono consumido das escórias industriais

Corrida	$\Delta\text{FeO}$	Carbono injetado (kg)	Carbono consumido (kg)	Rendimento do carbono	Volume de CO formado (m <sup>3</sup> )
C1	11,14	853	190,24	22,30%	505,76
C2	18,61	493	317,80	64,46%	844,91
C3	18,12	489	309,44	63,28%	822,66
C4	8,33	531	142,25	26,79%	378,19
C5	6,49	441	110,83	25,13%	294,65
C6	8,34	611	142,42	23,31%	378,64
C7	12,75	478	217,73	45,55%	578,86

Fonte: Autor

Os valores de carbono consumido mais elevados são para as corridas C2 e C3, no entanto, eles não são valores próximos do objetivado de 583kg, como calculado para as escórias avaliadas empiricamente. Assim, é possível prever que para estas escórias, a evolução dos gases não foi tão efetiva quanto para a escória B04, pois, o consumo de carbono se relaciona diretamente com os valores de CO gerado.

Outro ponto importante é a avaliação do rendimento do carbono injetado na corrida. As corridas C2 e C3 novamente mostraram o melhor rendimento, indicando como a qualidade da escória interfere também nas adições do forno. Isso porque, situações onde cerca de 25% do carbono injetado são aproveitados para a reação, como nas corridas C1, C4, C5 e C6, indicam que modificações devem feitas no processo com a finalidade de aumentar o rendimento tornando menores as perdas de carbono injetado.

O CO formado também tem resultados menores do que as escórias de laboratório, sendo que os patamares observados de 1240 e 1550m<sup>3</sup> não são atingidos. Os maiores valores novamente são expostos pelas escórias das corridas C2 e C3 de 844,91 e 822,66m<sup>3</sup> respectivamente, indicando que, dentre as corridas avaliadas, estas provavelmente tiveram as melhores espumações.

#### 2.2.3.6 Análise do efeito do MgO

Outro ponto onde a escória deve ser avaliada é quanto ao seu teor de MgO, pois não foi constatado a formação de fases precipitadas que aumentam a viscosidade e auxiliam na formação de bolhas. O maior teor de MgO se dá na Escória C3 sendo de 8,82%. Ao comparar com o valor da escória B04 de 22,31%, é notável que seja necessário um aumento destes teores objetivando uma melhor qualidade na espumação, no entanto, as escórias de laboratório apresentam supersaturação e a adição dos tijolos refratários e finos de sinter tem custo. Assim, o teor de MgO deve ser avaliado conforme a escória recebe os aditivos, para uma otimização do seu benefício na espumação, juntamente com o menor consumo.

### 3 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostraram que, não só foi possível obter condições aceitáveis de espumação e propriedades das escórias testadas empiricamente, como identificar como as escórias industriais devem se adequar para obter melhores espumações, como seguem nos tópicos abaixo.

- Para os teores de FeO, é conclusivo que há a necessidade de sua redução, pois, como avaliado, o menor teor obtido nas escórias industriais (31,31%) não está próximo do ideal obtido para a melhor escória espumante (8,26%). Além disso, menores valores de FeO na escória indicam melhor rendimento metálico do processo, maior índice de espumação e maior viscosidade.
- Para os teores MgO, tem-se 8,82% para a melhor escória industrial e 22,31% como valor desejável. Como nenhuma das escórias industriais apresentou formação de fases sólidas, pode-se afirmar que é de grande importância buscar esta saturação, sabendo que este fator facilita a nucleação de bolhas e aumenta a viscosidade da escória.
- As quantidades do carbono consumido e do CO formado também não atingiram os melhores valores dos testes empíricos, assim, é favorável que melhores condições na reação de redução no FeO sejam praticadas, visando uma maior eficiência nas adições de carbono e, conseqüentemente, na quantidade de gás gerado.

### REFERÊNCIAS

- 1 Pretorius E.B., Carlisle R.C.: Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking; Electric Arc Furnace Conference Proceedings, 1998, York.
- 2 Kwong, K. S.; Bennet, J. P.: Recycling practices of spent MgO-C refractories; Albany, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering; v.1 n.2 p.69-78, 2002
- 3 Jones, J.: New steel melting technologies; Iron and Steelmaker (USA), v. 23, n. 7, p. 60, 1996.
- 4 Pfeifer, H., Kirschen, M., Simoes, J. P.: Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand; EUROPEAN ELECTRIC STEELMAKING, 8th, 2005, Birmingham, Institute of Materials, Minerals and Mining, p. 9-11.
- 5 Avelar, T. C.: Utilização de tijolos reciclados de MgO-C e finos de sínter de dolomita no ajuste da composição de escórias espumantes em Fornos Elétricos à Arco; Vitória: IFES, 2013.
- 6 Ito, K.; Fruehan, R. J.: Slag foaming in electric furnace steelmaking; Electric Furnace Proceedings, p. 345-351, 1987.
- 7 Mills K. C.; Keene, B. J.: Physical properties of BOS slag;, International Materials Reviews, v. 32, n.1, p. 1-120, 1987.
- 8 Pretorius, E. Helmut, O.: EAF Fundamentals; Process Technology Group – LWB Refractories.