

## ESCÓRIAS PARA SLAG SPLASHING: SIMULAÇÃO FÍSICA E TERMODINÂMICA\*

Inamara Amanda Souza Santos<sup>1</sup>

Aline Lima da Silva<sup>2</sup>

Breno Totti Maia<sup>3</sup>

Vanessa Rodrigues de Medeiros Santos<sup>4</sup>

Brenda Caroline Gurgel<sup>5</sup>

Luíza Siqueira de Magalhães<sup>6</sup>

### Resumo

O sucesso da utilização do método de reparo/prevenção de refratários de convertedores LD chamado *Slag Splashing* tem relação com as propriedades físico-químicas da escória, em especial a sua viscosidade. Através de uma simulação termodinâmica feita no software FactSage que tomou como base a equação de Einstein-Roscoe utilizando uma escória de composição representativa de uma escória industrial, junto de uma simulação a frio utilizando soluções representando escórias com variadas frações sólidas, foi possível correlacionar a viscosidade do modelo a frio, avaliando a possibilidade de transposição de resultados desse modelo para a prática industrial em escórias com frações sólidas de até 20%, sendo que acima desse valor um modelo mais assertivo deve ser restabelecido. Por simulação física a frio em um modelo de conversor de escala de 1/10 em relação aos conversores de 340 toneladas da Ternium Brasil, utilizando soluções representativas de escórias industriais com frações sólidas de 10 a 40%, avaliou-se a influência da viscosidade na intensidade na projeção de escória durante o processo do *Slag Splashing*, deixando claro o efeito da fluidez ou da alta viscosidade na altura, localização e qualidade das projeções.

**Palavras-chave:** BOF, Escórias, *Slag Splashing*, Simulações.

### SLAGS FOR SLAG SPLASHING: PHYSICAL AND THERMODYNAMIC SIMULATION

#### Abstract

The success using the refractory repair/prevention method of LD converters called *Slag Splashing* is related to the slag physicochemical properties, especially its viscosity. By means a thermodynamic simulation based on the Einstein-Roscoe equation and using a composition slag representative an industrial slag, together with a cold simulation using solutions representing slags with various solid fractions, it was possible to correlate the cold model viscosity to evaluating the possibility transposing the results about this model to the industrial practice in slag with solid fractions up to 20%, and above this value a more assertive model should be reestablished. By cold physical simulation in a 1/10 scale converter model in relation to the 340ton converters from Ternium Brazil, using representative solutions industrial slags with solid fractions to 10 to 40%, the viscosity influence on the intensity slag projection during the Slag Splashing process was evaluated making clear the fluidity effect or high viscosity on the height, location and the projections quality.

**Keywords:** BOF, Slags, *Slag Splashing*, Simulations.

<sup>1</sup> Engenheira Metalurgista, Mestranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – Sócia da ABM.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista, Doutora, Professora, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador da Lumar Metals, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – Sócio da ABM.

<sup>4</sup> Graduanda em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>5</sup> Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>6</sup> Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O *Slag Splashing* é considerado uma das técnicas de reparo/prevenção mais modernas da atualidade. Para que o processo seja efetivo, muitas variáveis devem ser controladas [1], incluindo aquelas relacionadas às propriedades físico-químicas da escória (basicidade, viscosidade e tensão superficial), aos aspectos operacionais (altura da lança, vazão do sopro de nitrogênio, lança estática ou em movimento) e aos aspectos geométricos (número de furos da lança, ângulo de furo, dimensões do convertedor). Nesse contexto, diversos estudos vêm sendo realizados, visando melhorar a compreensão dos efeitos destas variáveis [2], e especificamente nesse estudo, a variável foco é a viscosidade da escória.

Ferraro [3] afirma que a viscosidade é considerada uma das propriedades mais importantes no que se diz respeito à caracterização das escórias e que sua composição é base para estudos mais aprofundados a seu respeito. De acordo com alguns autores [1,4] quanto mais fluida for uma escória, mais fina pode ser a camada de recobrimento efetiva, isso quando se efetivar recobrimento, visto que escórias muito fluidas, tendem a escorrer das paredes do conversor. Em contrapartida [5], escórias muito viscosas geram baixas taxas de projeções, reduzindo também a adesão de escória nas regiões superiores do refratário, o que prejudica o recobrimento, relato também feito por Mills et.al.[6] e Lima et al.[7].

As questões relacionadas à precipitação de fases traz a tona a discussão sobre a determinação das propriedades das escórias, pois ela é extremamente dependente da sua composição química [3], e também da queda de temperatura, concluindo-se portanto, que mudanças constantes ocorrem em suas propriedades variando sua composição.

Para realização de modelagens computacionais em transferência de calor e fluidodinâmica em escórias metalúrgicas, conforme já afirmado, as propriedades térmicas da escória são fatores necessários e primordiais a serem considerados, pois eles podem modificar o comportamento do modelo como um todo. Simulações termodinâmicas que envolvem formação de fases, podem ser feitas para condições de equilíbrio e calculadas utilizando o software FactSage. Bale et. al.[8] descrevem o software como uma base de dados termoquímicos, que sendo executado por qualquer PC operado pela Microsoft Windows® e contando com uma série de módulos de informações e cálculos, é capaz de manipular substâncias e soluções, sendo possível uma grande variação de cálculos termoquímicos, obtenção de tabelas e figuras para aplicação na análise de equilíbrios químicos e simulação de processos metalúrgicos.

Carvalho et. al.[9] diz que haja vista que a viscosidade da escória é extremamente influenciada por sua composição de fase de sólida, ou apenas fração sólida, existem algumas equações que podem ser consideradas. Em Auad [10] afirma-se que é comum considerar partículas sólidas do fluido como esféricas e com uma determinada relação de raio entre as partículas.

Normalmente, os modelos se baseiam em ajustes dos parâmetros da equação de Einstein-Roscoe, mas como em situações de prática industrial as frações de sólido podem chegar a 50% e existem diversas formatos de partículas, é evidente que determinar a viscosidade efetiva das escórias é uma tarefa complexa que ainda necessita de um modelo mais assertivo para descrever a viscosidade da fase líquida, e que existe uma faixa de valor ótimo para viscosidade efetiva que, ao ser alcançado, será responsável por parte do sucesso do *Slag Splashing*.

Neste contexto, os principais objetivos do presente estudo são: (1) realizar uma simulação termodinâmica aplicada a uma escória de composição representativa de uma escória industrial para correlacionar a viscosidade do modelo a frio, avaliando a possibilidade de transposição de resultados desse modelo para a prática industrial; (2) realizar simulação física a frio em um modelo de conversor de escala de 1/10, avaliando a influência da viscosidade efetiva na intensidade e altura da projeção de escória durante o processo do *Slag Splashing*.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Determinação de Viscosidade em Modelo a Frio

Em experimentos a frio, partículas de polipropileno já foram usadas com sucesso para a contagem de inclusões. Baseado neste fato e no que foi citado por Auad [10] sobre os modelos considerarem partículas do fluido como esféricas com uma relação de raio entre as partículas e um fator de empacotamento máximo, este material foi escolhido para simular a fração de sólidos na escória, o que influenciará grandemente na viscosidade efetiva. Primeiramente, a densidade das partículas de polipropileno foi medida pelo método de Arquimedes, citado por Montanheiro [12], e a partir do valor obtido, a quantidade de partículas que deve ser adicionada ao óleo de soja, este escolhido como o material representativo da escória na sua fase líquida, foi calculada para obter a fração de sólidos do sistema (óleo de soja + partículas de polipropileno), de acordo com a **Tabela 1**, que será determinante no valor da viscosidade.

**Tabela 1**– Percentuais líquido e sólido das soluções para medição a frio de viscosidade.

SOLUÇÃO	% LIQUIDO	% SÓLIDO
Solução 1	100,0	0,0
Solução 2	95,0	5,0
Solução 3	90,0	10,0
Solução 4	87,5	12,5
Solução 5	85,0	15,0
Solução 6	82,5	17,5
Solução 7	80,0	20,0
Solução 8	77,5	22,5
Solução 9	75,0	25,0
Solução 10	72,5	27,5
Solução 11	70,0	30,0
Solução 12	67,5	32,5
Solução 13	65,0	35,0
Solução 14	62,5	37,5
Solução 15	60,0	40,0
Solução 16	57,5	42,5
Solução 17	55,0	45,0
Solução 18	52,5	47,5
Solução 19	50,0	50,0

As viscosidades do modelo frio foram medidas em um viscosímetro Brookfield à temperatura ambiente [11], e os valores foram comparados com os valores efetivos de viscosidade calculados por simulação termodinâmica em conjunto com a equação de Einstein-Roscoe.

## 2.2 Simulação Termodinâmica e Determinação da Viscosidade

Para a estimativa da viscosidade efetiva da escória, em uma dada temperatura de operação, essencialmente, três etapas são seguidas:

(a) A partir da composição da escória, conforme **Tabela 2**, o cálculo de equilíbrio termodinâmico é realizado no módulo Equilib do software FactSage versão 7.1. Com isso, determinam-se as fases formadas e suas respectivas composições. Pode-se conhecer, portanto, a fração de sólidos em equilíbrio com a fase líquida da escória. Os bancos de dados utilizados são: FToxid-SLAGA (fase líquida da escória), FToxid-MeO (solução sólida que descreve a fase magnésio-wustita, (Mg,Mn,Fe)O) e FToxid-bC2SA (solução sólida que descreve a fase cálcio-silicato, (Ca,Mg,Fe,Mn)2SiO<sub>4</sub>).

(b) Determinação da viscosidade da fase líquida da escória, usando-se o módulo Viscosity e o banco de dados Melts.

(c) Determinação da viscosidade efetiva mediante uso da equação de Einstein-Roscoe (Eq.(1)), em que a fração de sólidos,  $f$ , é obtida a partir da etapa (a). A Eq.(1) parte da consideração original de partículas esféricas, onde  $\eta$  e  $\eta_0$  correspondem à viscosidade efetiva e da fase líquida, respectivamente.

$$\eta = \eta_0(1 - 1,35f)^{-2,5} \quad (1)$$

**Tabela 2**– Composição média de escória representativa da prática industrial.

FeO (%)	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
22,15	46,67	7,95	15,6	3,03	3,08	1,52

## 2.3 Simulação a Frio da Prática do *Slag Splashing*

Foi confeccionado em acrílico um modelo reduzido na escala de 1/10 em relação aos conversores de 340 toneladas da Ternium Brasil conforme Figura 1. Considerou-se vazão de nitrogênio (N<sub>2</sub>) de 120Nm<sup>3</sup>/h, vazão das ventaneiras de 1,6NI/min, tempo de sopro de 2 minutos, com distância banho-lança (DBL) de 400mm.

Assim como na determinação de viscosidade em modelo a frio, utilizou-se como mistura representativa de escória um sistema de óleo de soja tingido com anilina colorida (para facilitar visualização no acrílico) e partículas de polipropileno, as últimas caracterizando as frações sólidas contidas na escória. As proporções foram sendo alteradas a cada teste e testou-se misturas com 10%, 20%, 30% e 40% de fração sólida.



Figura 1. Montagem de teste (Fonte: autores).

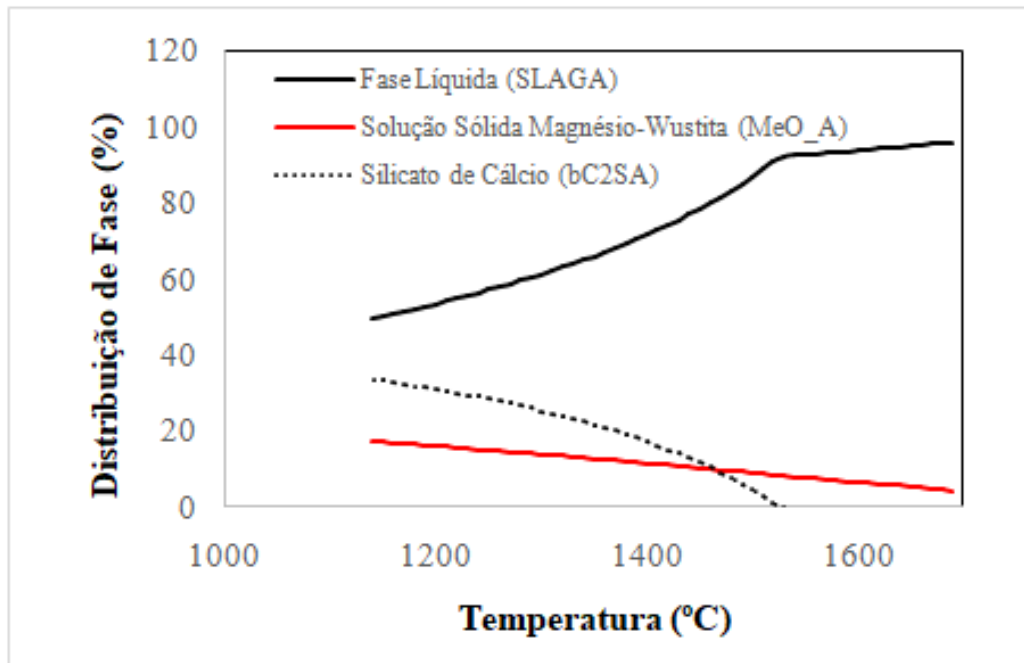
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Simulação termodinâmica: predição da fração de sólidos e evolução da viscosidade efetiva da escória durante a prática do *Slag Splashing*

As simulações foram realizadas com o software FactSage a 1690 °C, considerando uma escória de composição representativa da prática industrial, conforme já mostrado na **Tabela 2**, e que todo Fe presente na escória existe como FeO, devido ao melhor fechamento do balanço de massa (em estudos futuros, o efeito do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> será avaliado).

Uma planilha de dados foi gerada a partir das simulações para a viscosidade da fase líquida e viscosidade efetiva e a partir dela gerou-se a Figura 2. Pelas análises da planilha e da Figura 2, as principais descobertas foram:

- a) A fração da fase líquida para essas escórias é de aproximadamente 95% entre 1550 e 1690°C;
- b) A esta temperatura, a única fase sólida que coexiste com o líquido é a solução sólida de magnésio-wustita (MgO-FeO-MnO) na faixa de temperatura de 1400-1690°C;
- c) A temperaturas mais baixas ocorre também a precipitação de silicato de cálcio);
- d) A viscosidade média da fase líquida das escórias foi de  $0,021 \pm 0,0012$  Pa.s;
- e) A viscosidade efetiva média calculada pela equação de Einstein-Roscoe foi de  $0,0221 \pm 0,0034$  Pa.s. Este valor é considerado muito baixo e apenas reforça que, antes do *Slag Splashing*, as escórias devem ser preparadas.



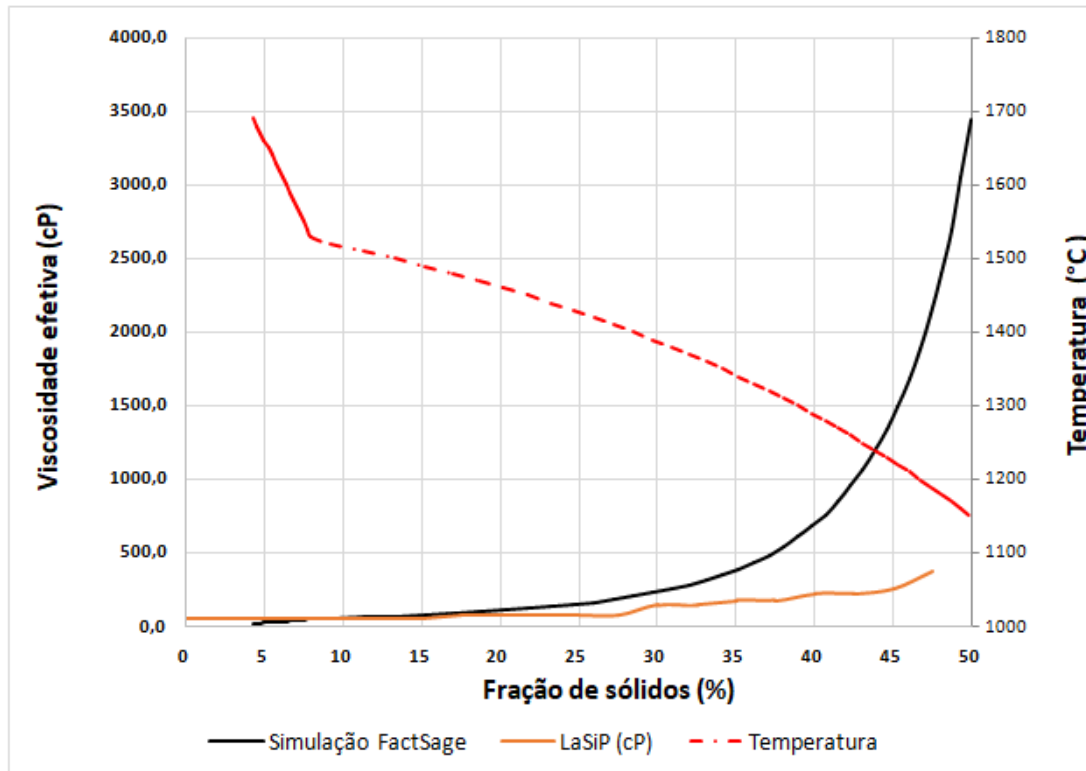
**Figura 2.** Distribuição de fase em função da temperatura calculada pelo software FactSage.  
(Fonte: autores).

O resfriamento da escória foi simulado até 1140°C, com o objetivo de verificar como a redução da temperatura, em consequência da interação entre a escória e o jato de N<sub>2</sub> em que ela é gradualmente reduzida e/ou devido a práticas de adições de preparo de escória, influenciaria substancialmente na distribuição de fase e, conseqüentemente, a viscosidade efetiva.

Na Figura 3, os valores de viscosidade previstos pelo modelo termodinâmico do FactSage são resultados provenientes puramente da simulação de uma escória de composição representativa da prática industrial, mostrada na **Tabela 2**, e com base na equação de Einstein-Roscoe (Eq.(1)). Já os valores de viscosidade obtidos nos testes a frio (à temperatura ambiente com o sistema de óleo de soja + partículas de polipropileno) tomam como base as soluções conforme **Tabela 1**.

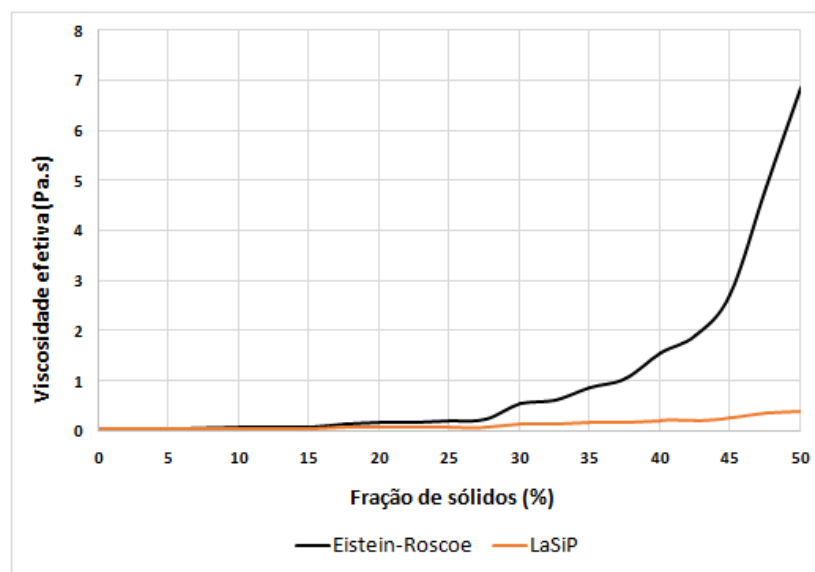
As curvas resultantes da simulação do FactSage, onde a avaliação da viscosidade efetiva em função da temperatura foi feita mediante o resfriamento da escória, e dos experimentos a frio, são consistentes apenas quando a fração de sólidos de no máximo 20%. Com frações acima de 20%, há um desvio significativo com aumento da viscosidade da simulação da condição industrial, sugerindo que os parâmetros da equação de Einstein-Roscoe precisam ser ajustados para levar em conta as concentrações mais altas de sólidos na emulsão.

O aumento na fração total de sólidos com temperatura decrescente também pode ser visto na Figura 3, já que mostra a viscosidade efetiva, o que inclui a fração de sólidos, no modelo de Einstein-Roscoe. Pode-se observar que temperaturas abaixo de 1500°C, a fração de sólidos causa um evidente aumento na viscosidade efetiva.



**Figura 3.** Comportamento de escória previsto pelo software FactSage X Comportamento de escória previsto pelos testes experimentais de medições a frio (sistema de óleo de soja + partículas de polipropileno) em função da temperatura. (Fonte: autores)

Na Figura 4 foram colocados os valores de viscosidade obtidos nos testes a frio (à temperatura ambiente com o sistema de óleo de soja + partículas de polipropileno) tomando como base as soluções da **Tabela 1**, e suas respectivas viscosidades efetivas com base na equação de Einstein-Roscoe (Eq.(1)).



**Figura 4.** Comportamento de escória previsto pelos testes experimentais de medições a frio (sistema de óleo de soja + partículas de polipropileno) X Comportamento de escória previsto pela Equação de Einstein-Roscoe. (Fonte: autores)

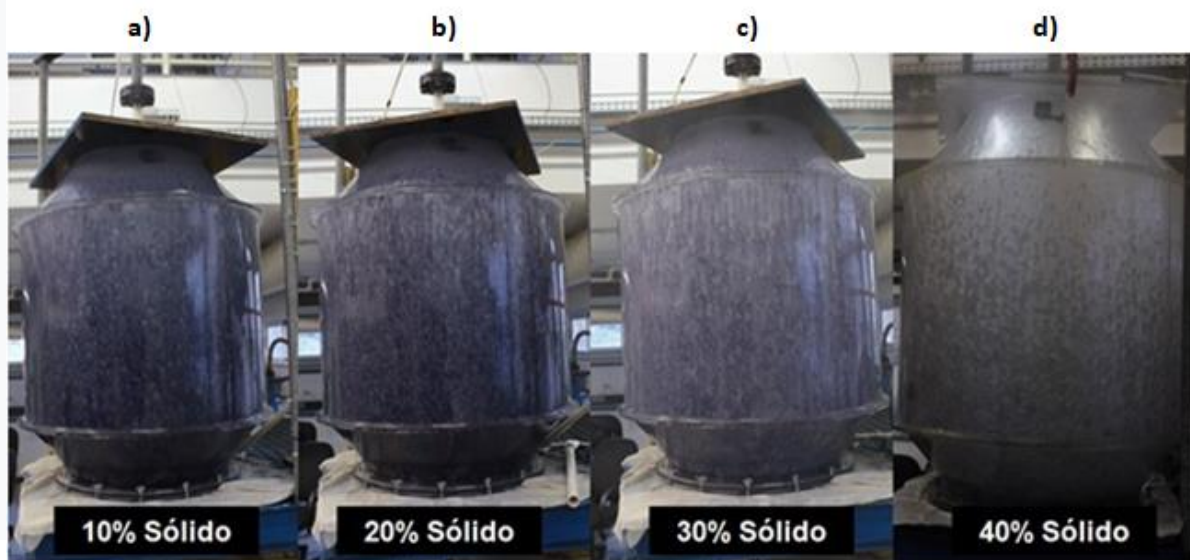
As curvas resultantes das simulações a frio e da aplicação da equação de Einstein-Roscoe também são consistentes apenas quando a fração de sólidos é de no máximo 20%, provando mais uma vez que a termodinâmica computacional se combinada com novos desenvolvimentos de modelos mais assertivos para a viscosidade efetiva seria de grande importância para a transposição dos resultados simulação física a frio para a prática industrial.

### 3.2 Simulação a frio: influência da viscosidade efetiva na projeção de escória

Para avaliação do efeito da viscosidade sobre o comportamento do *Slag Splashing*, adotou-se um modelo frio em acrílico. Na Figura 5, pode-se observar que, para uma escória contendo 10% de sólidos (Figura 5 (a)), existe a capacidade de atingir com facilidade as partes superiores do vaso (cone superior).

No entanto, a escória contendo 20% (Figura 5 (b)) os sólidos atingem o cone superior com maior dificuldade. Para 30% de sólidos (Figura 5 (c)), a escória dificilmente atinge as partes superiores do vaso, e com 40% de sólidos (Figura 5 (d)) os respingos de escória não alcançam o cone superior e a área mais atingida do conversor é o cilindro.

Os resultados corroboram o que muitos autores [1,4,5,6,7] afirmam, pois mostra o efeito da fluidez ou da alta viscosidade dos fluidos comprovada pelas baixas projeções decorrente do efeito da gravidade sobre as partículas de polipropileno que “escorrem” pela parede do acrílico.



**Figure 5.** Efeito da fração de sólidos na projeção da escória durante o sopro de N<sub>2</sub>. Frações de sólidos: (a) 10% (0,0561Pa.s), (b) 20% (0,0749Pa.s), (c) 30% (0,1496Pa.s) e (d) 40% (0,2244Pa.s). (Fonte: autores).

## 3 CONCLUSÃO

A viscosidade de uma escória industrial calculada com auxílio de simulação termodinâmica do FactSage está de acordo com a viscosidade calculada no modelo a frio para valores de fração de sólidos abaixo de 20%, o que sugere que a termodinâmica computacional poderia contribuir para a transposição dos resultados da simulação física de laboratório para a prática industrial até esta composição de



escória, e que acima dessa composição um novo modelo para cálculo de viscosidade efetiva deve ser desenvolvido.

A simulação termodinâmica também permitiu avaliar as fases e a evolução da viscosidade durante o resfriamento da escória. Essencialmente, a fase líquida da escória está em equilíbrio com a magnésio-wustita e, a temperaturas inferiores a 1500°C, com silicato de cálcio.

Foi possível realizar a simulação física do processo *Slag Splashing* com facilidade de visualização do comportamento do revestimento do convertedor em função da fração de sólidos presentes na escória, deixando claro que um controle da viscosidade da escória anterior a execução do procedimento pode fazer toda a diferença quanto da qualidade e localização da cobertura desejada, e que escórias fluidas demais ou viscosas demais podem causar baixa eficiência do processo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à UFMG, à Ternium Brasil e à Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa e o apoio contínuos.

## REFERÊNCIAS

- 1 Leão, P.M.G.C.; Rodrigues, E.F.; Silva, C.A.; Silva, I.A. Um estudo sobre a influência de propriedades físicas da escória e de parâmetros operacionais sobre o processo de Slag Splashing. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 46º Seminário de Aciaria; 2015; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2015.
- 2 Santos, I.A.S.; Silva, A L.; Santos, V.R.M.; Lima, W.R.; Maia, B.T. Slag Splashing: proposta de equacionamento dos parâmetros de sopro. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 49º Seminário de Aciaria, Fundação e Met. Não Ferrosos; 2018; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2018.
- 3 Ferraro, B.B. Estudo das propriedades termofísicas de escória metalúrgica e de escórias sintéticas de CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO. [trabalho de final de curso]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2014.
- 4 Liu, C.J; Zhu, Y. X & Jiang. M. F - Physical modelling of slag splashing in converter, Ironmaking and Steelmaking. 2003; 30: 36-42.
- 5 Barron, M.A.; Medina, D.Y.; Hilerio, I.; Plascencia, G. Influence of the slag density on the Splashing process in a steelmaking converter. ISRN Metallurgy. 2014: 2014:6.
- 6 Mills, K.C; Su, Y; Fox, A.B; Li, Z; Thackray, R.P & Tsai, H. T - A review of Slag Splashing, ISIJ International. 2005; 45: 619-633.
- 7 Lima, F. A.; Pinto, J. E.; Quintão H. A.; Castro, L. F. A. Influência das principais variáveis do processo "Slag Splashing" na proteção do refratário. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 55º Congresso Anual da ABM ; 2000; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2000.
- 8 Bale, C.W.; Chartrand, P.; Degterov, S.A.; Ericksson, G.; Hack, K.; Mahfoud, R.B. *et al.* FactSage thermochemical software and data bases. Elsevier Ltd. 2002; 26: 189-228.
- 9 Carvalho, D.A.G.; Schenk, J.; Castro, J.A. Leão, P.M.G.C.; Rodrigues, E.F.; Silva, C.A. *et.al.* Model development of additives dissolution in BOF process. In:

- Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 46º Seminário de Aciaria; 2015; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2015.
- 10 Auad, M. V., Desenvolvimento de Modelo para Cálculo de Adições no Processo de Slag Splashing e Slag Coating de um Basic Oxygen Furnace (BOF). [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2018.
  - 11 Wu, L.; Ek, M.; Song, M.; Sichen, D. The effect of solid particles on liquid viscosity. Steel Research Journal. 2011; 82: 388-397.
  - 12 Montanheiro, M.N.S. Determinação da densidade de sólidos e líquidos pelo princípio de Arquimedes. Caderno Catarinense de Ensino de Física. 1990: 7: 120-123.