

CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS PARA SLAG SPLASHING NA ACIARIA DA TERNIUM BRASIL*

Rubia Teodoro Silva¹
Aline Lima da Silva²
Gilvan Nascimento de Souza³
Breno Totti Maia⁴
Daniel A.G. de Carvalho⁵

Resumo

Para a maior eficiência na técnica conhecida como Slag Splashing, empregada com fins de manutenção e reparo de refratários de convertedor LD, a escória deve apresentar características apropriadas em termos de viscosidade e fração de sólidos. No presente trabalho, desenvolveu-se uma metodologia híbrida, combinando a utilização de padrões para a caracterização visual de escórias na planta, baseada em critérios de atribuição de notas, com a simulação termodinâmica usando o software FactSage para determinação das fases presentes na escória, quantificação de fração de sólidos e cálculo da viscosidade efetiva. A metodologia proposta permite identificar os quadrantes ideais de viscosidade efetiva, fração de sólidos e teor de ferro total, de modo que se possa garantir escórias com notas altas, apresentando qualidade apropriada para o processo. Os resultados indicam que as escórias com nota 3 (ótima) são obtidas nas seguintes condições: temperatura de fim de sopro de 1690-1720°C, viscosidade efetiva na faixa de 0,070-0,650 Pa.s, fração de sólidos de 13-22%, teor de ferro total na escória de 14-17,5%..

Palavras-chave: Slag splashing; Termodinâmica; Aciaria; Convertedor LD.

SLAG CHARACTERIZATION FOR SLAG SPLASHING AT TERNIUM BRAZIL'S MELT SHOP

Abstract

In order to achieve an efficient Slag Splashing practice, employed for maintenance and repair of LD refractories, slags should present suitable characteristics, with respect to viscosity and solid fraction. In this work, a hybrid methodology was developed, combining defined patterns for slag visual classification, based on a rating criteria, from 1 (low quality) to 3 (high quality), along with thermodynamic simulations carried out on FactSage software for determining phases in the slag, solid fractions as well as effective viscosity. The proposed methodology allows one to identify ideal quadrant for effective viscosity, solid fractions and total iron content, in such a way that high rated slags can be attained, with desired quality for the process. The results show that high quality slags (grade 3), can be obtained under the following conditions: end blow temperature of 1690-1720°C, effective viscosity from 0.070 to 0.650Pa.s, solids fraction of 13-22% and total iron content from 14 to 17.5%.

Keywords: Slag splashing; Thermodynamics; Steelmaking; LD Converter.

¹ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil..*

² *Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

³ *Consultor de Aciaria, Ternium BR, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

⁴ *Diretor Técnico e Comercial BOF, Lumar Metals, Santana do Paraíso, MG, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Consultor de Processos da Aciaria, Ternium BR, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de refratários é um dos principais custos na escala produtiva de um conversor na aciaria a oxigênio. Não só relacionado ao fato do custo de troca do revestimento, mas principalmente referente à parada para a substituição do refratário, que origina uma redução na produção na faixa de 33-50% [1], tendo um impacto significativo no processo produtivo. Para ser competitiva, a indústria deve reduzir custos de operação e, portanto, otimizar técnicas que permitam economizar em demandas relacionadas ao refratário. Assim, métodos foram desenvolvidos visando aumentar a proteção interna do conversor a partir do uso da escória advinda do próprio processo de refino primário. Trabalhos anteriores [2] indicam que a viscosidade da escória é um parâmetro importante para que sua utilização seja eficiente quanto à aderência na parede do conversor, criando uma camada superficial e protelando o ataque ao refratário.

Considerando-se todos esses fatores, a técnica de *slag splashing* emergiu nas últimas duas décadas [3,4] como um procedimento promissor, que permite prolongar a vida útil do refratário ao reduzir o desgaste associado aos ataques térmicos, mecânicos e químicos, aumentando a disponibilidade do conversor. A técnica consiste em, após a drenagem do aço, a escória fundida permanece no fundo do conversor e é projetada nas paredes a partir da utilização do sopro de nitrogênio pela lança. A escória resfria na superfície do refratário, formando uma camada protetora que impede o desgaste do revestimento.

Propriedades da escória como viscosidade, densidade e tensão superficial influenciam diretamente a qualidade do *splashing*. A viscosidade determina as forças de cisalhamento que comandam a formação de gotículas. Na escória, a viscosidade é função de muitas variáveis, como a composição, temperatura e pressão parcial do oxigênio no sistema [5]. A dificuldade e o alto custo das medições da viscosidade das escórias levaram à utilização de modelos, como o clássico de Einstein-Roscoe que pudessem, a partir de uma inspeção visual, ser mais assertivo quanto à viscosidade da escória produzida.

O presente trabalho consiste na caracterização visual das escórias do BOF, pós vazamento e pré slag splashing, e sua correlação com a viscosidade efetiva calculada por meio da ferramenta computacional FactSage. Foram inspecionadas escórias de dois conversores em operação na aciaria da Ternium Brasil (Ternium BR), e atribuídas notas, a partir de padrões pré-determinados, referentes à qualidade da escória, visando à obtenção de um splashing efetivo. A partir do desenvolvimento de uma metodologia que combina a inspeção visual e a simulação termodinâmica, tem-se por objetivo determinar condições ótimas operacionais, do ponto de vista de otimização de valores de viscosidade efetiva, fração de sólidos na escória, temperatura de fim de sopro e teor de ferro na escória.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Caracterização das escórias

As escórias amostradas no presente trabalho foram inspecionadas nos dois conversores da Ternium BR, após o vazamento de aço e antes do início do slag splashing. A **Figura 1** apresenta o padrão utilizado para a caracterização das

escórias e o aspecto visual que deve ser observado para a determinação da qualidade. Neste caso, uma escória fluida e reativa não é interessante para o processo, pois ao ser projetada na parede do conversor não tem a aderência necessária e escorreria. Além de não atender à necessidade do slag splashing, promove um desperdício de gás e tempo. Esse comportamento pode ser ratificado quando são observadas reações na superfície do material, formação de “olhos” que caracterizam a fluidez dessa escória e um terceiro são as ventaneiras expostas, que permite prever que a escória não apresenta aderência suficiente ao fundo do conversor. Além disso, a coloração superficial da escória é um outro fator a ser analisado, uma vez que quando a luminescência é alta a tendência é que o material seja menos viscoso e que apresente uma fluidez muito maior.

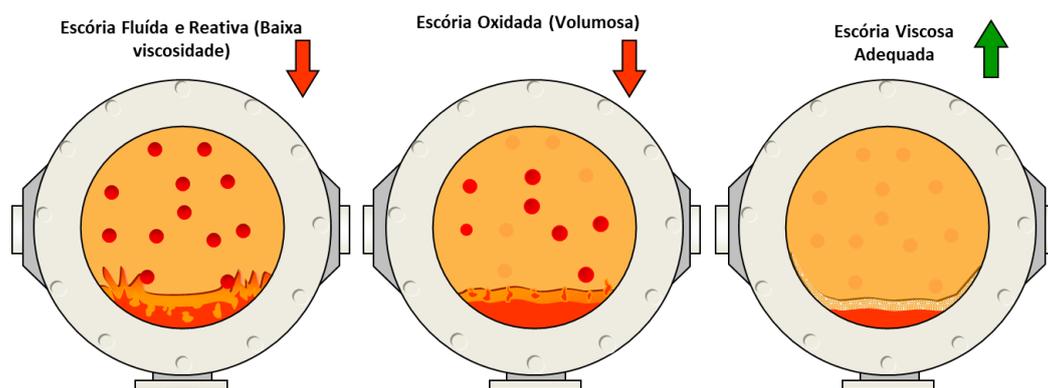


Figura 1: Padrão para caracterização das escórias avaliadas. Os pontos em vermelho ilustram as ventaneiras e a consistência da escória sendo representada por diferentes colorações.

Uma escória intermediária seria menos reativa que a primeira, mas ainda apresentaria um volume que interferiria no resultado final do splashing. A determinação dessa escória é a mais complicada em termos visuais, pois ela se aproxima muito do ideal, mas alguns detalhes como a cobertura no fundo do conversor e a luminescência superficial podem ser fatores diferenciadores. Além disso, a temperatura em que se encontra a amostra pode influenciar no visual e com isso ter uma avaliação errada dessa escória.

A escória mais adequada para o processo apresenta um aspecto visual bem característico, com as ventaneiras cobertas, sem reações na superfície e uma luminescência bem menor que as anteriores. Um comportamento desse tipo de escória é que enquanto o conversor é basculado para se fazer a inspeção, pode-se já observar nas paredes a deposição do material, corroborando com a ideia da viscosidade ideal para o processo.

2.1.2 Notas das escórias

Com a designação do padrão para caracterização das escórias, foram determinadas notas de um a três como método de organização dos resultados. A nota 1 seria referente a uma escória ruim ou muito fluida; a nota 2, a uma intermediária ou fluida e a 3 seria para uma escória ótima e com viscosidade ideal.

2.1.3 Simulação Termodinâmica e Viscosidade Efetiva

Com o auxílio da ferramenta computacional FactSage é possível estabelecer uma metodologia de análise para escórias, de modo a determinar as fases presentes

para as composições e temperaturas de final de sopro registradas. O detalhamento sobre a ferramenta computacional, seus módulos e bancos de dados pode ser visto no trabalho de Bale *et. al* [6]. O software FactSage 7.1 foi usado para todos os cálculos no presente trabalho. O banco de dados FToxid foi utilizado para previsão das fases sólidas em equilíbrio com a fase líquida da escória. A **Figura 2** ilustra o procedimento adotado no presente estudo para determinação da viscosidade efetiva das escórias industriais por meio da simulação termodinâmica.

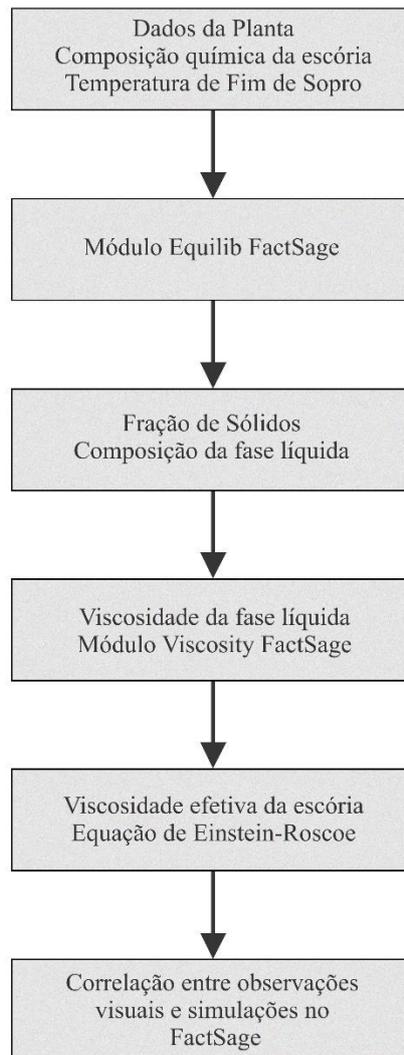


Figura 2. Fluxograma para determinação da viscosidade efetiva da escória a partir da composição e temperatura de fim de sopro.

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.2.1 Amostragem

Foi possível amostrar um total de 24 escórias, coletadas em diferentes conversores na produção de diferentes aços. Material audiovisual foi produzido para constatação das condições e uma melhor determinação das notas. A **Figura 3** demonstra exemplos das três qualidades de escórias identificadas conforme o padrão citado anteriormente, sendo assim possível visualizar a diferença entre elas.

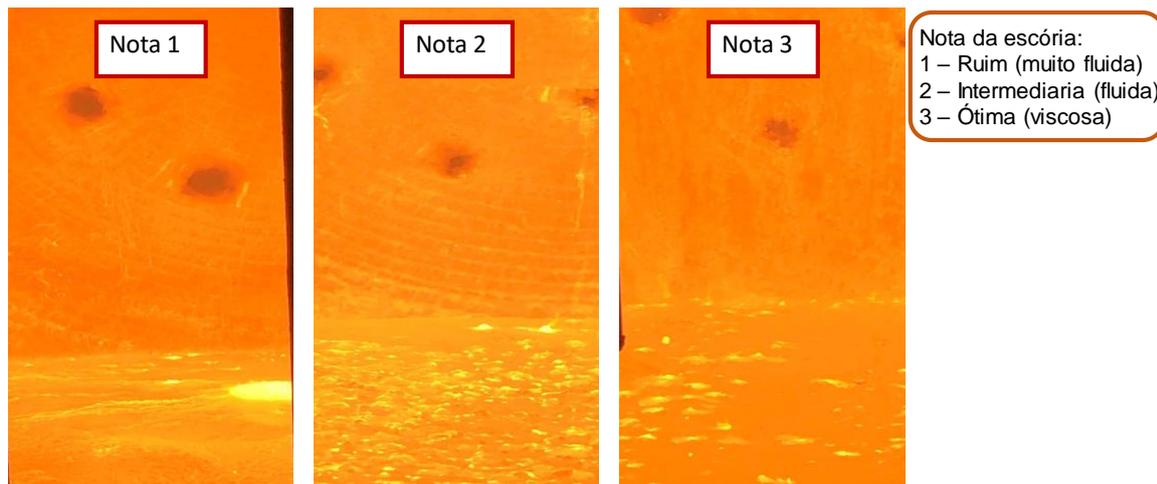


Figura 3: Aspecto visual e notas designadas das escórias amostradas. Os pontos escuros ao fundo são as ventaneiras em diferentes graus de cobertura promovida pela escória.

2.2.2 Análise termodinâmica das escórias no sistema CaO-SiO₂-FeO-MgO

A **Figura 4** mostra o diagrama pseudo-ternário CaO-SiO₂-FeO a 9% MgO, na temperatura de 1973K, construído a partir do módulo *Phase Diagram* do software FactSage. A temperatura selecionada e o teor de MgO estão de acordo com os dados coletados para as 24 escórias (valores médios dos dados coletados). Conforme pode ser observado na **Figura 4**, as composições da escória situam-se no campo (#3) em que a fase líquida da escória está em equilíbrio com as fases sólidas magnésio-wustita (Mg,Fe)O e CaO. Estas fases sólidas correspondem à fase *A-Monoxide* do banco de dados FToxid, do tipo solução sólida, que apresenta um *gap* de miscibilidade, separando-se em uma fase rica em MgO-FeO (magnésio-wustita) e outra rica em CaO, contendo pequenos teores de FeO e MgO.

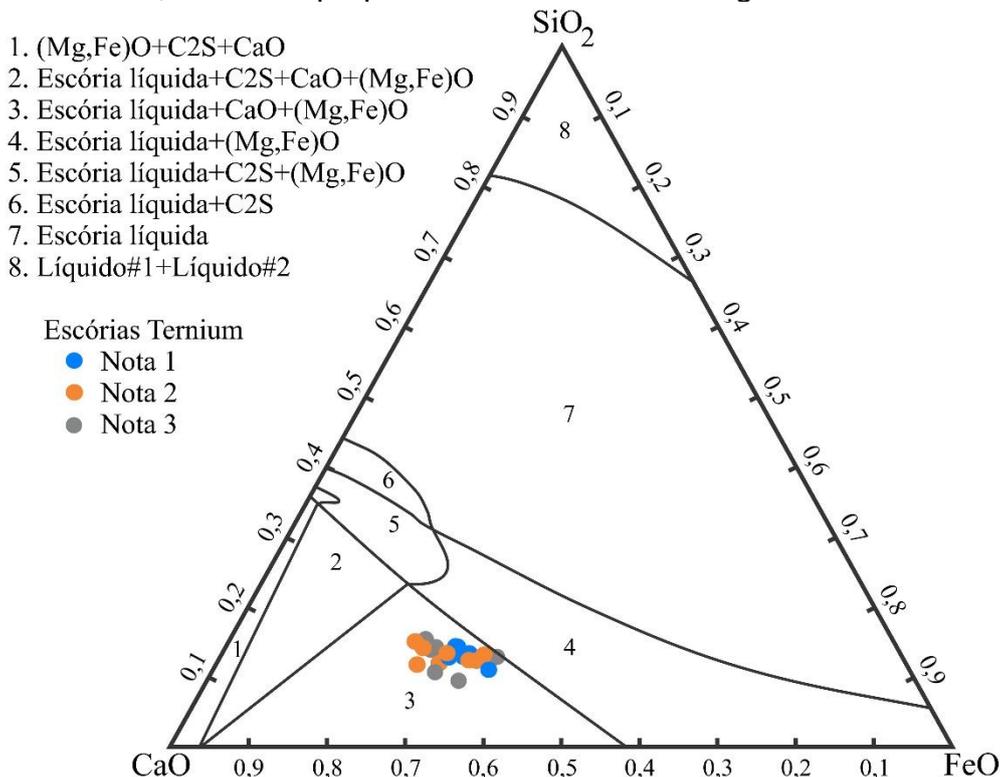


Figura 4: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO₂-FeO a 9% MgO e T=1973K.

2.2.3 Simulação Termodinâmica e Observações Visuais

Os valores obtidos para as frações de sólidos e as viscosidades em função das notas dadas foram apresentados na **Figura 5**. No *box-plot*, observa-se que, mesmo com a grande dispersão de dados, as escórias de nota 1 apresentam média menor do que as escórias de nota 3 tanto para a fração de sólidos quanto para a viscosidade efetiva. As escórias de nota 2 tiveram uma maior dispersão que as demais. Uma vez que com essa nota é mais fácil confundi-las com a 1 ou 3, muitas vezes pelo tempo que se tem para inspeção e outros fatores como temperatura de fim de sopro ou tipo de aço.

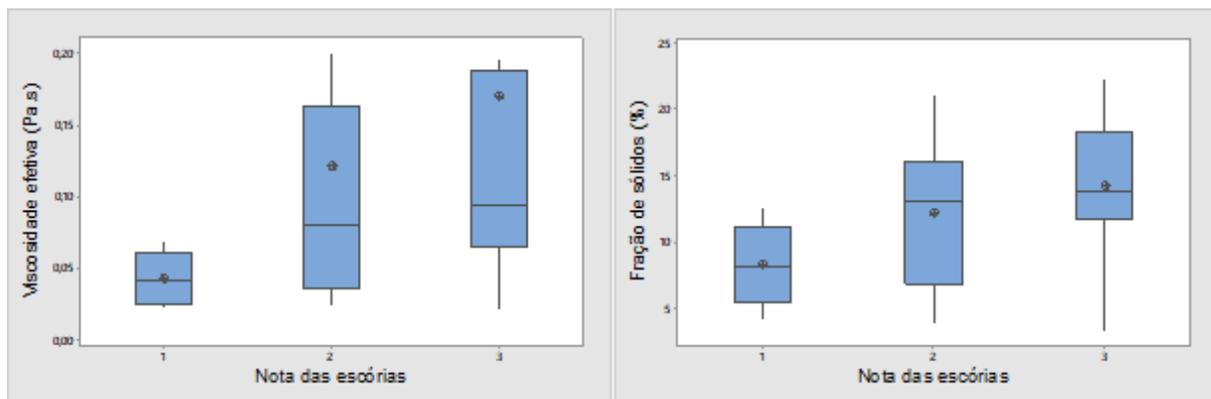


Figura 5: Box-plot da viscosidade efetiva e da fração de sólidos versus as notas das escórias avaliadas.

O cálculo da viscosidade efetiva teve como base a equação de Einstein-Roscoe [7], como exemplificado abaixo, usando-se os parâmetros ajustados por Auad [1]:

$$\eta_{eff} = \eta_m(1 - 3,47231\phi)^{-2,5}$$

Sendo: η_{eff} = viscosidade efetiva da escória (Pa.s);
 ϕ = fração de sólidos;
 η_m = viscosidade da fase líquida (Pa.s);

É de conhecimento, com base na equação clássica de Einstein-Roscoe que, quanto maior a fração de sólidos, maior será a viscosidade efetiva. O comportamento das duas variáveis pode ser melhor avaliado quando analisados na forma de gráfico de dispersão, como exemplificado na **Figura 6**. Nesse caso, fica mais evidente que a partir da fração de sólidos de 13% e viscosidade efetiva de 0,07Pa.s, a probabilidade de se obter escórias com notas 2 e 3 fica bem maior. Auad[1] também sugere que viscosidades efetivas a partir de 0,07Pa.s seriam apropriadas para a prática de splashing. É digno de nota que escórias classificadas como 'ruim' (nota 1) ficaram concentradas exatamente no quadrante oposto àquelas classificadas como 'intermediária e 'ótima' (notas 2 e 3, respectivamente). Isso sugere que tanto o padrão para caracterização visual bem como a metodologia para determinação da viscosidade efetiva e fração de sólidos estão adequados para o estabelecimento de uma abordagem de caracterização assertiva de escórias em aciarias.

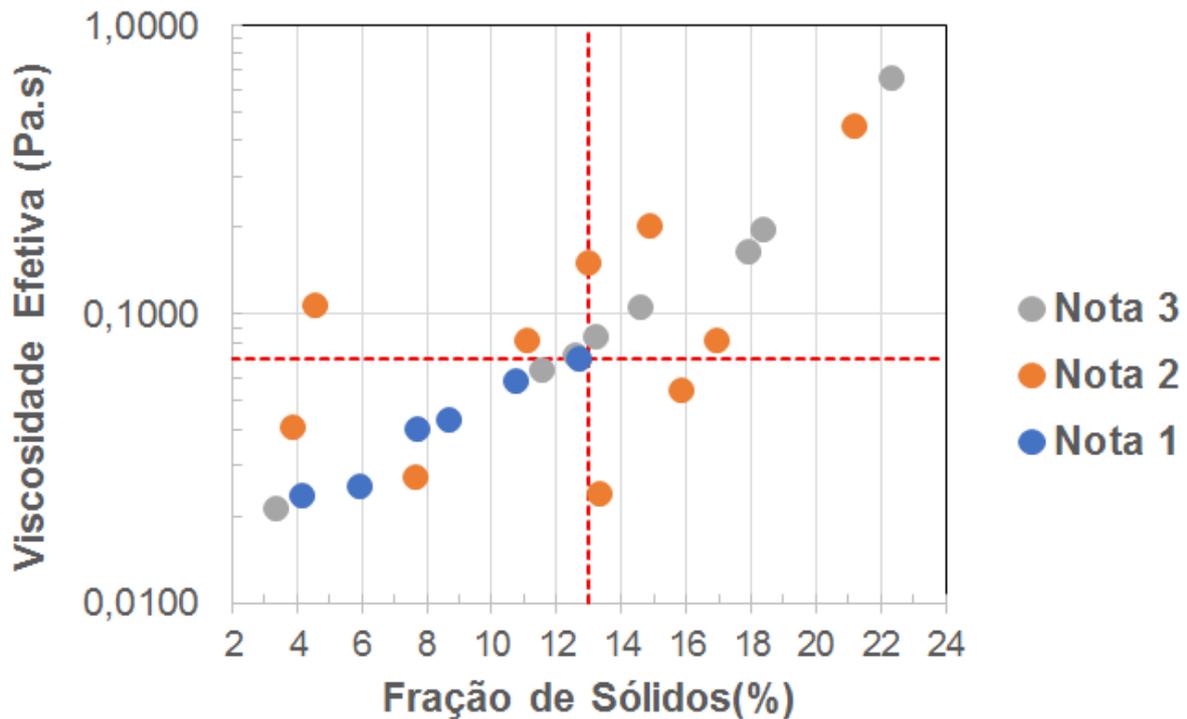


Figura 6: Viscosidade efetiva em função da fração de sólidos, para escórias com diferentes atribuições de nota a partir da inspeção visual.

A porcentagem de ferro total presente na escória também influencia diretamente a viscosidade da escória. A **Figura 7** mostra que as escórias com melhores notas se situam no quadrante em que o teor de ferro total na escória está abaixo de 17,5%, com fração de sólidos no intervalo de 13-22%, e viscosidade efetiva na faixa de 0,070-0,630 Pa.s. A tendência mostra que quanto maior o teor de Fe, menor a viscosidade efetiva, devido à redução na fração de sólidos e também à redução na viscosidade da fase líquida, como pode ser observado claramente pelas escórias de nota 1 (ruim), o que está de acordo com observações reportadas em trabalhos anteriores [8]. Fica evidente que escórias com nota baixa (ruim) concentram-se no quadrante oposto àquelas com notas mais elevadas (intermediária e ótima), corroborando, novamente, a consistência da metodologia proposta.

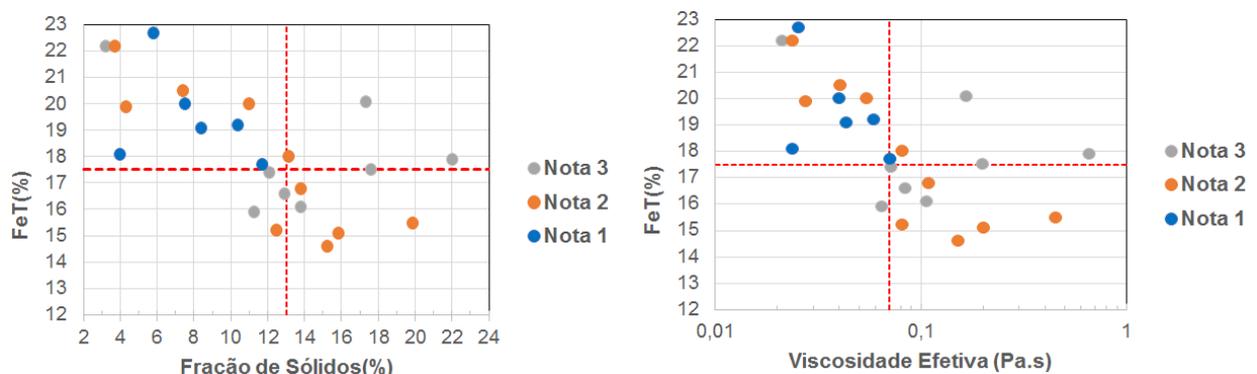


Figura 7: Relação entre teor de ferro total, fração de sólidos e viscosidade efetiva, para escórias com diferentes atribuições de nota a partir da inspeção visual.

A **Figura 8** mostra a relação entre temperaturas de fim de sopro, viscosidade efetiva e fração de sólidos, para as diferentes escórias analisadas. Embora a temperatura tenha apresentado uma elevada dispersão dos dados, pode-se observar que as

escórias com melhores notas (2 e 3) concentram-se na faixa de temperatura de 1690-1720°C, quando as condições ótimas de viscosidade efetiva (0,070-0,650 Pa.s) e fração de sólidos (13-22%) estão asseguradas.

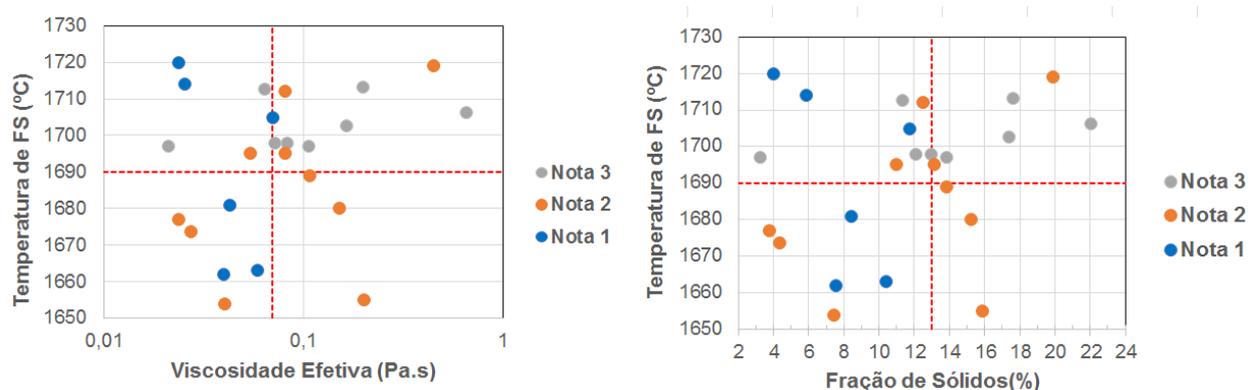


Figura 8: Relação entre temperatura de fim de sopro (FS), viscosidade efetiva e fração de sólidos, para escórias com diferentes atribuições de nota a partir da inspeção visual.

3 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível estabelecer uma metodologia de caracterização de escórias industriais para a prática de *slag splashing*, combinando-se a simulação termodinâmica com a observação visual, usando-se o critério de notas a partir de padrões. Verificou-se que é possível determinar, de forma consistente, os quadrantes ideais de viscosidade efetiva, fração de sólidos e teor de ferro total, de modo que se possa garantir escórias com característica intermediárias e ótimas, evitando-se escórias de baixa qualidade para o processo. Os resultados indicam que as escórias com nota 3 (ótima) são obtidas nas seguintes condições: temperatura de fim de sopro de 1690-1720°C, viscosidade efetiva na faixa de 0,070-0,650 Pa.s, fração de sólidos de 13-22%, teor de ferro total na escória de 14-17,5%.

Um próximo passo seria o estudo detalhado, quantitativo e preciso, de como a adição de materiais de correção de escória como a dolomita crua e a cal dolomítica influencia a viscosidade efetiva e a fração de sólidos. Desta forma, seria possível conduzir todas as escórias para o quadrante ótimo de operação, garantindo a realização mais efetiva da prática de slag splashing, com o uso eficiente do material de correção e melhor controle do processo.

Agradecimentos

O presente trabalho teve suporte teórico e prático da Ternium Brasil. É necessário agradecer aos colaboradores e equipe técnica da empresa que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também aos acadêmicos da Universidade Federal de Minas Gerais pelos conhecimentos compartilhados e por contribuir no aprofundamento da pesquisa. Finalmente agradecemos à Lumar Metals pelo suporte técnico oferecido.

REFERÊNCIAS

- 1 AUAD MV. Desenvolvimento de Modelo para Cálculo de Adições no Processo de Slag Splashing e Slag Coating de um Basic Oxygen Furnace (BOF). 2018.

- Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- 2 SINELNIKOV V, KALISZ D. Modeling Viscosity of Converter Slag. Archives of Foundry Engineering. AGH University of Science and Technology, Department of Foundry Engineering, Poland, 2015: 1-6.
 - 3 BARRON MA. Influence of the slag density on the splashing process in a steelmaking converter. ISRN Metallurgy, Mexico, 2014: 1-6.
 - 4 BARRON MA, MEDINA DY; HILERIO I., CFD Analysis of Influence of Slag Viscosity on the Splashing Process in an Oxygen Steelmaking Converter. Modeling and Numerical Simulation of Material Science, Departamento de Materiales, Universidad Autonoma Metropolitana Azcapotzalco, México D.F., México, 2013: 1-4.
 - 5 SINELNIKOV VO, KALISZ D. Influence the FeO Content on Slag Viscosity at his Spraying. Increase the Life of the Refractory Lining. Glass and Ceramics, [S. I.], 2016: 1-5.
 - 6 BALE CW, BÉLISLE E, CHARTRAND P, DECTEROV SA. ERIKSSON,G. FactSage thermochemical software and databases,Calphad, 2010-2016: v.54, p.35-53.
 - 7 VETERE, F.; BEHRENS, H.; HOLTZ, F.; VILARDO, G.; VENTURA, G. Viscosity of Crystal-bearing melts and its implication for magma ascent. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 2010: 151-163.
 - 8 SINELNIKOV VO, KALISZ D. Influence the FeO Content on Slag Viscosity at his Spraying. Increase the Life of the Refractory Lining. Glass and Ceramics, [S. I.], 2016: 1-5..