

SLAG SPLASHING: PROPOSTA DE EQUACIONAMENTO DOS PARÂMETROS DE SOPRO*

*Inamara Amanda Souza Santos*¹

*Aline Lima da Silva*²

*Vanessa Rodrigues de Medeiros Santos*³

*Willian dos Reis Lima*⁴

*Breno Totti Maia*⁵

Resumo

O método de reparo/prevenção de refratários de convertedores LD chamado *Slag Splashing* possui aspectos operacionais como altura da lança (DBL), vazão do sopro de nitrogênio, lança estática ou em movimento, e aspectos geométricos como número de furos da lança, ângulo de furo, dimensões do convertedor, que devem ser controlados para sua maior eficiência. Estudos a frio realizados, considerando um convertedor com capacidade nominal de 340 toneladas da empresa Ternium Brasil, situado na cidade do Rio de Janeiro, mostram que, a uma altura de lança maior que 3 metros, o jato não consegue atingir a superfície da escória, e que quando essa altura de lança é reduzida, a massa de escória movimentada aumenta, lançando a teoria sobre um novo fator que geraria um banho de escória nas paredes refratárias dos convertedores no lugar da projeção. Também aumenta a massa de escória movimentada: o aumento do ângulo dos furos e o aumento da vazão de nitrogênio, mas para que a efetividade do processo *Slag Splashing* seja real, análises específicas para cada caso de convertedor devem ser feitas, de modo a implantar procedimentos como a movimentação da lança (efeito "io-iô"), que projetem escória nos locais mais desgastados.

Palavras-chave: Converteedor LD, *Slag Splashing*, Modelamento.

SLAG SPLASHING: PROPOSAL OF BLOW PARAMETERS EQUATIONING

Abstract

The method of repair / prevention of refractories of converters called *Slag Splashing* has operational aspects such as lance height (DBL), flow of nitrogen blow, static or moving lance, and geometric aspects such as number of lance holes, hole angle, dimensions of the converter, which must be controlled for their highest efficiency. Cold studies carried out, considering a converter with a nominal capacity of 340 tons of the company Ternium Brasil, located in the city of Rio de Janeiro, show that at a lance height greater than 3 meters the jet could not reach the surface of the slag, and that when this lance height is decreased, the mass of slag moved increases, which launched the theory about a new factor that would generate a slag bath in the refractory walls of the converters instead of projection. It also increases the mass of slag moved: the increase of the angle of the holes and the increase of the nitrogen flow, but for the effectiveness of the *Slag Splashing* process to be real, specific analyzes for each case of converter must be made in order to implant procedures like the movement of the lance ("io-iô" effect) that project slag in the most worn areas..

Keywords: LD converter; Slag Splashing; Modeling

¹ *Engenheira Metalurgista, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE), Coronel Fabriciano, Minas Gerais, Brasil.*

- ² *Engenheira Metalurgista, Doutora, Professora, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ³ *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico e Analista da Lumar Metals, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE), Coronel Fabriciano, Minas Gerais, Brasil – Sócio da ABM.*
- ⁵ *Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador da Lumar Metals, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – Sócio da ABM.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste do revestimento refratário de trabalho de um convertedor a oxigênio é explicado, segundo Mills et. al. [1], por uma combinação de fatores térmicos, químicos e mecânicos. Com a intenção de reduzir esses desgastes naturais do processo, trazendo como benefício o aumento da vida útil dos convertedores, uma das técnicas de manutenção e reparo do revestimento refratário mais utilizada é a de projeção de escória via lança de sopro de nitrogênio contra a face quente do convertedor, técnica conhecida como *Slag Splashing*.

Sardinha et. al. [2] relata que o processo surgiu na década de 70, e na década de 80 não progrediu devido às melhorias implantadas pelos fornecedores de refratários em relação à qualidade de tijolos bem como pelo desenvolvimento de outras técnicas de reparo; somente na década de 90 a técnica foi implantada no Brasil, após alcançar resultados internacionais expressivos.

O *Slag Splashing* é tido como uma das técnicas de reparo/prevenção mais modernas da atualidade. Para que o processo seja efetivo, muitas variáveis devem ser controladas, incluindo-se 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 do efeito destas variáveis. Segundo Tanaka et. al. [3], a altura da lança influencia a posição que recebe a camada de escória (região capeada). Tanto o afastamento da lança da escória como o aumento do ângulo do furo farão com que o gás, ao atingir a escória, se aproxime da parede, mudando a região de capeamento. Estes autores verificaram que há um aumento do volume de projeção diante de uma redução da altura da lança, e esse aumento ocorre até um valor máximo que culmina quando se inicia uma excessiva penetração do jato, ou seja, o jato ultrapassa a camada de escória e passa a atingir o refratário. É nesse ponto que começa a reduzir a projeção. Sobre o afastamento ou aproximação da lança da escória, Lima et. al. [4] explicam que as partes inferiores do vaso de um convertedor tendem a ter um capeamento mais efetivo quando a lança estiver mais alta, e o contrário acontece com as partes superiores, que têm um capeamento mais adequado quando a lança estiver mais baixa. O ângulo do furo de uma lança, por sua vez, apresenta efeito contrário à alteração da altura de lança, ou seja, quanto maiores os ângulos, mais intensas serão as projeções nas partes inferiores do vaso. O ângulo do furo da lança, contudo, é um parâmetro geométrico que não pode ser alterado com facilidade, por ser definido de acordo com o número de furos e do tamanho do convertedor. O aumento no número de furos da lança, assim como o aumento do ângulo de seus furos, poderia favorecer a formação de uma camada uniforme de escória que se adere sobre o revestimento de um BOF [5]. No que concerne ao efeito da dimensão do convertedor, que é outro aspecto geométrico a ser considerado, a literatura traz poucas discussões a respeito, e estudos sobre a relação entre quantidade de *splashing* de escória e tamanho do vaso do BOF ainda são pouco desenvolvidos. Referente ao efeito da vazão de nitrogênio, que é um parâmetro operacional que deve ser adequadamente ajustado, os autores [1,3,4,6] mostram que a quantidade de escória projetada pelo sopro de nitrogênio aumenta com a elevação da vazão de sopro e que, além disto, o aumento na vazão de sopro resulta em maior deposição da escória em todas as regiões do forno. Por fim,

salienta-se a importância do controle da viscosidade das escórias. Lima et.al. [4] descrevem que visualmente é possível verificar durante o *Slag Splashing* que escórias mais viscosas não possuem a mesma intensidade de projeção em relação às escórias mais fluidas. Outros autores [3,7] chegaram às mesmas conclusões e constataram também que essas escórias muito fluidas não são interessantes, visto que, mesmo que haja uma maior intensidade de projeção, elas não aderem à parede.

Segundo Auad [8], determinar a viscosidade efetiva das escórias é uma tarefa complexa e que ainda necessita de um modelo mais assertivo para descrever a viscosidade da fase líquida; existe uma faixa de valor ótimo para viscosidade efetiva que, ao ser alcançado, será responsável por parte do sucesso do *Slag Splashing*.

Como pode ser observado, diversos parâmetros operacionais devem ser criteriosamente monitorados para a prática efetiva de *Slag Splashing*. Neste sentido, o presente trabalho visa contribuir ao entendimento dos efeitos dos principais parâmetros de jato em relação à efetividade de penetração e massa de escória a ser espalhada pelo convertedor.

2. METODOLOGIA

A metodologia consistiu na utilização de desenhos de um convertedor de referência e nos parâmetros operacionais adotados atualmente nesse reator. Para o presente estudo geométrico, foi considerado um convertedor com capacidade nominal de 340 toneladas da empresa Ternium Brasil, situado na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. A **Figura 1** apresenta o perfil geométrico do convertedor juntamente com a lança de oxigênio, a qual está posicionada em seu respectivo batente máximo de descida. Os equipamentos foram desenhados, respeitando-se as dimensões corretas; na sequência, foram realizadas as análises geométricas e metalúrgicas dos fenômenos potenciais que podem ocorrer, bem como seus efeitos no processo.

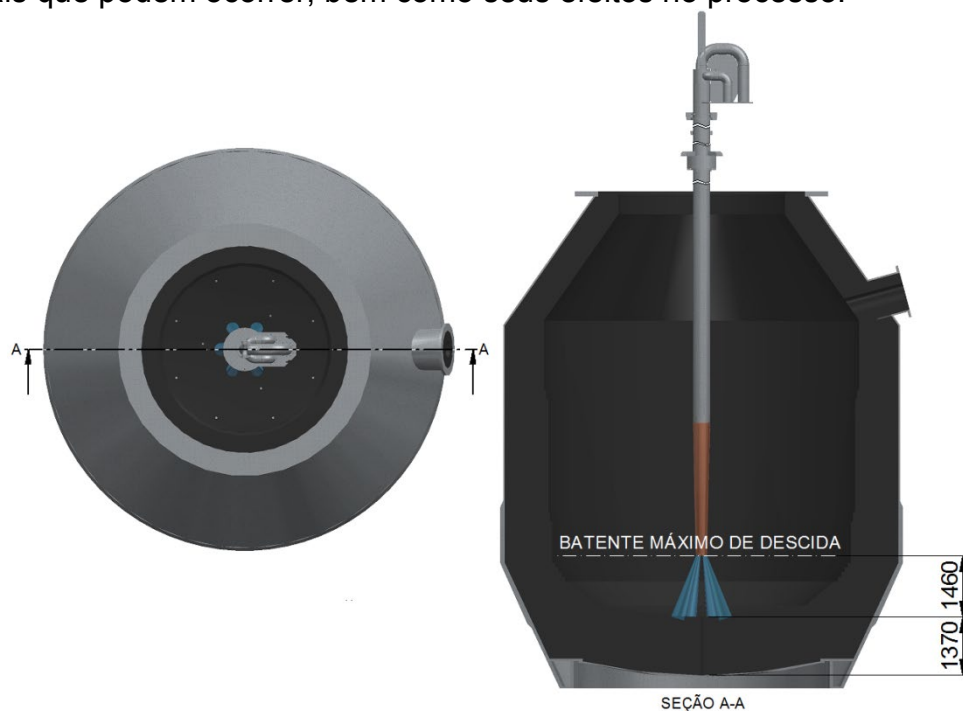


Figura 1. Perfil geométrico do convertedor.

No presente estudo, a partir do balanço de energia, é proposta a equação (1) para o cálculo da penetração de jato sobre a escória e, a partir dos resultados de penetração, estima-se a massa projetada nas paredes.

$$\frac{1}{2} \times \rho_{GAS} \times \left(\frac{V_{EXIT} \times K \times D_{EXIT} \times \cos\theta}{(DBL+P)} \right)^2 \times n = (\rho_{SLAG} \times P \times g) + \frac{(\sigma_{SLAG} \times \cos\theta)}{P} \quad (1)$$

onde: ρ_{GAS} – densidade do gás (kg/m^3), ρ_{SLAG} – densidade da escória (kg/m^3), σ_{SLAG} – tensão superficial da escória (N/m), V_{EXIT} – velocidade oxigênio na saída do bocal (m/s), D_{EXIT} – diâmetro de saída do bocal (m), DBL – distância banho-lança (m), P – penetração do jato na escória (m), g – gravidade = 9,8 (m/s^2), n – número de bocais de lança = 6, θ – ângulo dos furos com vertical (graus), K – fator de penetração do jato.

A partir do valor de penetração encontrado pela Eq. (1), pode-se determinar a massa de escória movimentada, considerando-se a forma esférica de impressão de jato, a densidade da escória e o número de furos, assumindo-se jatos independentes. Sabe-se que durante o processo de *Slag Splashing*, a escória sofre transformação, principalmente relacionada com a mudança de temperatura provocada pelo nitrogênio; no entanto, para o equacionamento proposto, foram assumidas as seguintes características da escória, conforme apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Características da escória

Densidade	Viscosidade Dinâmica Escória	Tensão Superficial	Volume de Escória	Massa de Escória	Altura da camada de Escória
kg/m^3	$\text{kg/m.s} = \text{Pa.s}$	N/m	m^3	kg	m
2300	0,0835	1,20	36,7	84500	0,54

No presente estudo, são realizadas diferentes análises de sensibilidade, variando-se os seguintes parâmetros: altura de lança, ângulo de furo e vazão de nitrogênio. A **Tabela 2** mostra os valores considerados para estes parâmetros.

Tabela 2 – Parâmetros de *Slag Splashing* simulados

Parâmetros	Unidade	Valores							
		4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Altura de Lança	m	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Ângulo	grau	10		14			17,5		
Vazão de Nitrogênio	$\text{Nm}^3/\text{min.}$	800		1000			1200		

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise do efeito de altura de lança (DBL)

A **Tabela 3** mostra que a Eq. (1) não convergiu em duas alturas de lança: 4 e 3,5. Isso significa que o jato não conseguiu atingir a superfície da escória e, portanto, não houve penetração. A partir de 3 metros da camada de escória, o jato começa a penetrar, conforme representado na **Figura 2**. Para distâncias banho-lança (DBL) com valores inferiores a 2 metros, a quantidade de momento do jato é suficientemente alta para que alcance a sola do convertedor. Se não houvesse a limitação física pelos tijolos refratários, a penetração chegaria a um valor de aproximadamente 3 vezes o valor da camada de escória. Contudo, baseado nos cálculos onde a penetração atingiu o refratário, propõe-se uma teoria; supõe-se que a resistência encontrada pelo jato ao tocar o refratário, em combinação com a força de penetração, leve à geração de um novo fator que pode contribuir para o aumento da movimentação de massa, ou seja, promovendo o deslocamento da escória até a parede refratária. Este novo fator é atribuído a um suposto cilindro de penetração, cuja construção é realizada assumindo-se que o jato perfure a sola. Como esse fenômeno não ocorre, considera-se como base o formato cilíndrico do jato. Através desse cilindro, determina-se o volume, o qual poderá ser convertido em massa, que, por sua vez, estará associada a um aumento da turbulência na escória. Desse modo, o deslocamento de massa para as paredes laterais do forno é favorecido e, conseqüentemente, ocorre o banho de escória nas paredes refratárias dos convertedores em vez da projeção até a região da boca do convertedor ou região dos munhões. Como se trata de uma teoria, a mesma será estudada de forma a correlacionar os cálculos analíticos com testes práticos em laboratório com modelamento a frio. A **Figura 3** representa a teoria citada.

Tabela 3 – Parâmetros e resultados da penetração e massa movimentadas para *Slag Splashing* – variação na altura de lança (DBL)

DBL	m	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50
Vazão de N ₂	Nm ³ /min	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Pressão de N ₂	kgf/cm ²	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94
Número de bocais		6	6	6	6	6	6	6	6
Ângulo	graus	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Escória	Convergiu?	NÃO CONVERGE	NÃO CONVERGE	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Nível da escória	m	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Penetração (%)		-	-	0,37	0,53	0,71	0,92	1,17	1,46
Penetração	m	-	-	69	98	132	171	218	271
% Massa movimentada		-	-	0,2	0,5	1,2	2,7	5,6	10,7

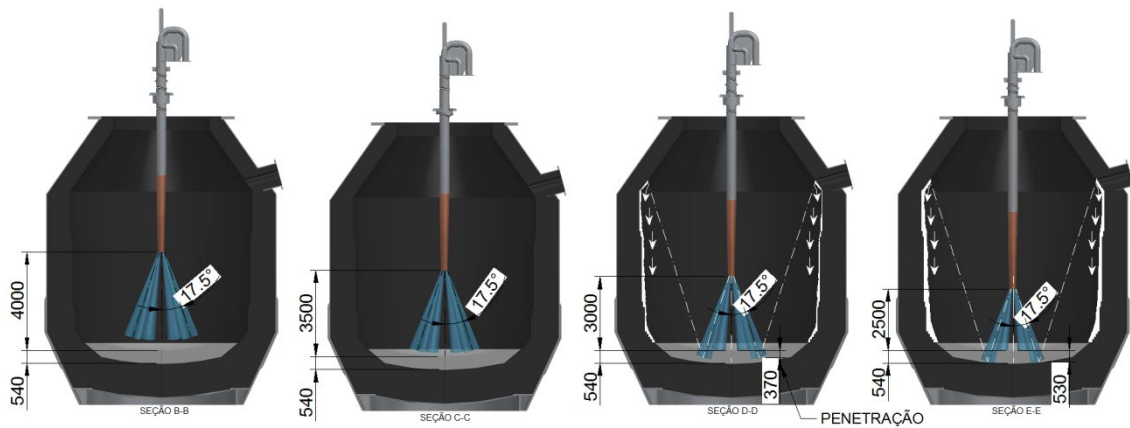


Figura 2. Efeito da distância banho-lança na penetração do jato e projeção da escória.

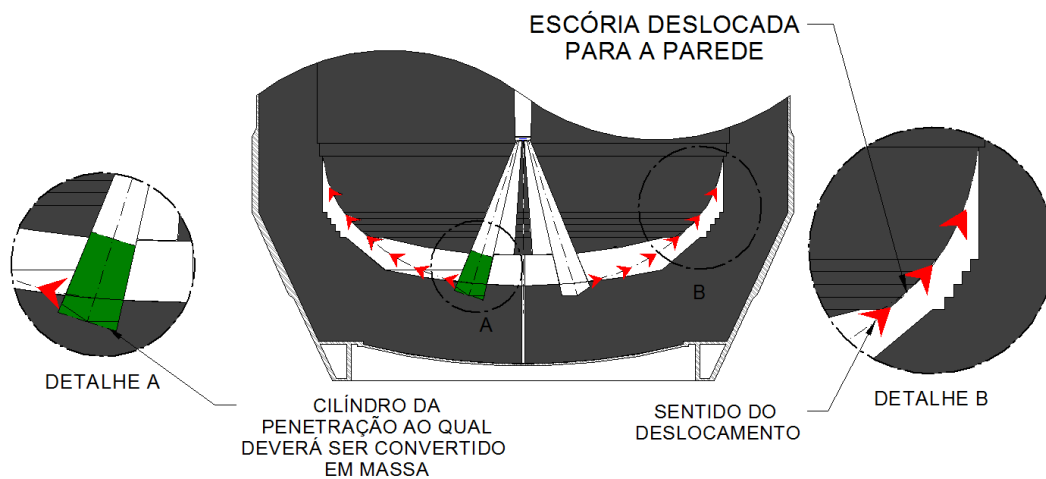


Figura 3. Teoria de formação do cilindro de penetração para quantidade de momento do jato muito elevada.

Diante desta teoria, a Figura 4 representa os convertidores onde os DBL's são inferiores a 2m.

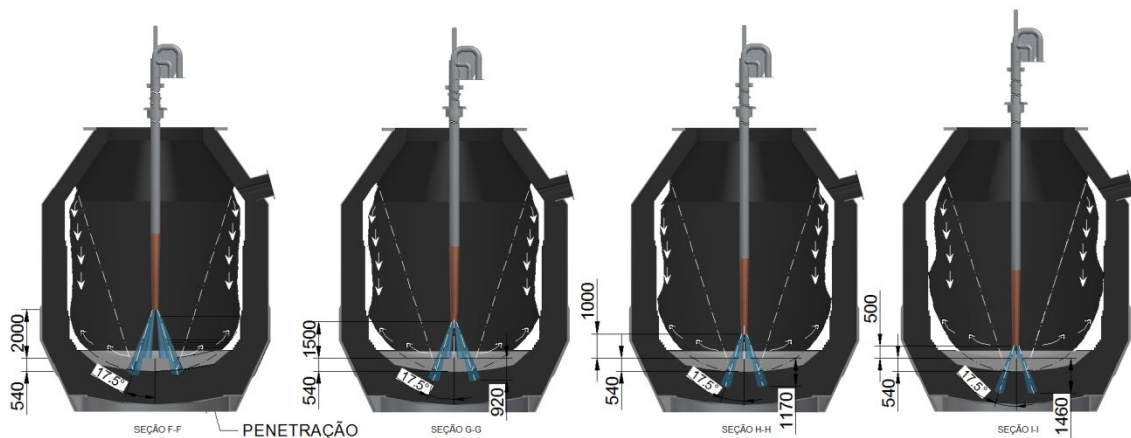


Figura 4. Efeito da distância banho-lança na penetração do jato e projeção da escória, para DBL < 2m.

Para o cálculo da massa movimentada, considerou-se que os furos formam uma única cavidade de impacto, isso devido à viscosidade elevada da escória. Então, com o valor de penetração, calculou-se o volume deslocado nessa cavidade única, sendo, portanto, um valor estimado. A quantidade de massa movimentada mostra resultados que parecem razoáveis, pois, à medida que a lança desce, o diâmetro reduz decorrente do ângulo, muito embora a penetração aumente, mas em relação ao volume total do forno, o volume projetado é pequeno.

3.2. Análise do efeito do ângulo com a vertical

A **Tabela 4** mostra que, à medida que o ângulo aumenta, ocorre uma redução da penetração de jato, mas, em contrapartida, ocorre um aumento da massa movimentada. Esse comportamento está no fato da abertura do ângulo aumentar a área projetada do jato sobre a escória e assim maximizar a quantidade de material projetado. Esse comportamento deixa um alerta para as práticas industriais que consideram altura fixa de lança em geral próxima aos batentes mecânicos das lanças, pois existe uma altura ideal para uma boa penetração de jato e massa movimentada específica para a condição de cada BOF.

Tabela 4 – Parâmetros e resultados da penetração e massa movimentadas para *Slag Splashing* – Variação do ângulo com a vertical.

Ângulo	graus	10,00	14,00	17,50
DBL	m	1,00	1,00	1,00
Vazão de N ₂	Nm ³ /min	1000	1000	1000
Pressão de N ₂	kgf/cm ²	10,94	10,94	10,94
Número de bocais		6	6	6
DBL	m	1,00	1,00	1,00
bolhas+escória	Convergiu	OK	OK	OK
Nível de escória	m	0,54	0,54	0,54
Penetração	m	225	221	218
% Penetração		1,21	1,19	1,17
% Massa movimentada		3,5	4,7	5,6

A **Figura 5** mostra a massa movimentada de escória em função do ângulo com a vertical.

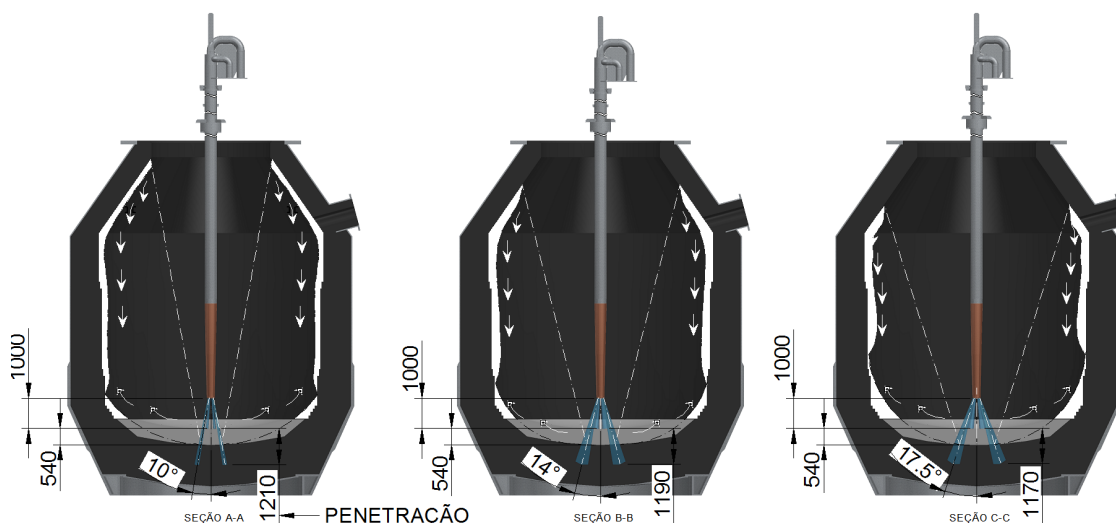


Figura 5. Variação de massa movimentada de escória em função do ângulo com a vertical.

Para o ângulo de $17,5^\circ$, pode ser notada através das linhas reflexivas uma projeção de escória para a região do cone do convertedor. Já no ângulo de 14° , a projeção de escória tende para a região da boca do convertedor, enquanto que para o ângulo de 10° , a projeção de escória tende para fora do convertedor, sendo direcionado para a saia móvel.

3.3. Análise do efeito da vazão de nitrogênio

O aumento da vazão de nitrogênio aumenta o momento do jato e, conseqüentemente, a penetração e a massa movimentada, conforme pode ser observado na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Parâmetros e resultados da penetração e massa movimentada para *Slag Splashing* – Variação da vazão de nitrogênio

Vazão de N ₂	Nm ³ /min	800	1000	1200
DBL	m	1,00	1,00	1,00
Pressão de N ₂	kgf/cm ²	8,75	10,94	13,12
Número de bocais		6	6	6
Ângulo	graus	17,50	17,50	17,50
Bolhas + escória	Convergiu	OK	OK	OK
Nível de escória	m	0,54	0,54	0,54
% Penetração		1,11	1,17	1,23
Penetração	m	206	218	227
% Massa movimentada		4,7	5,6	6,3

A **Figura 6** ilustra o efeito da vazão de N₂ na massa movimentada de escória.

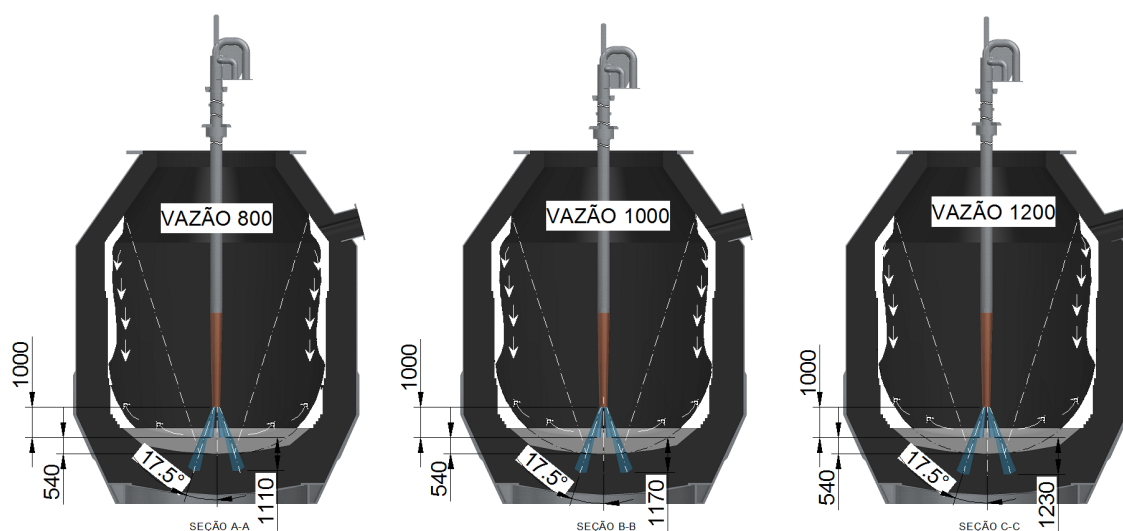


Figura 6. Variação de massa movimentada de escória em função da vazão de N₂.

3.4. Técnicas de Projeção

Nos dias atuais, a prática adotada para a projeção de escória na parede do convertedor consiste nos seguintes passos:

- Descida da lança até o batente mecânico máximo;
- Abertura máxima da válvula de nitrogênio;
- Projeção de material para a parede do convertedor com lança estática.

Contudo, esta prática adotada talvez não reflita a melhor condição de projeção de material na parede do convertedor, pois como a lança é mantida estática, a projeção de escória incide diretamente a um ponto e a partir deste ponto escorre pelas paredes do convertedor, conforme mostra a **Figura 7**.

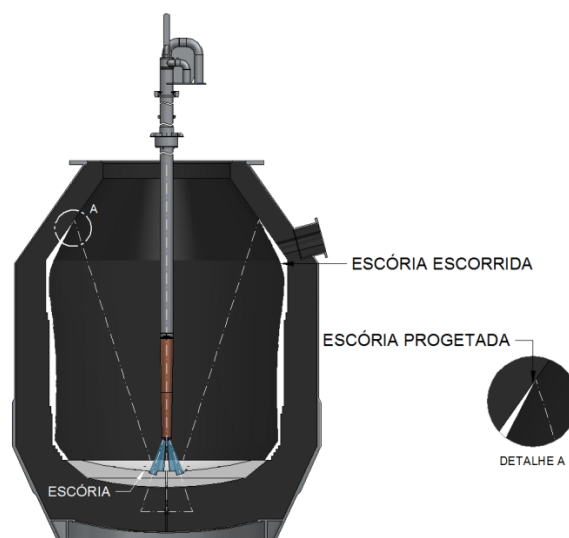


Figura 7. Técnica de projeção adotada atualmente.

Simultaneamente à prática adotada, sugere-se uma nova forma para execução da atividade, que consiste em passos similares à prática descrita anteriormente. Os passos são:

- Descida da lança até DBL mínimo;
- Abertura máxima da válvula de nitrogênio;
- Projeção de material para a parede do convertedor com lança em movimento, fazendo efeito “io-iô”.

Mantendo-se a lança em movimento durante o *Slag Splashing*, a projeção de escória na parede do convertedor não se restringe a um único ponto, e sim a vários outros pontos, conforme apresenta **Figura 8**.

Os pontos a serem atingidos irão variar conforme as alturas da lança definidas. Vale ressaltar que os convertedores existentes são de tipo e forma diferentes; com isso, para cada tipo de convertedor cabe um estudo isolado para os devidos posicionamentos de lança.

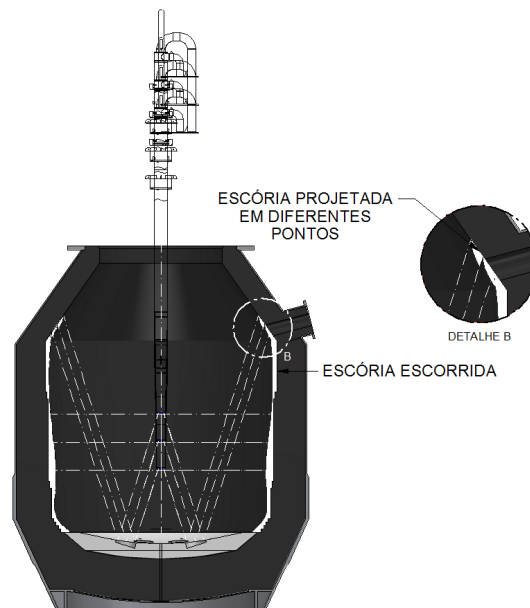


Figura 8. Efeito “ioiô” em lança.

4 CONCLUSÃO

A variação do parâmetro altura de lança (DBL) evidenciou um novo fator, que considera o formato cilíndrico do jato com um volume que pode ser determinado e convertido em uma massa, e essa irá promover um banho de escória nas paredes do BOF, ao invés de uma projeção. Esse novo fator ainda requer estudos mais aprofundados com práticas em modelos a frio, de forma a comprovar a teoria. Aumentar o ângulo dos furos da lança promove uma projeção mais adequada na região do cone, e quando se reduz esse ângulo, a tendência da projeção é capear a região da boca sendo também possíveis projeções externas, que podem comprometer a saia móvel e/ou o sistema de lavagem de gás do forno. O parâmetro operacional vazão de nitrogênio aumenta o momento do jato a medida que fica maior, o que, conseqüentemente, também aumenta a massa movimentada de escória. Um ponto interessante a ser estudado e analisado pelas empresas que possuem o *Slag Splashing* como método de prevenção ou reparo, ou que pensam em adotá-lo, é com relação à movimentação da lança, que vai permitir projeções de escória em mais de um ponto do vaso (efeito “io-iô”), podendo ser direcionadas de acordo com a necessidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Daniel A. Godinho de Carvalho e Leonardo Demuner da Ternium Brasil, da cidade do Rio de Janeiro, pois permitiram uso de informações do convertidor para esse estudo, e que, com os avanços que serão feitos nos estudos do modelo a frio, se dispõem a realizar testes industriais.

REFERÊNCIAS

- 1 Mills, K.C; Su, Y; Fox, A.B; Li, Z; Thackray, R.P & Tsai, H. T - A Review of Slag

- Splashing, ISIJ International, Vol. 45, No. 5, 2005, p. 619-633.
- 2 Sardinha, I. A.; Ribeiro, D.B. Processo slag splashing: cobertura refratária através de sopro de nitrogênio. *Metalurgia & Materiais*, v. 55, n. 486, 1999, p. 166-172.
 - 3 Tanaka, T.; Okane, K. Interaction Between Gas and Liquid by Means of Jet of Top Blow. *Transactions of The Iron and Steel Institute of Japan*. Tokyo, Vol. 27, No 1, 1987, p. B7.
 - 4 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.
 - 5 Maia, B. T.; Diniz, C. N. A.; Pereira, G. G.; Salgado, R. S.; Tavares, R. P. BOF Cold Model - Metal Slag Bath Mass Movement Determination by Supersonic Blow From Multi Nozzles In: 3rd ESTAD 2017, 2017, Viena. *European Steel Technology and Application Days 2017*. Leoben: ASMET, 2017. v.1. p.1022 – 1037.
 - 6 Lima, F. A. Otimização do Processo “Slag Splashing” em Convertedores. [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2000.
 - 7 Garg, A.K.; Peaslee, K.D. Physical modeling of BOF slag splashing. In: 80th *Steelmaking Conference proceedings: Chicago Meeting; 1997*. Chicago, Estados Unidos. 1997.
 - 8 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.