

EFEITO DE PARÂMETROS DE SOPRO NA PENETRAÇÃO DE JATO ATRAVÉS DE UM MODELO FÍSICO DE CONVERTEDOR BOF – Parte 2¹

Breno Totti Maia²
Rafael Kajimoto Imagawa³
Ronan Almeida Faustino⁴
Ana Clara Petrucelli⁵
Roberto Parreiras Tavares⁶

Resumo

É importante saber o comportamento do banho metálico para possibilitar soluções que reduzam o tempo de sopro no BOF. O objetivo deste trabalho é comparar o efeito de bicos, vazão e altura de lança na penetração de jato na penetração de jato através de inspeção visual e a partir do desenvolvimento de um balanço de energia considerando a quantidade de furos e ângulos com a vertical e torção. Vazão elevada, redução da distância lança banho e pequenos ângulos com a vertical e torção resultam em maior penetração, porém com efeitos deletérios ao processo. O balanço de energia mostrou ser uma ferramenta adequada para orientar ajustes de processo.

Palavras-chaves: BOF; Penetração de jato; Froude.

EFFECT OF BLOW PARAMETERS IN THE JET PENETRATION BY PHYSICAL MODEL OF BOF CONVERTER PART 2

Abstract

It is important to know how the bath behavior to reduce the blow time and splashing in top of the converter. The target of this work is to compare works the effect of nozzle, flow and lance height in the jet penetration by visual inspection and by energy balance that consider number of nozzles and vertical and twist angles. High flow, reduction in bath lance distance and lower nozzle angle promoted a higher penetration, but with bad results for the process. The energy balance showed to be a properly tool to promote adjustments in process.

Key words: BOF; Jet penetration; Froude.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.

² Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista e Pesquisador da Lumar Metals; Belo Horizonte, Brasil.

³ Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

⁴ Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

⁵ Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

⁶ Engenheiro Metalurgista; Sócio da ABM; Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG. Belo Horizonte, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O convertedor BOF é um equipamento singular e simples para produção de aço. Durante anos, muitos desenvolvimentos foram adicionados ao BOF com objetivo de reduzir o tempo de sopro, reduzir o oxigênio e o fósforo de fim de sopro além de aumentar a vida do refratário. Neste sentido o aprimoramento das técnicas de sopro de oxigênio é essencial para atingir os novos desafios que em certas circunstâncias antagônicos em seus objetivos principais.

Segundo Glass e Smith,⁽¹⁻²⁾ no ponto onde o gás atinge a superfície do líquido, uma depressão ou cavidade é formada, a superfície torna-se instável e oscila em ambas as direções laterais e verticais. A transferência de quantidade de movimento do jato de gás causa a circulação do banho líquido e também provoca a elevação das bordas ao redor da depressão. Após uma determinada profundidade da depressão, uma pequena ondulação, originada ao redor da periferia, quebra em pequenas gotas, que são ejetadas para o ambiente e quando retornam arrastam pequenas bolhas de gás. Esta depressão pode ser mensurada por dois parâmetros, a profundidade da depressão, medida no centro do convertedor e o diâmetro da deformação, em relação ao banho estático, conforme apresentado na Figura 1.

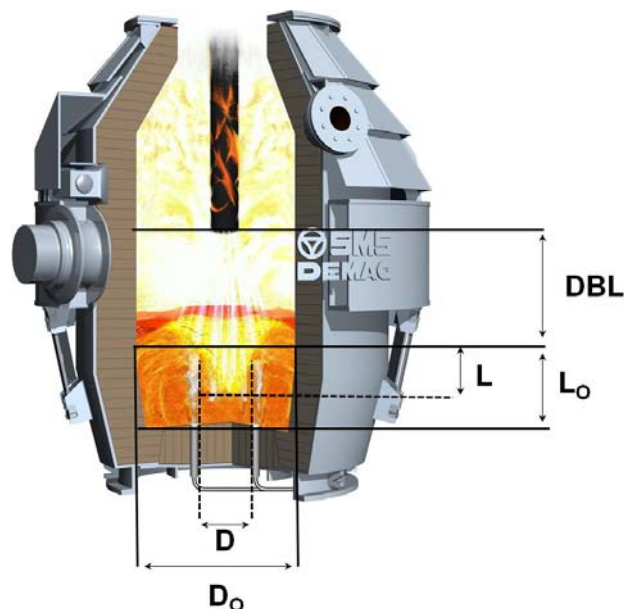


Figura 1 - Deformação do banho formada pelo impacto do jato.⁽³⁾

O local do impacto do jato no banho, onde o oxigênio reage, tem sido denominado ponto de fogo, havendo trabalhos que apresentam resultados de temperaturas nesta região, em torno de 2.300°C.⁽⁴⁾ Esta superfície deformada, não é estável, oscilando no sentido vertical de forma cíclica e com rotações, investigadas em modelos a frio.⁽⁵⁻⁸⁾ Com a evolução do tempo de sopro, a fase espumosa formada envolve o jato, alterando suas características quando comparado ao início do refino. A profundidade da depressão no banho líquido pode ser correlacionada com a quantidade de movimento do jato através de um balanço de energia na base da cavidade, conforme a equação abaixo, proposta por Szekely e Themelis:⁽⁹⁾

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_{saída} \cdot v_x^2 = g \cdot \rho_B \cdot H_c + \frac{2 \cdot \sigma}{r_c} \quad (1)$$

Onde “ $\rho_{saída}$ ” – densidade na saída do bocal ($kg.m^{-3}$), “ ρ_B ” – densidade do banho ($kg.m^{-3}$), “ v_x ” – velocidade do jato abaixo da saída do bico ao longo do eixo do jato ($m.s^{-1}$), “ g ” – aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$), “ H_c ” - altura da cavidade no banho ou penetração (m), “ r_c ” - raio da cavidade no banho no ponto de estagnação (m) e “ σ ” – tensão superficial ($N.m^{-1}$).

Talvez o cálculo mais utilizado pelos aciaristas, foi desenvolvido pelo corpo técnico da Nippon Steel Corporation - NSC, do Japão, avaliando a força do impacto, através do cálculo da profundidade de penetração (L) em relação ao nível do banho estático (L_{h_0}).⁽¹⁰⁾ O valor de L é dado por:

$$L = L_{h_0} \cdot \exp(-0,78h / L_{h_0}) \quad (2)$$

$$L_{h_0} = 63 \left(\frac{Q}{d_t} \right)^{2/3} \quad (3)$$

Onde o valor de “ d_t ” - diâmetro da garganta do bocal, na equação (3), no caso de lança multi furos deve ser substituído por um diâmetro equivalente, função do número de furos, do diâmetro da garganta e do ângulo de inclinação do furo. O cálculo do diâmetro equivalente é obtido pela equação (4).

$$d_{eq} = nf \left(\frac{d_t}{k_n} \right) \quad (4)$$

Apesar de serem fórmulas muito úteis para as industriais determinadas a partir de resultados de ensaios físicos a frio, a valor das constantes é objeto de discussão. Este trabalho tem por objetivo uma adequação da equação (1) considerando o número de furos e ângulo, assim como a determinação da constante K.

2 METODOLOGIA

Os experimentos foram feitos no modelo físico do Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP) da Escola de Engenharia da UFMG.

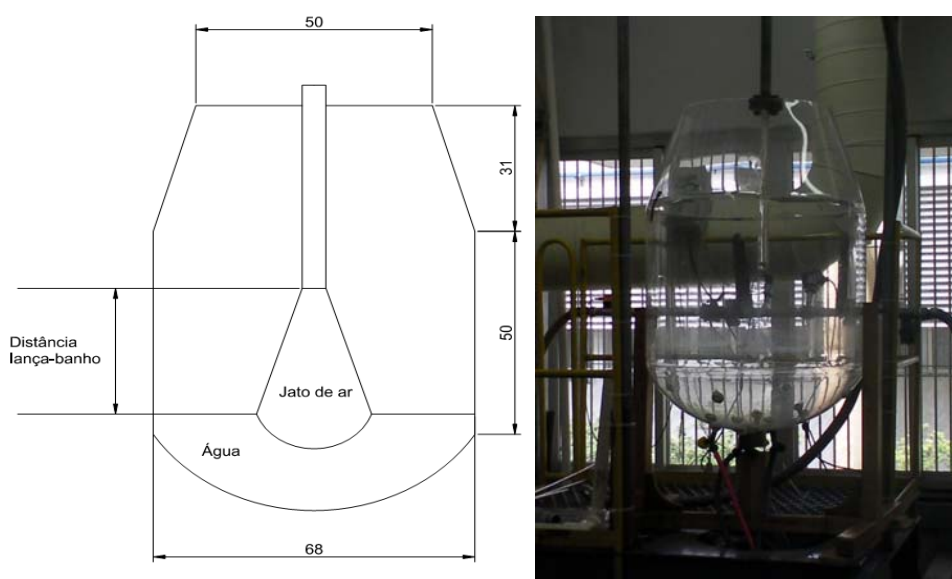


Figura 2 - Dimensões do modelo físico do convertidor BOF.

O vaso foi preenchido com água na altura que representa o nível do banho metálico. Na saída do sistema de ar comprimido os bicos de lança foram conectados. Para alimentar o sistema com ar comprimido foi utilizado um compressor 22,5kW, capaz de fornecer 7,87x10⁵ Pa de pressão máxima e uma vazão máxima de 189 m³/h. A Figura 2 apresenta vistas de topo e lateral com as diferenças entre os bicos.

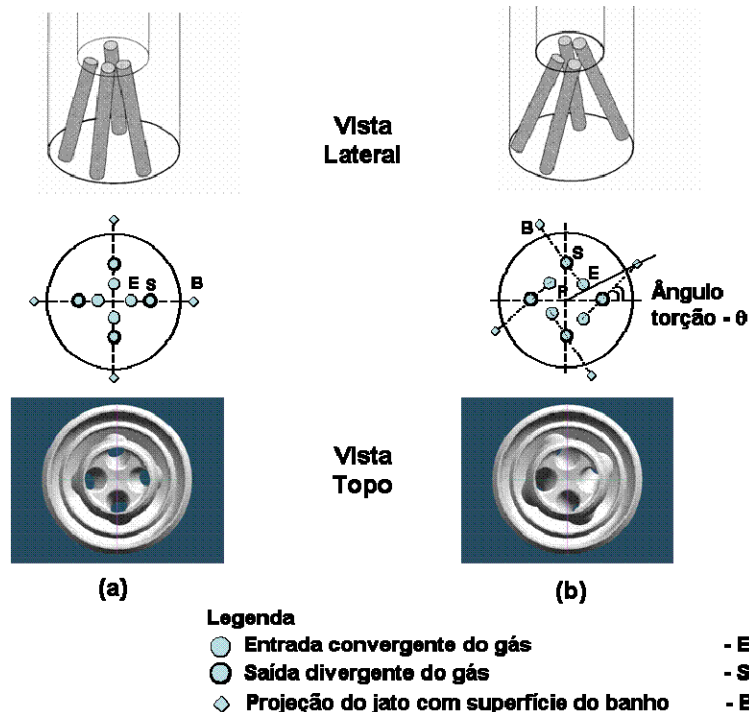


Figura 3 - Comparação entre (a) bico normal e (b) bico com torção.

Na Figura 3 a lança com ângulo de rotação 0°, corresponde ao bico normal (a). O bico com ângulo de torção (θ) é definido na figura 2 (b). O eixo da lança está no ponto "P", a entrada do bocal está no ponto "E" e a saída no ponto "S". O ponto "B" é a projeção do eixo do bocal sobre a superfície do banho. No bico normal, o ponto "P", a entrada "E" e a saída "S" do bocal estão alinhados, conseqüentemente o ponto "B" também está no mesmo alinhamento. No bico com torção, o ponto "B" está alinhado com a entrada "E" e a saída "S", não interceptando o ponto "P", ou seja, o centro da lança. Desta forma, o ângulo de torção é definido pela intersecção de duas linhas no ponto "S", sendo a primeira linha, determinada entre dois bocais de saída passando pelo ponto "P" e a segunda linha, a que une os pontos "E", entrada e "S", saída de um dos bocais.⁽¹¹⁻¹²⁾ O segundo grupo de experimentos foi conduzido comparando os efeitos do ângulo com a vertical e a suavização da geometria do bocal, conforme apresentado na Figura 4. É possível notar nas partes (a) e (b) o aumento do ângulo com relação à vertical com o afastamento dos bocais em relação aos outros. Na parte (c) da Figura 4 atenção deve ser dada à geometria interna do bocal, constituída de uma parábola que vai do trecho convergente ao trecho divergente, tendo como objetivo reduzir o comprimento do segmento reto do diâmetro crítico, apresentado em detalhes na Figura 5. Segundo Maia et al.,⁽¹³⁾ o trecho reto na região da garganta provoca queda na eficiência de transição das propriedades do gás e conseqüente perda na penetração do jato de gás depende dos números de Froude, Reynolds e Weber modificados para o líquido, refletindo a

relação entre as forças da gravidade, viscosas e forças de tensão superficial para o jato.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ A Tabela 1 apresenta uma comparação de valores entre os adimensionais com os parâmetros da indústria e os parâmetros do modelo físico a frio.

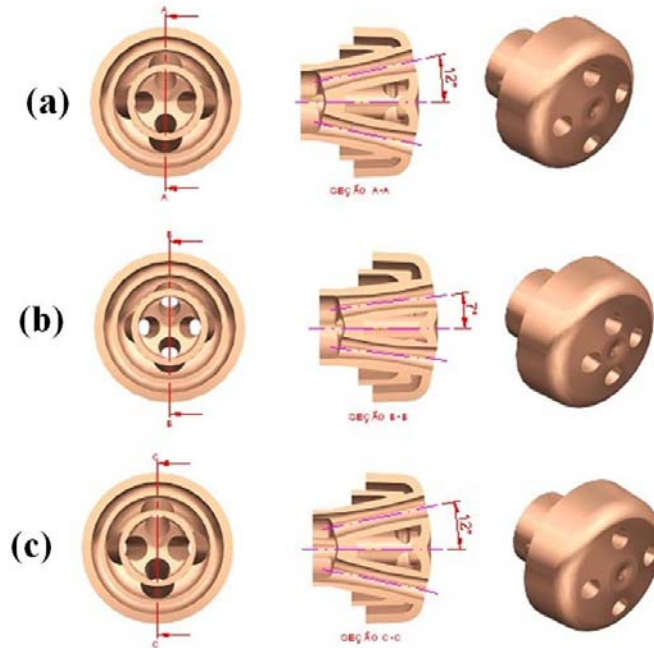


Figura 4 - Comparação entre (a) bico normal com 12° em relação a vertical e (b) bico normal com 7° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

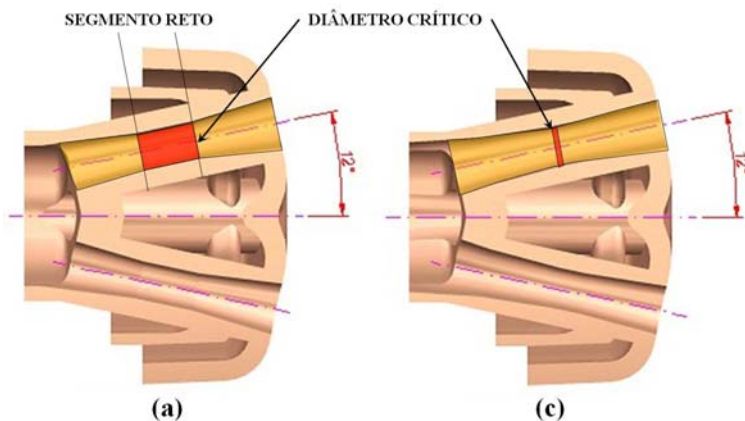


Figura 5 - Detalhe da diferença construtiva entre: (a) bico normal com 12° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

Tabela 1- Comparação entre números adimensionais no reator industrial e no modelo físico do conversor BOF

	Símbolo	Unidade	Descrição	Industrial	Modelo físico
Números adimensionais	Ma	#	Número de Mach	2,07	2,01
	Fr*	#	Froude modificado	0,0357	0,04616
	Re*	#	Reynolds modificado	7,19E+05	9,09E+04
	We*	#	Weber modificado	4,399E+03	2,076E+03

De acordo com Meidani et al.,⁽⁵⁾ se a viscosidade e tensão superficial forem negligenciadas, a penetração de jato pode ser expressa em termos da função do número adimensional de Froude, como apresentado abaixo:

$$\frac{P}{H} = f(Fr) \quad (5)$$

$$Fr = \frac{\rho_g \cdot \bar{V}_s^2 \cdot D_s^2}{\rho_l \cdot g \cdot H^3} \quad (6)$$

Onde “P” – Penetração, “H” – Distância da lança ao banho ou DBL, “Fr” – número adimensional de Froude, “ ρ_g ” – Densidade do gás; “ V_s ” – velocidade do gás na saída do bocal, “ D_s ” – Diâmetro da saída do bocal, “ ρ_l ” – Densidade do líquido, “g” – gravidade.

Para cada tipo de lança, um aumento no número de Froude implica em um aumento na penetração de jato. De acordo com esta análise teórica apresentada por Meidani et al.⁽⁵⁾ a penetração de jato pode ser expressa em termos do número de Froude modificado conforme equação (9).

$$Fr^* = \frac{2}{K^2} \frac{Pj}{H} \left(1 + \frac{Pj}{H} \right)^2 \quad (7)$$

Onde: “K” é uma constante empírica para cada tipo de lança.

Considerando que os bocais atuais são multifuros e com ângulos variados é necessário incorporar estas duas variáveis para determinação da penetração do jato a partir do balanço de energia. A equação (6) representa a equação energia considerando estas duas variáveis.⁽¹⁷⁻²⁰⁾

$$\frac{\pi \times \rho_g \times V_s^2 \times D_s^2 \times \cos \theta \times n}{4 \times \rho_l \times g \times H^3} = \frac{2}{K^2} \frac{P}{H} \left(1 + \frac{P}{H \times \cos \theta} \right)^2 \quad (8)$$

Onde “ θ ” – resultante do ângulo com a vertical e torção, “n” – número de furos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação do Cálculo de Momento para Ângulos de torção

O cálculo do balanço de energia foi feito utilizando a equação (8). As medidas de penetração foram realizadas através das filmagens de cada teste. As filmagens eram iniciadas com o banho estático, em seguida, liberava-se a vazão de teste, sendo filmado até o momento em que o banho apresentava um caráter monofásico devido à turbidez da água provocado pela mistura com ar. Depois era selecionada uma imagem que correspondesse a máxima penetração e então determinada a profundidade de penetração.

Na Figura 6, o eixo das abscissas representa as distâncias da lança ao banho utilizado nos experimentos e no eixo das ordenadas a coluna de líquido que corresponde à diferença da coluna inicial ou nível de banho estático subtraído do valor da penetração alcançada em cada ensaio. Os valores medidos (quadrado negro) foram obtidos através das filmagens dos ensaios. Nas ocasiões em que o jato tocou o fundo do convertedor, o valor da coluna de líquido foi considerado zero. Em

termos industriais, significa que, potencialmente o refratário do fundo do convertedor sofrerá desgastes prematuros. Em termos dos valores calculados, esta agressão ao refratário é atribuída aos valores negativos obtidos no gráfico. Para os bicos com Torção 0°, nas vazões de 160 Nm³/h e 130 Nm³/h ocorreu a incidência do jato sobre o fundo do convertedor para todas as alturas de lança (0,117 m – 0,180 m – 0,250 m). Apenas para a vazão de 100 Nm³/h e altura de 0,250 m foi observado que o jato não atinge o fundo do convertedor. Para este caso é importante ressaltar que os dois métodos empregado demonstraram valores aproximados da coluna de líquido.

TORÇÃO 0°

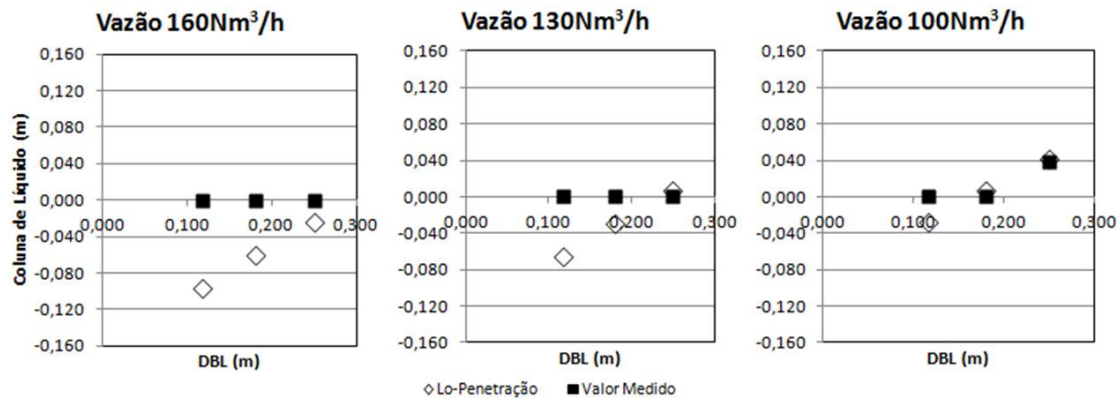


Figura 6 - Vazão x Penetração com o bico com Torção 0°.

TORÇÃO 10°

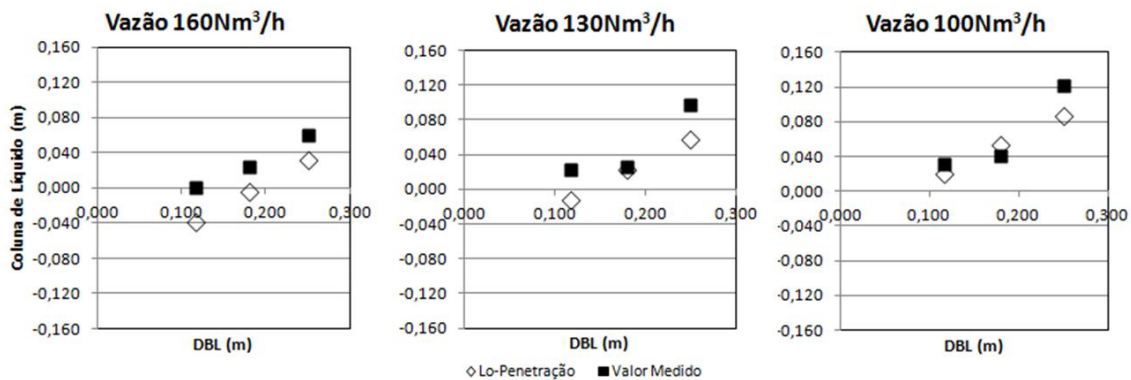


Figura 7 - Vazão x Penetração com o bico com Torção 10°.

Inserindo uma torção entre os jatos de 10° a penetração do jato foi reduzida. Observa-se na figura, uma correspondência entre os valores medidos e valores calculados, exceto quando o jato atinge o fundo do convertedor, notadamente para baixo valor de altura de lança e vazão elevada.

TORÇÃO 20°

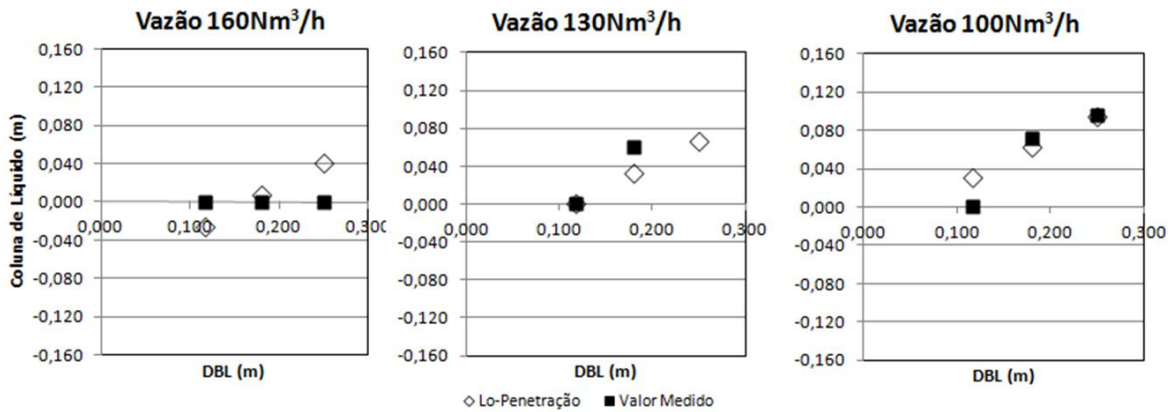


Figura 8 - Vazão x Penetração com o bico com Torção 20°.

Com o aumento da torça para 20° e nas vazões mais baixas (130 Nm³/h e 100 Nm³/h), ocorreu boa representação dos valores. O comportamento da vazão 160 Nm³/h para os valores medidos foi contrário ao esperado, pois em todas as circunstâncias o jato atingiu o fundo do convertedor.

A partir da equação (8) e para tipo de bico com torça foi gerado um gráfico correlacionando a penetração adimensional, termo do lado esquerdo da equação (8) com o número de Froude modificado, lado direito da equação (8), apresentados na Figura 9.

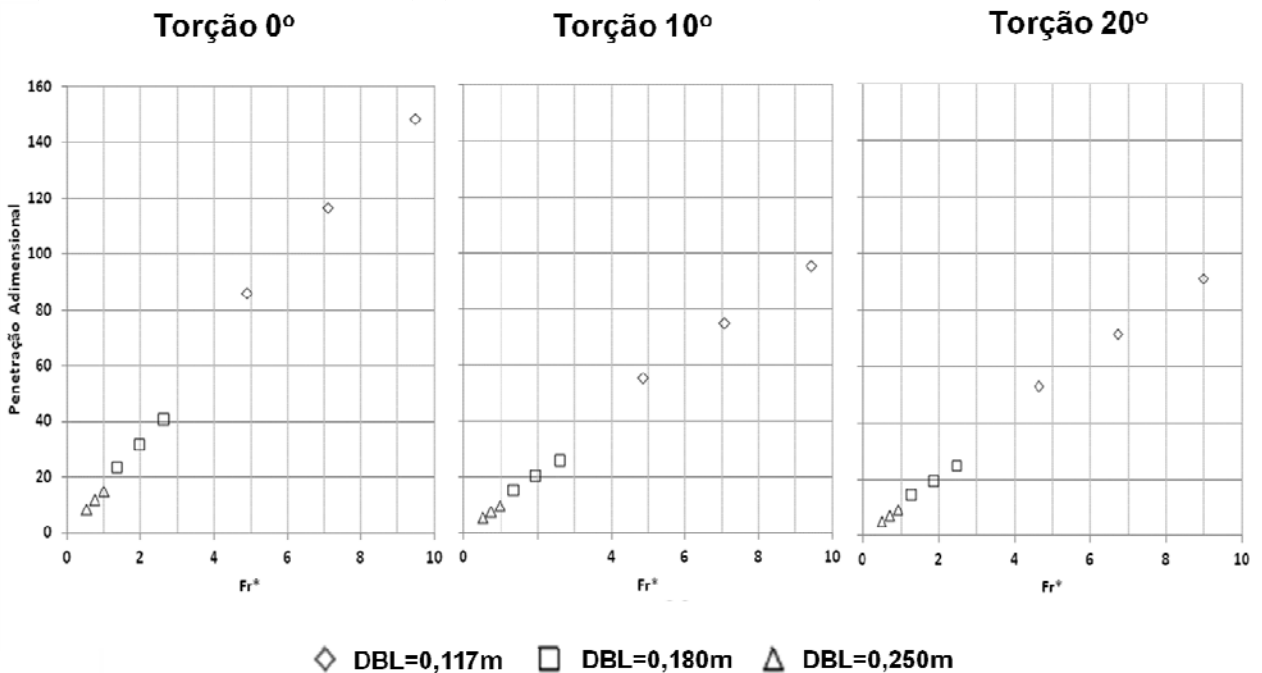


Figura 9 - Penetração de jato adimensional x Froude Modificado para várias alturas de lança e ângulos de torção.

Da Figura 9, é possível notar a tendência a uma reta e desta é possível calcular o valor da constante K da equação (8). O cálculo para determinação da inclinação reta foi feita utilizando o *software* gratuito *Eureka Formulize* apresentado os resultados na tabela abaixo:

Tabela 2 - Valor da constante K para diferentes ângulos de torção

Tipo de Bico	K	R²
Torção 0°	5,72	0.99627603
Torção 10°	4,63	0.99627503
Torção 20°	4,62	0.99627557

Os valores de K apresentado na tabela são próximos aos valores encontrado por Maia et al.⁽¹²⁾ em experimentos realizados utilizado um convertedor em escala 1:6 do reator industrial.

3.2 Avaliação do Cálculo de Momento para Ângulos com a Vertical

Seguindo o mesmo método utilizado para os testes com bicos com ângulo de torção, o cálculo do balanço de energia foi feito utilizando a equação (8) e os valores de penetração de jato obtidos a partir das imagens do escoamento antes da completa turbidez da água.

7° VERTICAL

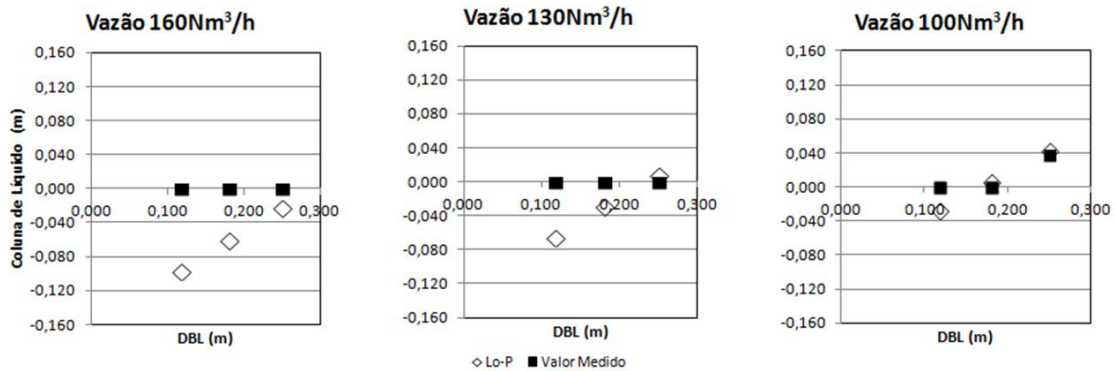


Figura 10 - Vazão x Penetração com o bico 7° com a vertical.

Para os ensaios com o bico 7° com a vertical, o pequeno ângulo direciona o jato para o fundo do convertedor, neste caso, somente quando ocorreu a redução da vazão (100 Nm³/h) e aumento da altura da lança (0,250 m) o jato não atingiu o fundo do convertedor.

12° VERTICAL

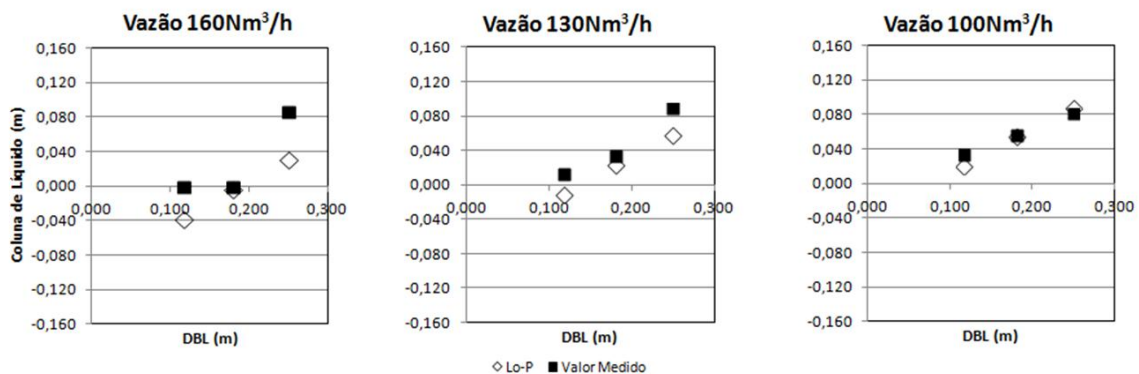


Figura 11 - Vazão x Penetração com o bico 12° com a vertical.

12° VERTICAL SUAVIZADO

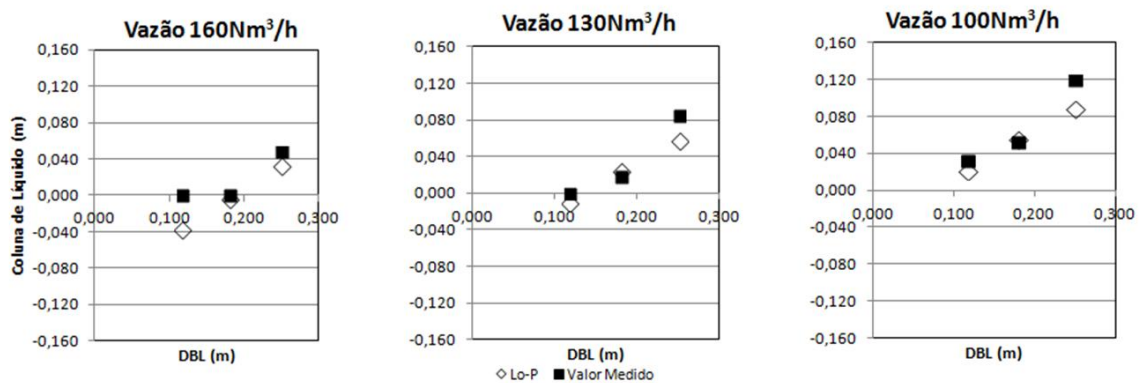


Figura 12 - Vazão x Penetração com o bico 12° com a vertical suavizado.

Na Figura 11 ensaios realizado com bicos com 12° com a vertical, o comportamento entre os valores calculados e valores medidos apresentaram uma boa coerência, indicando como esperado, que a medida que vazão é reduzida e altura de lança elevada, o jato reduz a sua penetração no banho. Para vazão de 160 Nm³/h e alturas de lança 0,117 m e 0,180 m o jato ainda incidiu sobre a sola do convertedor. Os cálculos para o bico 12° com a vertical e bocal suavizado são as mesmas para o bico 12° com a vertical, pois para o balanço de momento as variáveis de calculo são as mesmas. Porém os valores medidos apresentaram diferença, em geral inferior, ao 12° vertical. Este resultado é contrário ao esperado, segundo Maia⁽¹²⁾ sendo atribuída a dificuldade de precisão da usinagem em função da redução da escala. A partir da equação (8) foi gerado um gráfico correlacionando a penetração adimensional, com o número de Froude modificado apresentado na Figura 13.

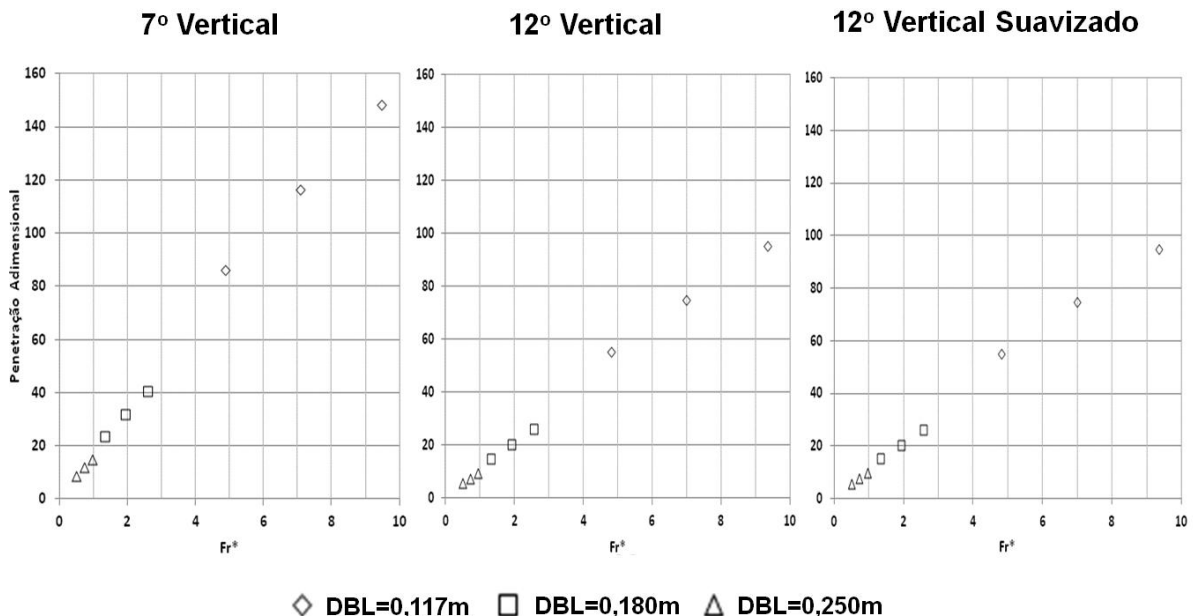


Figura 13 - Penetração de jato adimensional x Froude Modificado para várias alturas de lança, ângulos com a vertical e geometria suavizada.

O cálculo para determinação da inclinação reta, a constante K, foi feita utilizando o software gratuito *Eureka Formulize*. Os valores de K apresentado na Tabela 3 são

próximos aos valores encontrado por Maia et al.⁽¹²⁾ em experimentos realizados utilizando um convertedor em escala 1:6 do reator industrial.

Tabela 3 - Valor da constante K para diferentes ângulos com a vertical

Tipo de Bico	K	R²
Vertical 7°	5,72	0.99627603
Vertical 12°	4,63	0.99627582
Vertical 12° Suav.	4,62	0.99627582

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões sobre a penetração de jato são:

1. A redução da distância lança-banho aumenta a penetração de jato;
2. O bico normal alcança a sola do convertedor em todas as distâncias lança-banho;
3. O aumento da vazão e distância lança-banho forma o espalhamento de jato ajudando na emulsificação gás-água;
4. Bico com 20° de torção propicia jatos independentes e maior atomização no banho por jato.
5. Bico normal e com 10° de torção apresentaram coalescência de jato.

A penetração do jato é uma boa indicação da transferência do momento do jato para banho é podem ser uma excelente ferramenta para orientar alterações de padrões de altura de lança, vazão e configurações de bico na prática industrial. Neste sentido as principais conclusões são:

1. A comparação de valores de penetração de jato apresentou boa coerência;
2. A penetração de jato aumento com o aumento do número de Froude modificado;
3. Os valores da constante K encontrado tem coerência com outros trabalhos publicados;

O presente trabalho permite uma continuidade nas aciarias correlacionando alterações dos parâmetros apresentados e resposta das variáveis de processo, permitindo ajustes metalúrgicos no processo de refino do aço.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Minas Gerais pelas as dependências do Laboratório de Simulação de Processos e insumos para a realização dos ensaios e a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa continuada e apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Glass, D. R. and Smith, G.C., Nozzle Theory. In: BOF Steelmaking. Vol. III: Design. New York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, 1976. cap.8.
- 2 Glass, D. R. and Smith, G.C. – Nozzle theory. BOF Steelmaking, vol. I, New York,1974.
- 3 ODENTHAL, H. J., EMLING, W. H., KEMPKEN, J., SCHLUTER, J. Advantageous Numerical Simulation of the Converter Blowing Process. AISTECH 2007.
- 4 Mundim, M. J. – Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido, volume 2. ACIARIA LD, UFMG, 3ª edição, 1985 Belo horizonte.

- 5 Meidani, A. R. N., Isac, M., Richardson, A., Cameron, A., Guthrie, R. I. L. Modeling Shrouded Supersonic Jets in Metallurgical Reactor Vessels. *ISIJ International*, 2004, v.44, n.10, p. 1639-1645.
- 6 DIAZ-CRUZ, M., MORALES, R. D., OLIVARES, O., ELIAS, A. Physical and Mathematical Models of Gás-Liquid Dynamics in BOF Converters. 2002 Steelmaking Conference Proceedings. p737-748.
- 7 DIAZ, M. C., IIDA, T., KOMAROV, S. V., SANO, M., Mixing Characteristics under Gas Injection through Rotary Lance Submerged in Liquid Bath, *ISIJ International*, v.35, n.5, p464, 1995.
- 8 Yano, M. et al – Characteristics of Jets from Top-blown Lance in Converter. *ISIJ International*, vol 40, 2000, p 23-30.
- 9 SZEKELY, J.,THEMELIS, N. J., Rate Phenomena in Process Metallurgy. 1 ed. Montreal: John Wiley & Sons, 1971. 784p.CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 10 MAIA, B.T. e outros: Lança de Oxigênio. Curso de Aciaria a Oxigênio, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- 11 HIGUCHI, Y, TAGO, Y, Effecto of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, *ISIJ Interncional*, v.43, n.9 p1410, set.2003.
- 12 Maia, B. T., Alvarenga, J. A., Reis, R. F., Tavares, R. P. Effects of the use of Twisted Nozzles on Jet-Bath Interaction and on Mixing Time in a BOF Top Blow Converter. 6th European Oxygen Steelmaking Conference. Stockholm, 2011. P1 1-12.
- 13 Maia, B. T., Barros, J. E. M., Nascimento, L. M., Guerra, M. S. L., Tavares, R. P., Simulação Numérica do Sopro de Oxigênio através de Bocal Supersônico. *Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* v. 9, n.1, jan.-mar. 2012.
- 14 STASCHOWER, M., MOREIRA, J. R. S., Estudo Experimental de Escoamento de Gases em Bocais Convergente Divergente. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, 2002. (Iniciação Científica da Escola Politécnica de São Paulo).
- 15 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.417-435.
- 16 DEO, B., ASSIS, P. S. Process Dynamics of Oxygen Steelmaking. ABM – Course. Indian Institute of Technology – Kanpur. Escola de Minas: UFOP, 2006. 328p.
- 17 Alam, M., Irons, G., Brooks, G., Fontana, A., Naser, J., Inclined Jetting and Splashing in Electric Arc Furnace Steelmaking. *ISIJ International*, 2011, v.51, n.9, p. 1439-1447.
- 18 ALAM, M., NASER, J., BROOKS, G., FONTANA, A. Computational Fluid Dynamics Modeling of Supersonic Coherent Jets for Electric Arc Furnace Steelmaking Process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 41B, p.1354-1367. Dec. 2010.
- 19 ALAM, M., NASER, J., BROOKS, G., FONTANA, A. Computational Fluid Dynamics Simulation of Supersonic Oxygen Jet Behavior at Steelmaking Temperature *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 41B, p.636-645. Jun. 2010.
- 20 Smith, G.C. – Multiple Jet Oxygen Lances. Theoretical Analysis and Correlation with Practice. *Journal of Metals*, July 1966, p 846-851.