

EFEITO DE PARÂMETROS DE SOPRO NA PENETRAÇÃO DE JATO ATRAVÉS DE UM MODELO FÍSICO DE CONVERTEDOR BOF – PARTE 1¹

Breno Totti Maia²
Rafael Kajimoto Imagawa³
Clayton José Batista⁴
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 e seus efeitos. No presente trabalho, foi usadas lanças com quatro furos sem e com ângulo de torção entre os furos em um modelo a frio em escala com um convertedor. O nível de projeção de material também foi avaliado. Para bicos com quatro furos, o melhor resultado para reduzir o espalhamento foi obtido com bicos com torção, sopro duro e vazão elevada.

Palavras-chave: BOF; Bocais; Penetração de jato.

EFFECT OF BLOW PARAMETERS IN THE JET PENETRATION BY PHYSICAL MODEL OF BOF CONVERTER- PART 1

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 twisted, flow and lance height in the jet penetration. In the present work, lances with twisted nozzles angles, normal lances and special nozzle shape were used to describe the effects of jet on bath. Jet penetration and level of splashing were also available. For the four nozzles, the best result to reduce spitting was obtained at the twist angle, hard blow and high flow.

Key words: Converter; Lance; Nozzle; Jet; Splashing; Jet penetration.

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

² Eng. Metalurgista, Pesquisador da Lumar Metals, sócio ABM, Belo Horizonte, Brasil.

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

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

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

⁶ Eng. Metalurgista; sócio ABM; Professor Doutor do Depto. de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os convertedores BOF (*Basic Oxygen Furnace*) são reatores metalúrgicos de extrema eficiência provenientes de desenvolvimentos contínuos desde sua invenção em 1945, pelos austríacos em Linz e Donawitz. No entanto, a busca constante por otimizações de processo tornam o desafio contínuo em reduzir consumos e tempos operacionais, além maximizar ganhos metalúrgicos. Para atingir este objetivo torna-se fundamental a compreensão dos fenômenos que causa as movimentações do banho líquido no interior do convertedor e seus efeitos benéficos e deletérios para os objetivos de processo, como: tempo de sopro, taxa de descarburização, desfosforação, projeção de material metálico para fora do convertedor, desgaste do refratário etc.

Segundo Wakelin citado por Szekely e Themelis,⁽¹⁾ com o impacto do jato a camada da superfície move rapidamente em direção às paredes do vaso e penetra na maior parte do banho. Um vórtice é formado no banho pelo fluido retornado para o centro do vaso após defletir nas paredes. Uma região de fluido estagnado de forma cônica é encontrada no fundo do banho, abaixo da cavidade formada com o impacto do jato.

Díaz-Cruz et al.,⁽²⁾ descrevem que inicialmente a superfície do banho ondula pelo impacto do jato com curtos comprimentos de onda e uma penetração de jato bastante rasa. Logo em seguida a penetração de jato fica maior e o comprimento de onda do banho aumenta. Na sequência, o comprimento de onda aumenta o bastante para alcançar o diâmetro inteiro do vaso, produzindo uma rasa penetração. A simulação matemática prediz que não há uma profundidade de penetração de jato fixa, confirmando o observado no modelo físico por Maia,⁽³⁾ O revolvimento do gás é particularmente intenso na cratera de jato. Este fenômeno é observado na superfície gás-líquido quando os comprimentos de onda das ondulações de superfície são relativamente curtos. A intensidade deste processo de mistura diminui quando o comprimento de onda das superfícies de ondulações torna-se maior. Estes padrões de onda são cíclicos com o tempo. As alturas de lança têm grande influência na projeção de material, sendo possível identificar três distintas zonas de atuação. A primeira zona considerada de penetração, ocorrendo à formação de uma cratera funda. A segunda é chamada de zona de espalhamento (*splashing*) e a terceira e última zona segue um padrão de covas (*dimpling*), causado pela baixa transferência de impacto de gás para a fase líquida.

Outros autores⁽⁴⁻⁷⁾ observaram um mesmo padrão quando as condições de altura de lança, ângulo do bocal e vazão de gás eram fixados. Ondas propagadas radialmente para fora da cavidade eram refletidas na parede do modelo assim como foram observadas ondas viajando circunferencialmente ao redor externo da parede do modelo e refletidas nos limites do quadrante. Um esguicho (*gush*) descendente do fluido ocorre nas paredes do modelo em intervalos sincronizados regulares com uma onda interna com a cavidade. Este esguicho foi similar para o mecanismo de mergulho (*plunge*) da quebra das ondas. Bolhas entranhadas nos esguichos das paredes foram arrastadas para baixo no sentido da sola abaixo das juntas. Os padrões superficiais e subsuperficiais da vazão foram modificados especialmente pela variação dos parâmetros de altura de lança e ângulo do bocal. Todos os movimentos do banho foram gerados pela oscilação da cavidade. A primeira cavidade forma com máxima profundidade. Então, quando é alcançado esse máximo, a cavidade move-se para cima e para fora em direção das juntas, guiada pela ação do jato inclinado sobre a superfície do banho. Oscilações da cavidade

parecem refletir em ressonância com o jato. O deslocamento do líquido, à medida que aproxima da parede, reduz a profundidade das cavidades e próximo a altura do nível do banho estático apresenta dois comportamentos: uma contínua pluma pulverizada (*spray*) em direção parede e uma corrente partículas respingadas (*spatter*) na vertical e em direção ao centro do modelo. Entretanto, as dispersões nunca seguiram uma trajetória regular. A cavidade balança na direção radial com a superfície da onda em movimento. Este movimento de onda tende a “esfregar” o fluido acima e abaixo na parede do vaso (Figura 1). Este comportamento intermitente pode ser usado para explicar desgastes localizados nas juntas no interior do forno.

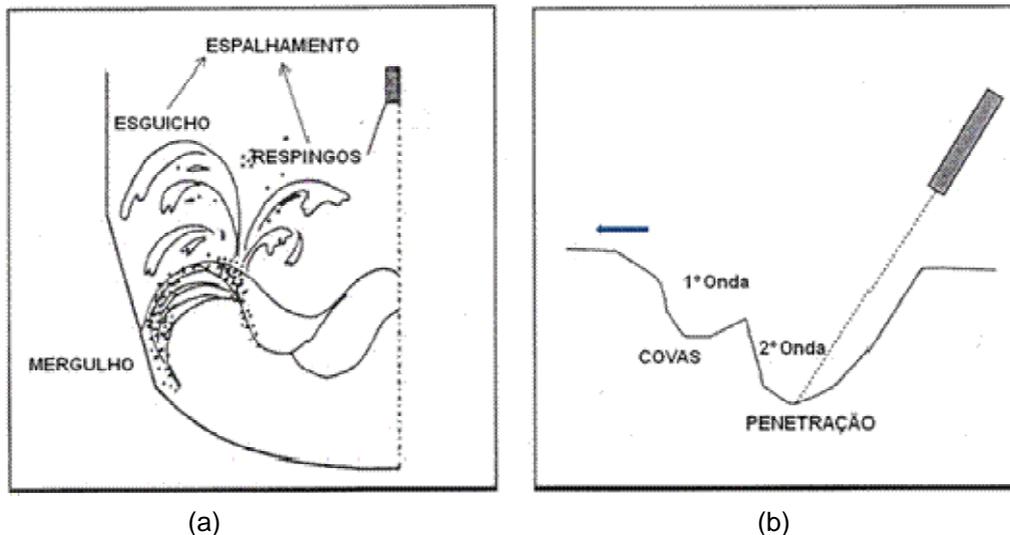


Figura 1. Representações do comportamento da interação jato-banho. (a) fluxo padrão; e (b) formação de cavidades sucessivas e sentido de deslocamento.⁽⁴⁾

Como a altura de lança, o ângulo do bocal tem influência na direção de projeção do banho líquido. Uma rápida inspeção geométrica entre altura de lança e ângulo de saída dos bocais permite uma primeira previsão da incidência de material incandescente (Figura 2).

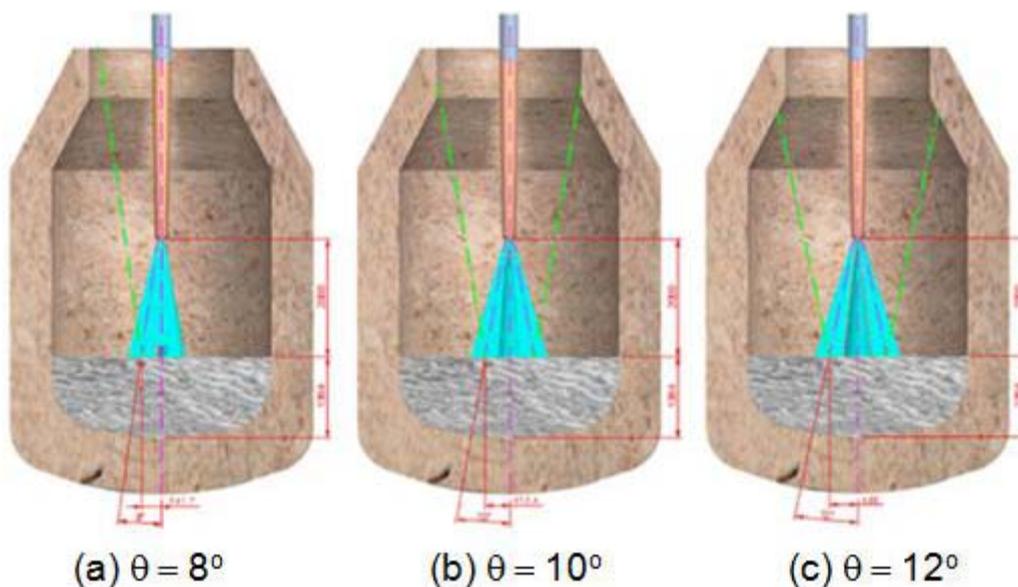


Figura 2. Influência do ângulo do bocal na projeção de partículas incandescentes.

Na Figura 2, considerando uma mesma altura de nível de banho metálico e uma mesma distância lança-banho, ou DBL, nota-se que para o caso (a) de 8° , a linha geométrica considerando uma reflexão total sobre o banho plano, incide a projeção para fora da boca do convertedor, em muitos casos, provocando obstrução no sistema de adição de fundentes ou comprometendo o desempenho do sistema de despoeiramento. No caso (b) com 10° , o aumento do ângulo direciona o material na região da boca do convertedor, sendo esperado um aumento na dificuldade de enforçamento de sucata e a necessidade de limpezas frequentes desta região e algum derramamento de material para fora do convertedor. No último caso, (c) com 12° , uma incidência mais interna ao convertedor, sendo necessário observar as condições da escória e sua influência no refratário.⁽⁸⁻⁹⁾

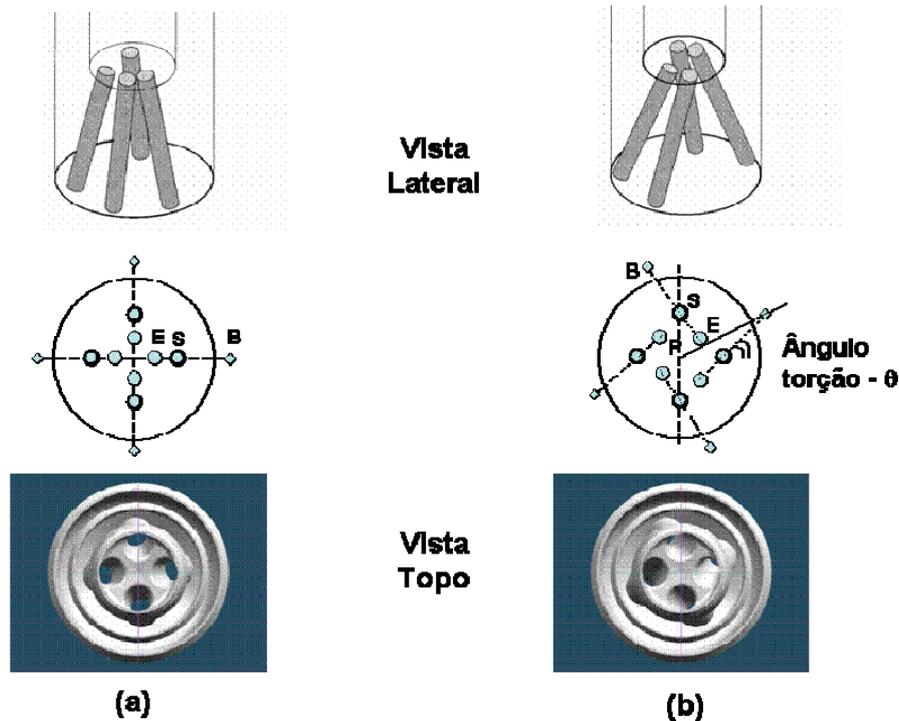
2 METODOLOGIA

Os experimentos foram feitos no modelo físico do Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP) da Escola de Engenharia da UFMG, usando água para simular o banho metálico e sopro de ar comprimido simulando o oxigênio dos convertedores industriais. O modelo físico em acrílico representa um convertedor de 220 toneladas de aço por corrida. O modelo em acrílico foi construído na escala de 1/8 em relação ao reator industrial. 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 22,5 kW, capaz de fornecer $7,87 \times 10^5$ Pa de pressão máxima e uma vazão máxima de $189 \text{ m}^3/\text{h}$. A Figura 3 apresenta vistas de topo e lateral com as diferenças entre os bicos.



Figura 3. Dimensões do modelo físico do convertedor BOF.

Os bicos de lanças usados na série de experimentos no convertedor BOF têm bocais com mesmos diâmetros de saída. A diferença entre os bicos está na inserção de um ângulo entre a posição da entrada convergente e a posição da saída divergente do gás, caracterizando o ângulo de torção.



Legenda
 ● Entrada convergente do gás - E
 ● Saída divergente do gás - S
 ◆ Projeção do jato com superfície do banho - B

Figura 4. Comparação entre (a) bico normal e (b) bico com torção.

Na Figura 4, a lança com ângulo de rotação 0° , corresponde ao bico normal (a). O bico com ângulo de torção (θ) é definido na Figura 4b. 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.⁽⁵⁾ 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 5.

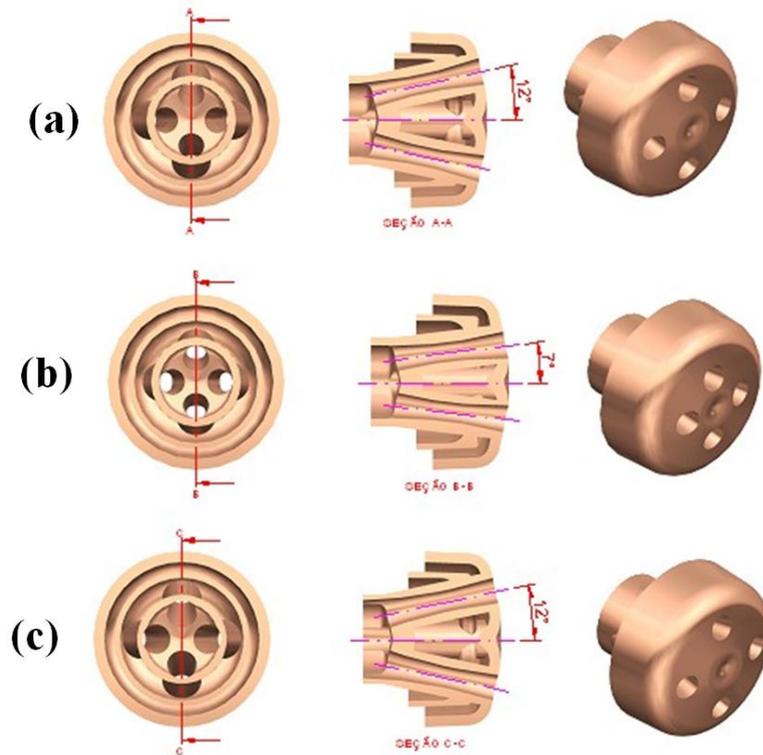


Figura 5. Comparação entre (a) bico normal com 12° em relação a vertical e (b) bico normal com 7° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

Nas Figuras 5a e 5b é possível notar o aumento do ângulo com relação à vertical com o afastamento dos bocais em relação aos outros. Na Figura 3c 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 6. Segundo Maia et al.,⁽¹⁰⁾ o trecho reto na região da garganta provoca queda na eficiência de transição das propriedades do gás e conseqüente perda na penetração do jato.

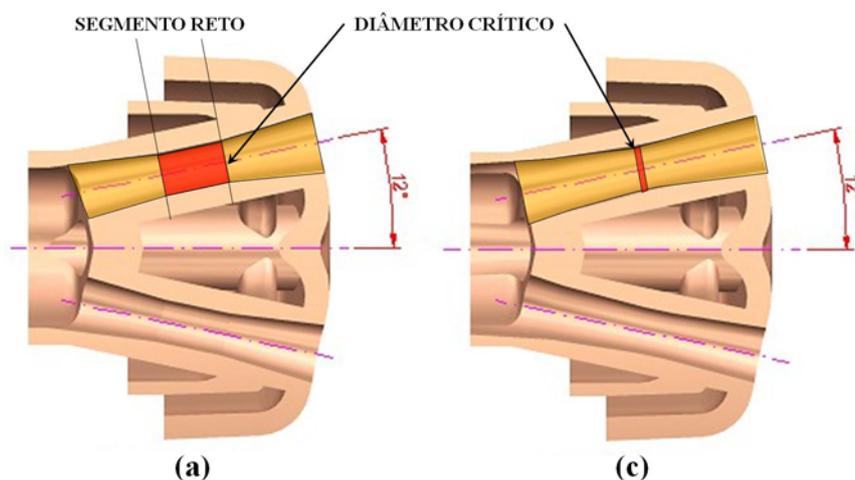


Figura 6. Detalhe da diferença construtiva entre: (a) bico normal com 12° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

A similaridade entre as velocidades do gás durante o sopro pode ser comprovada utilizando o número de Mach.⁽¹¹⁻¹³⁾ Segundo Meidani et al.,⁽¹⁴⁾ a profundidade de

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. A Tabela 1 apresenta uma comparação de valores entre os adimensionais com os parâmetros da indústria e os parâmetros do modelo físico a frio.

Tabela 1. Comparação entre números adimensionais no reator industrial e no modelo físico do convertedor 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

Com auxílio de uma filmadora foi realizado a filmagem dos ensaios. Serão discutidos qualitativamente os efeitos dos diferentes parâmetros no perfil de movimentação do banho e na profundidade de penetração do jato no banho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação Qualitativa da Profundidade de Penetração e Perfil de Movimentação do Banho

A avaliação da penetração do jato no banho e do perfil de mistura foi feita por meio de filmagens, extraídas de um conjunto de 27 imagens para o efeito de torção e 27 para efeito do ângulo de inclinação em relação a vertical e geometria do Laval, agrupadas por altura em cada grupo de nove imagens.

3.1.1 Avaliação do efeito da torção na penetração e movimentação do banho

A Figura 7 mostra imagens do convertedor com a altura de lança 0,117 m, comparando os efeitos de vazão e configuração de bico com torção.

Para todas as condições de vazão o bico com torção 0, aqui denominado de Torção 0° foi o que apresentou maior penetração, atingindo o fundo do convertedor. Na prática isto pode significar um aumento do desgaste na sola do convertedor LD. Essa condição corresponde ao sopro duro, onde a lança está muito próxima da superfície do banho.

O comportamento dos bicos Torção 10° e Torção 20° foram parecidos, principalmente influenciados pelo o aumento da vazão. Entretanto, há uma tendência dos bicos com torção produzirem jatos independentes, sendo este efeito mais pronunciado no Torção 20°.

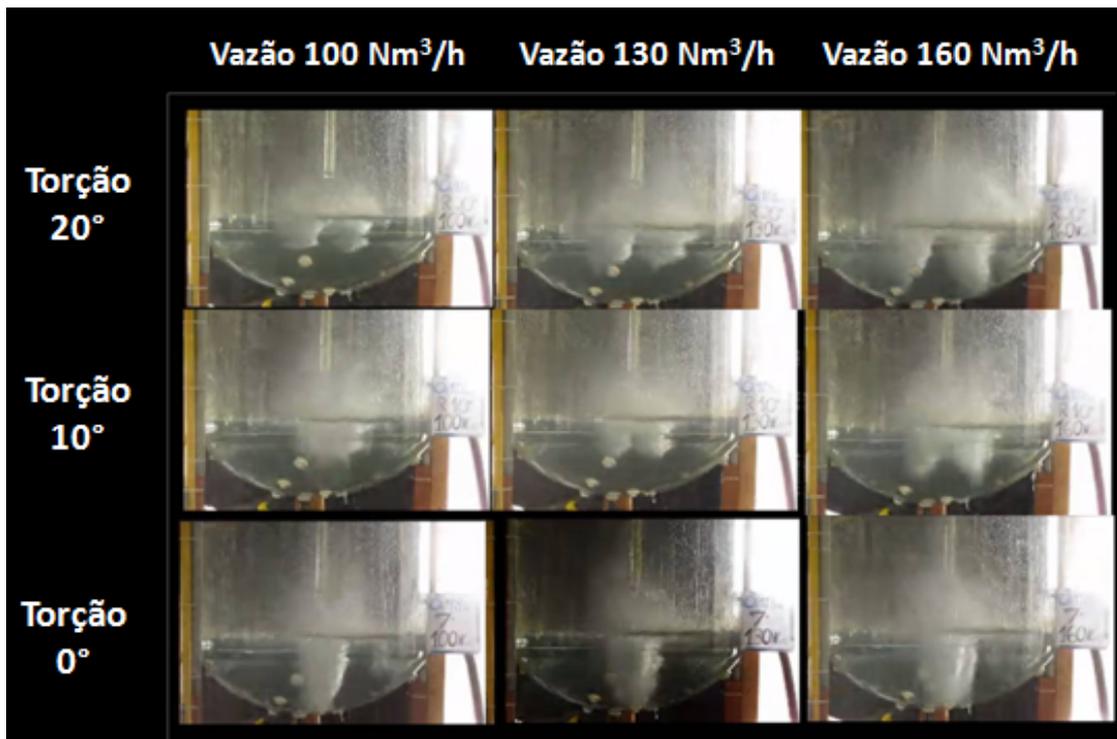


Figura 7. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,117m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com torção.

Para a altura de 0,18 m o bico Torção 0° para todas as vazões produziu jatos que tocaram no fundo do convertedor, sendo o de maior intensidade aquele com maior vazão. Novamente bicos com torção foi perceptível a independência entre os quatro jatos (Figura 8).

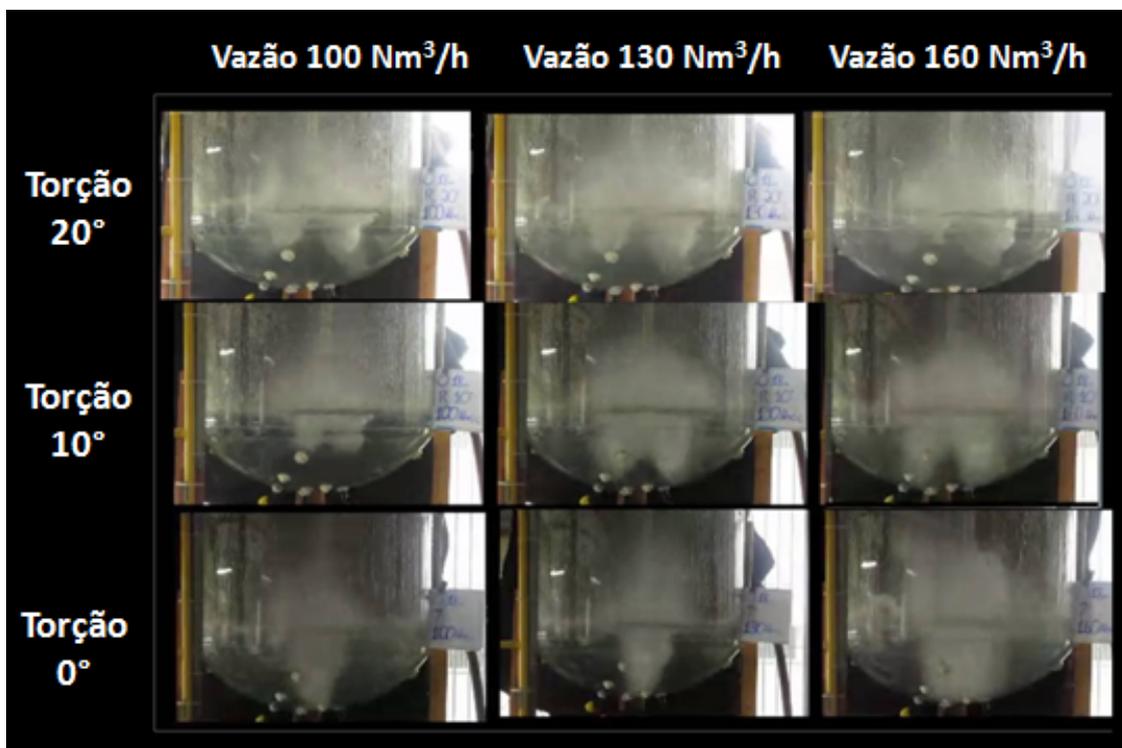


Figura 8. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,180 m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com torção.

Comparando a influência da altura de 0,117 m, representando um sopro duro, e sopro com 0,180, representando uma condição normal de operação, é possível notar a diferença provocada pela projeção do banho. Para os bicos com torção, o espalhamento de líquido acima do nível de banho estático para altura de 0,117 m é inferior quando comparado com a altura de 0,180 m. Para o bico Torção 0°, o efeito da coalescência de jato, aumenta a projeção do banho, incidindo principalmente no corpo da lança. As imagens também permitem concluir que jatos com maior poder de penetração, também propiciam uma menor tendência a projeção de material. Para os ensaios realizados com altura de 0,250 m apenas o bico sem torção apresentou jato capaz de tocar o fundo do convertedor. Os bicos Torção 10° e Torção 20° para as vazões de 100 Nm³/h e 130 Nm³/h apresentaram penetrações pequenas quando comparada com a outras alturas. Na prática essa configuração se assemelha ao início de sopro, onde a lança se encontra a uma distância maior do banho. Essa configuração seria ruim para descarbonização, porém produziria uma escória mais oxidada, sendo então favorável a fusão da sucata no início de sopro, dissolução da cal e a desfosforação do aço produzido.

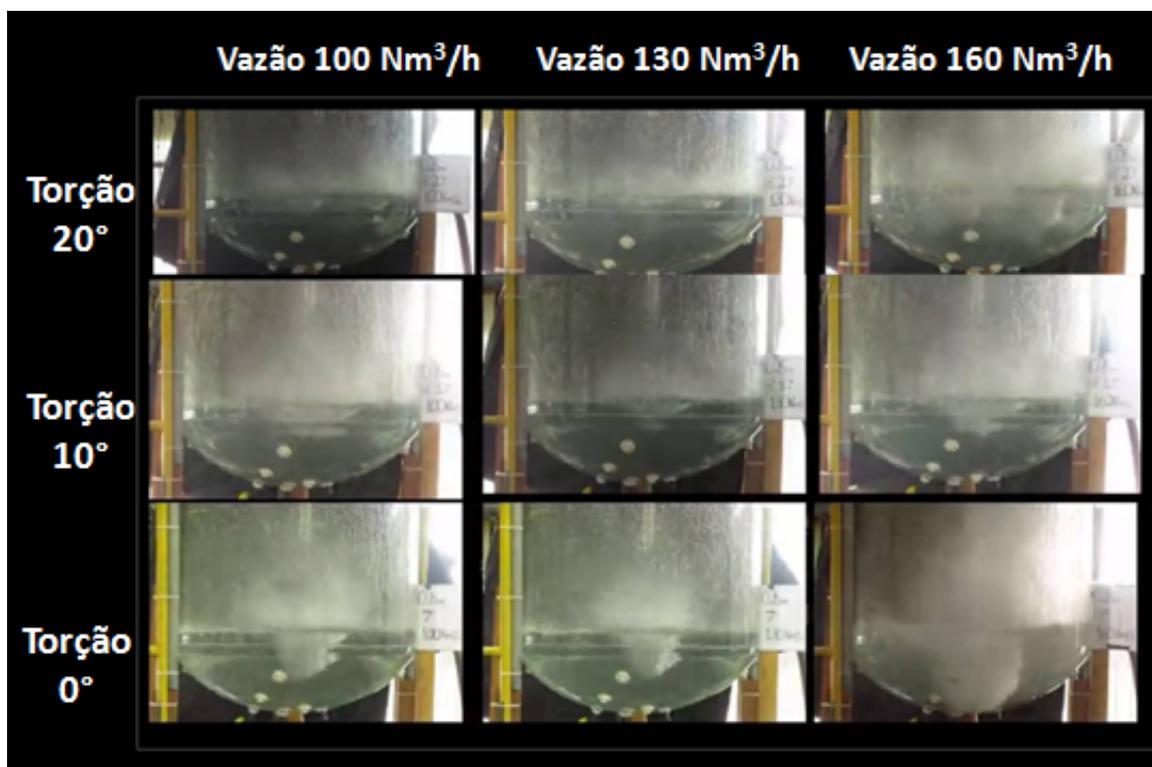


Figura 9. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,250m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com torção.

Como esperado, as maiores vazões produziram maiores penetrações, uma vez que os jatos com maiores velocidades tem energia cinética maior. O aumento da distância lança banho também evidencia o decaimento da velocidade do jato em relação à velocidade na saída do Laval. As configurações com as alturas mais baixas apresentaram maiores valores de penetração. Ambos resultados estão de acordo com a literatura. As configurações de bico com torção apresentaram efeito de *splash* mais bem distribuído e menos concentrado sobre a lança, tendendo a forçar o movimento do banho de encontro com as paredes do convertedor. A configuração sem torção apresentou *splash* concentrado sobre a região da lança e com maiores alcances de altura, na prática isso pode levar a formação mais frequente de cascão

na lança, sendo necessária parada do sopro para remoção. Cabe ressaltar que o efeito do uso de bicos com torção deve ser avaliado nas paredes do convertedor em relação ao desgaste de refratários.

3.1.2 Avaliação do ângulo da vertical e geometria do laval na penetração e movimentação do banho

A Figura 10, para altura de 0,117, mostra a penetração para os ensaios realizados variando o ângulo do bico em relação à vertical e geometria do Laval. O bico com ângulo de 7° apresentou coalescência de jatos, não sendo claramente perceptível o comportamento de jatos independentes. Para os bicos com maior abertura, 12° e geometria suavizada, percebe-se em uma mesma escala a tendência do "descolamento" dos quatro jatos com aumento do ângulo em relação a vertical. Para todas as configurações de bico o jato toca o fundo do convertedor, desde a vazão mais baixa até a mais alta.

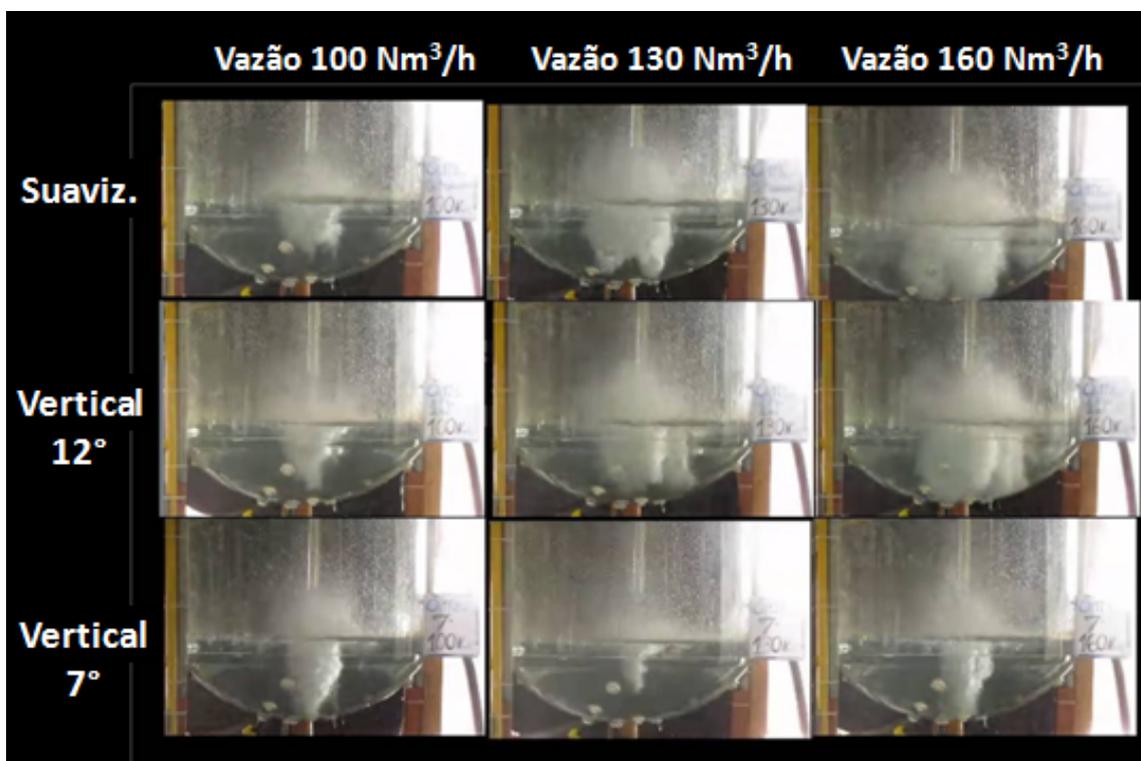


Figura 10. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,117 m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com ângulo em relação à vertical.

Os jatos dos ensaios realizados na altura de 0,180 m tocam o fundo para o bico de 7°, para os bicos de 12° e com geometria suavizada somente quando a vazão é máxima o jato tem energia suficiente para tocar a sola. Novamente para os bicos com 12° e geometria suavizada há a existência de jatos independentes, sendo que para a maior vazão o efeito é mais evidente (Figura 11). A névoa formada pode ser comparada às projeções ocasionadas pelo impacto do jato no metal líquido, concentra-se preferencialmente na região logo abaixo da lança, sendo essa névoa mais densa para maior vazão. Dessa forma, há indícios de que na prática industrial esses tipos de bico podem gerar maior volume de respingos na lança e consequente aumento de cascões. Essa análise deve ser feita com cuidado, uma vez que no modelo é representado apenas o comportamento da carga metálica líquida, sem ser considerado, no entanto o efeito da escória e temperatura na formação do cascão.

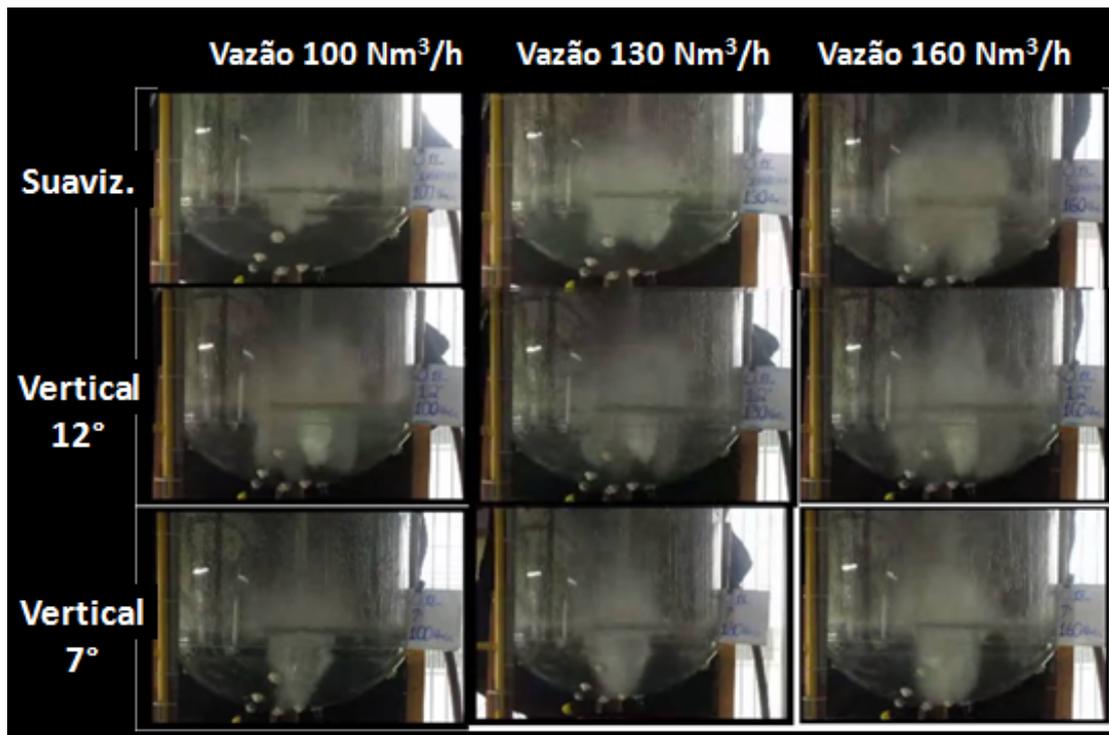


Figura 11. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,18 m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com ângulo em relação à vertical.

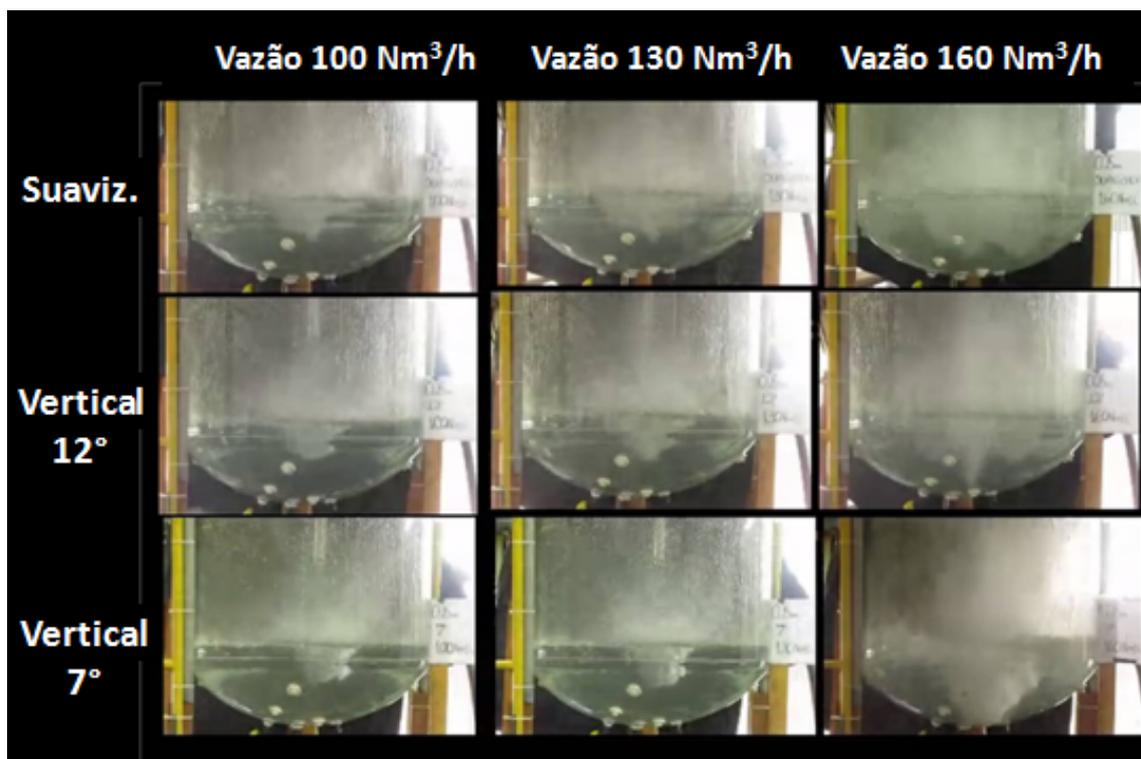


Figura 12. Imagens ilustrando a penetração de jato para a altura 0,25 m comparando efeitos de vazão e configuração de bico com ângulo em relação à vertical.

A altura de lança de 0,250 m apresentou menores penetrações do jato no banho, no entanto o jato do bico de 7° teve penetração no banho suficiente para tocar no fundo convertedor. Para a altura de 0,250 o efeito de independência de jatos foi menos pronunciado do que para alturas menores, nesse caso a interação com o meio

ambiente é determinante para o comportamento do jato. Entretanto com o aumento da altura de lança e aumento do ângulo com a vertical fica evidente o aumento da névoa acima da linha do banho estático, e em na maioria das imagens, cobrindo o corpo da lança.

Em resumo, o bico de lança com 7° em relação à vertical foi o que apresentou maiores valores de penetração, sendo que para todos os parâmetros de vazão e altura de lança foi capaz de tocar o fundo do convertedor, este bico também foi o que apresentou maior grau de coalescência de jatos e através das filmagens não foi possível distinguir quatro jatos em separado.

Todos os bicos apresentaram uma zona de névoa que, fazendo um paralelo com a prática industrial, corresponde às projeções do metal líquido quando em contato com o jato de oxigênio. Essa zona se apresentou mais dispersa e menos densa para os bicos com efeito de torção. Nos bicos sem torção, essa região se concentrou logo abaixo da lança e foi mais densa para maiores vazões. A presença das projeções concentradas na região central indicam que esses tipos de bicos podem ter como desvantagens o favorecimento da formação de cascão na lança durante o sopro.

Os bicos com torção, além de desconcentrarem os respingos da lança, promoveram uma agitação do banho no sentido das paredes do convertedor. Nesses bicos a formação de jatos independentes foi mais efetiva, apesar desse efeito ser observado em menor escala nos bicos 7° e geometria suavizada. Uma vez que os jatos são independentes há uma grande chance que a área da bacia de descarburacão seja maior e conseqüentemente mais eficiente para reduzir o tempo de descarburacão nos processos industriais.

Durante os experimentos após certo tempo de ensaio o banho adquiria movimento de rotação anti-horário. Este perfil de movimentação foi observado para todas as combinações de bicos, vazões e alturas. Nos ensaios com bicos Torção porém, esse perfil de movimentação foi alcançado com menor tempo.

A análise das filmagens permite observar um fenômeno interessante que ocorre quando há independência entre os jatos. Apesar de todos os bocais do bico estarem a um mesma pressão, o fato do escoamento do gás ser turbulento gera a alternância entre os jatos, que faz com que os jatos que atingem a superfície do banho ao mesmo tempo tenham energias diferentes. O escoamento de um jato interfere no comportamento dos demais, causando variações de penetrações ao longo do tempo. Essa alternância entre jatos pode ser comparada a pulsos cíclicos em que cada instante um bocal tem jato com maior energia cinética.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões sobre a penetração de jato são:

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

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 SZEKELY, J.,THEMELIS, N. J., *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. 1 ed. Montreal: John Wiley & Sons, 1971. 784p.
- 2 DIAZ-CRUZ, M., MORALES, R. D., OLIVARES, O., ELIAS, A. Physical and Mathematical Models of Gas-Liquid Dynamics in BOF Converters. 2002 Steelmaking Conference Proceedings. p737-748.
- 3 Maia, B. T. Efeito da Configuração do Bico da Lança na Interação Jato-Banho Metálico em Convertedor LD. Belo Horizonte, MG: CPGEM, 2007. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- 4 LEE, M. S., O'ROURKE, S. L., MOLLOY, N. A., Fluid Flow and Surface Waves in the BOF. *ISS Transactions*, p.56-65, oct.2002.
- 5 HIGUCHI, Y, TAGO, Y, Efecto of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, *ISIJ Internacional*, v.43, n.9 p1410, set.2003.
- 6 YANO, M. et al – Characteristics of Jets from Top-blown Lance in Converter. *ISIJ International*, vol 40, 2000, p 23-30.
- 7 LEE C. K. et al – Correlation of the decay characteristics of jets from multi-nozzle oxygen lances with the performance of the charge in steel converters. *Iron and Steel International*, June 1977, p 175 – 184.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 MAIA, B. T., BARROS, J. E. M., NASCIMENTO, L. M., GUERRA, M. S. L., TAVARES, R. P., Simulação Numérica do Sopros de Oxigênio através de Bocal Supersônico. *Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* v. 9, n.1, jan.-mar. 2012.
- 11 CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 12 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.417-435.
- 13 GLASS, D. R., SMITH, G.C., Nozzle Theory. In: BOF Steelmaking. Volume three: Design. New York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, 1976. cap.8.
- 14 MEIDANI, A. R. N., ISAC M.,RICHARDSON, A., CAMERON, A., GUTHRIE, R. I. L., Modelling Shrouded Supersonic Jets in Metallurgical Reactor Vessels, *ISIJ Internacional*, v.44, n.10, p.1639, out. 2004.