

EFEITO DO BICO COM TORÇÃO NA PENETRAÇÃO DE JATO ATRAVÉS DE UM MODELO FÍSICO DE CONVERTEDOR LD¹

Breno Totti Maia²
Jairo Átila Alvarenga³
Rafael Fernandes Reis⁴
Roberto Parreiras Tavares⁵

Resumo

É importante saber como o comportamento do banho metálico para ser possível implementar soluções que reduzam o tempo de sopro e projeções de material metálico e escória para fora do convertedor. O objetivo deste trabalho é comparar o efeito de bicos de lança com torção entre os furos, vazão e altura de lança na penetração de jato e seus efeitos na projeção. No presente trabalho, foi usado lanças com quatro furos sem e com ângulo de torção entre os furos em um modelo a frio em escala com um convertedor de 30 toneladas, usado para descrever os efeitos do jato no banho. A penetração de jato e nível de projeção de material também foi avaliada. Para bicos com quatro furos, o melhor resultado para reduzir o espalhamento foi obtido com bicos com torção de 20°, sopro e vazão elevada.

Palavras-chave: Convertedor; Lanças; Bicos de lança; Projeções; Penetração de jato.

EFFECT OF NOZZLE TWISTED IN THE JET PENETRATION BY PHYSICAL MODEL OF BOF CONVERTER

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, four nozzle lances with twisted nozzles angles and normal lances in a scale of 30 ton converter that was used to describe the effects of the jet on the 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 of twenty degrees, hard blow and high flow.

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

¹ Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil

² Sócio da ABM, Engenheiro Metalúrgico, Assessor de Processos Aciaria – Gerdau Barão de Cocais.

³ Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.

⁴ Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.

⁵ Sócio da ABM; Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.

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.

No Brasil, a estratégia das companhias foi aumentar a escala de produção ou aumentar o número de equipamentos, conforme pode ser visto na Tabela 1. Em alguns casos, aciarias de pequeno escala de produção encerraram suas atividades. A usina integrada da Gerdau Barão de Cocais possui uma pequena aciaria que produz aproximadamente 300 Mt por ano de tarugos, localizada numa região rica em minério de ferro, no meio do estado de Minas Gerais. Esta planta tem dois altos-fornos, um convertedor BOF de 30 t, um forno panela, um lingotamento contínuo com três veios e uma laminação barras leves e médias.

Tabela 1 – Comparativo das aciarias brasileiras a oxigênio.

Início de Operação	Localização	DADOS DO ANO DA INAUGURAÇÃO (Mundim, 1991)			DADOS DO ANO DE 2003 (Barão, 2004)		
		Empresa	Fornos (#)	Capacidade Anual (x1000 t)	Empresa	Fornos (#)	Capacidade Anual (x1000 t)
1957	João Monlevade - MG	Belgo-Mineira	2 x 100	1000	Belgo-Mineira	2 x 110	1140
1963	Belo Horizonte - MG	Mannesmann	2 x 70	750	Vallourec & Mannesmann	1 x 74	550
1963	Ipatinga - MG	USIMINAS	3 X 80	1600	USIMINAS	3 X 80	1843
1965	Piaçaguera - SP	COSIPA	2 x 85	1378			
1971	Barra Mansa - RJ	Barra Mansa	2 x 15	120			
1972	Timóteo - MG	ACESITA	1 X 35	245			
1973	Piaçaguera - SP	COSIPA	2 x 100	1622			
1975	Ipatinga - MG	USIMINAS	2 X 160	1800	USIMINAS	2 X 175	2687
1977	Volta Redonda - RJ	CSN	3 x 200	4600	CSN	3 X 225	5460
1979	Barão de Cocais - MG	Cimetal	1 x 18	200	GERDAU (Barão Cocais)	1 x 30	320
1979	Timóteo - MG	ACESITA	1 X 80	520	ACESITA	2 X 80	750
1983	Serra - ES	CST	2 x 280	3300	CST	2 X 315	4810
1986	Ouro Branco - MG	AÇOMINAS	2 X 200	2000	GERDAU AÇOMINAS	2 X 220	3050
1986	Piaçaguera - SP	COSIPA	2 x 130	1200	COSIPA	3 X 170	4100

A tática para permanecer no mercado, foi aumentar o peso da carga por corrida e reduzir ambos tempos de processo: tempo de sopro e tempos de processo. O primeiro trabalho foi para desenvolver o desempenho dos refratários com aumento de 68% no peso de aço vazado utilizando os mesmos equipamentos. O segundo passo foi reduzir os tempos de processo. Neste trabalho, o tempo de processo foi dividido nos seguintes em estágios: carregamento, amostragem, vazamento de aço e vazamento de escória. Dentro destes estágios outra divisão foi feita entre o tempo padrão, interrupções operacionais, elétricas e mecânicas. Esta segunda etapa provocou um aumento de 55% de disponibilidade de tempo para produção. O último trabalho foi reduzir o tempo de sopro.

O processo de sopro também foi modificado. Primeiro, o número de furos da lança foi aumento de três para quatro furos. Nesta mudança o tempo de sopro reduziu cerca de 10%, mas não foi suficiente para atingir os objetivos. Como consequência, a pressão da rede de oxigênio sofreu queda significativa impactando na vazão. Para resolver este problema, mudanças na linha de oxigênio foram feitas.

A universidade veio trazendo teoria e conhecimento para descrever os conceitos envolvendo jatos supersônicos a partir das equações de conservação de energia, balanço de massa e equações de estado aplicados em sistema estacionário. O comportamento dos elementos durante a corrida foi descrita por vários autores.⁽¹⁻³⁾

O conceito de lanças com torção é uma evolução, juntamente com outra tecnologia: os jatos coerentes.⁽⁴⁾ Este artigo pretende comparar lanças tradicionais e lanças com torção, devido a simplicidade de instalação e baixos custo de investimentos e seus resultados na penetração de jato e projeção de material metálico para fora do convertedor.

2 METODOLOGIA

2.1 Definição dos Equipamentos e Procedimentos Experimentais

O modelo a frio foi feito usando água para simular aço líquido e ar para simular oxigênio. Um vaso cilíndrico com a parte superior cônica foi feito em resina acrílica com um diâmetro interno de 0,460m e altura de 0,646 m.

O vaso cilíndrico foi enchido com água na mesma altura que caracteriza o nível do banho. O modelo a frio foi construindo na escala 1/6 de um convertedor de 30 t.

O ar comprimido foi produzido por compressor de 22,5 kW, com máxima pressão de $7,87 \times 10^5$ Pa e máxima vazão de gás de $189 \text{ m}^3/\text{h}$. O aparato do modelo a frio é apresentado na Figura 1.

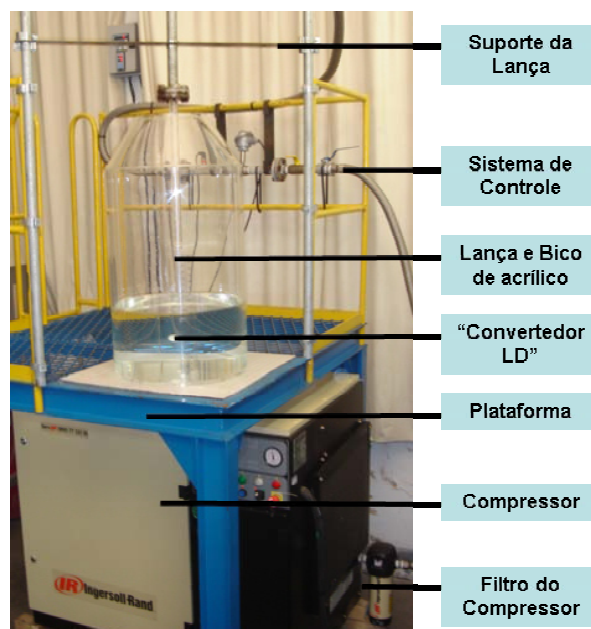


Figura 1: Aparato do modelo a frio do convertedor LD.

A vazão foi controlada por três válvulas: protetor do medidor de vazão, controladora do fluxo e descarga do compressor. O sistema de controle de vazão é apresentado na Figura 2.

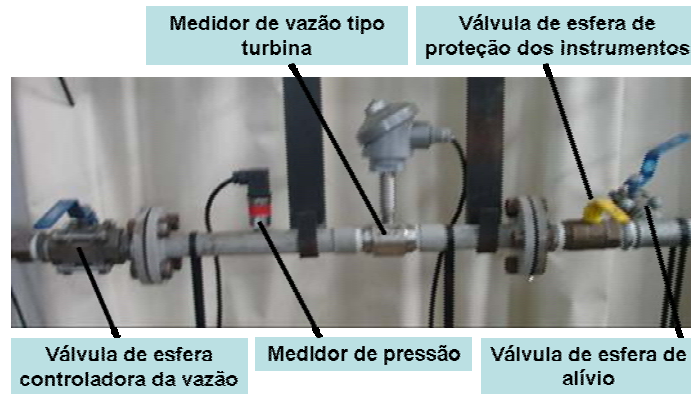


Figura 2: Sistema de controle de vazão.

2.2 Tipos de bico de lança

As lanças, normais e com torção, tem o mesmo ângulo de inclinação com a vertical e os mesmos diâmetros de garganta e saída. Os furos são fixos e a diferença na torção está entre o ângulo da entrada convergente e a saída divergente dos gás, como mostrado na Figura 3.

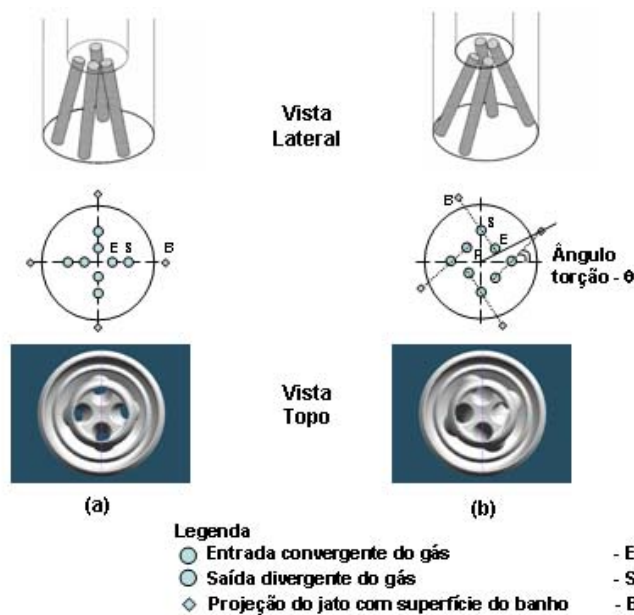


Figura 3: Comparação entre (a) bico norma e (b) bico com torção por Higuchi *et al*⁽³⁾.

2.3 Números adimensionais

Em outros experimentos^(4,5) foi descrito que os números adimensionais que melhor correlacionam as forças envolvidas e a penetração de jato são: Froude modificado, Reynolds modificado e Weber modificado. Estes adimensionais, principalmente o número de Froude, foram usados para comparar o processo industrial e modelo a frio, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2– Comparativo entre o processo industrial e modelo a frio.

Descrição	Símbolo	Unidade	Industrial	Modelo a Frio
Banho			Aço	Água
Densidade	ρ	kg/m ³	7048	1000
Viscosidade	ν	kg/m.s	0,0055	0,001
Tensão Superficial	σ	N/m	1,6000	0,0728
Gás			Oxigênio	Ar
Densidade T _O , P _O	ρ_O	kg/m ³	19,04	11,24
Viscosidade	ν	kg/m.s	2,03E-05	1,78E-05
Pressão Absoluta	P _O	Pa	1,47E+06	9,61E+05
Temperatura	T _O	K	298	298
Vaso				
Diâmetro	D _{conv}	m	2,762	0,460
Altura	H ^{real}	m	4,456	0,743
Altura do banho	H _b	m	1,336	0,223
Lança-Banho	H	m	1,000	0,534
Pressão Adimensional	P _{SAÍDA} /P _O	#	0,0738	0,1252
Número de Mach	Ma	#	2,35	2,01
Vazão Normalizada	Q _{TOTAL SAÍDA}	Nm ³ /h	7645	189
Froude modificado	Fr*	#	0,031	0,032
Reynolds modificado	Re*	#	3,112E+05	1,162E+05
Weber modificado	We*	#	1,695E+03	1,550E+03

2.4 Experimentos

O arranjo de experimentos foi feito com três réplicas em ordem aleatória com as distâncias lança-banho de 0,117m, 0,180m, 0,250m; vazões de 100, 130, 160Nm³/h e bicos com ângulos de torção 0°, 10° e 20°. Os dados foram processados pelo software estatístico “MINITAB”.

2.5 Avaliação da Área de Impacto

Foi usada uma câmera de vídeo para determinar a profundidade de penetração em comparação com nível do banho estático. O tempo foi padronizado, iniciando quando o banho está em repouso. As imagens foram processadas pelo software “Acrobat Premiere”, e foram agrupadas dentro de um arranjo relacionando ângulo de torção e distância lança-banho para cada vazão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Profundidade de Penetração de Jato

A profundidade de penetração de jato foi medida de duas formas: durante a primeira descarga do jato e na máxima penetração. A comparação foi feita num arranjo com nove figuras para vazão. A Figura 4 a comparação para vazão de 100Nm³/h.

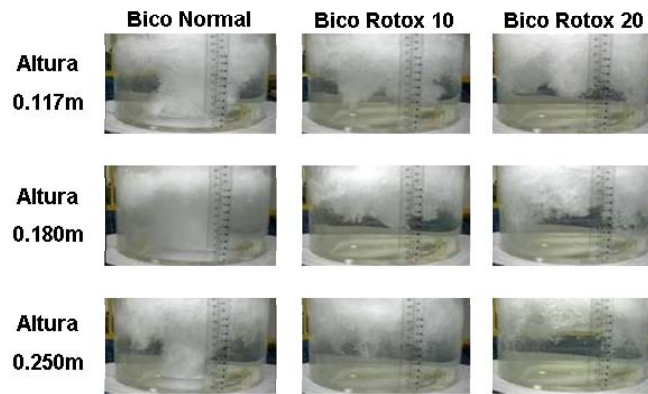


Figura 4: Imagens da penetração de jato para vazão de $100\text{Nm}^3/\text{h}$ comparando distância lança-banho e bicos.

Na Figura 4, o comportamento dos bicos com torção são os mesmos, com a redução da distância lança-banho, a penetração de jato aumenta. Entretanto, quando é comparado com a máxima penetração, todas os bicos alcançaram os mesmos valores.

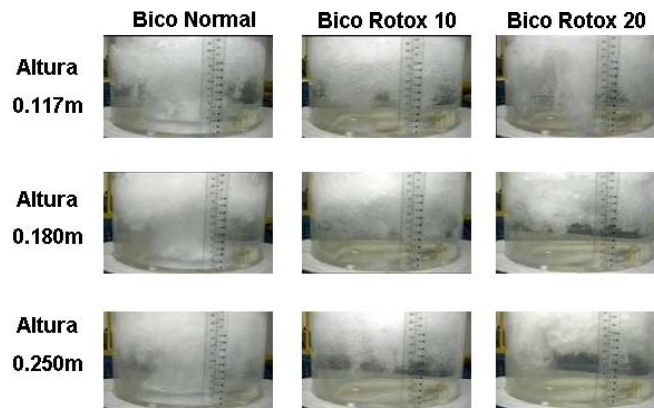


Figura 5: Imagens da penetração de jato para vazão de $130\text{Nm}^3/\text{h}$ comparando distância lança-banho e bicos.

O aumento da vazão e distância lança-banho provocou um aumento da área de espalhamento. No impacto, o jato interage com área do banho, e este oferece resistência, formando bolhas e área de contato superficial gás-água.

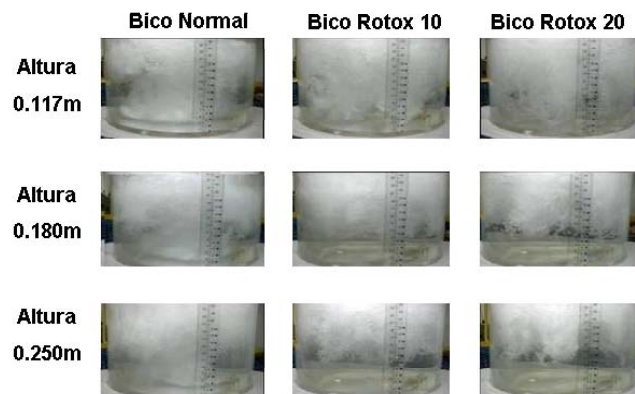


Figura 6: Imagens da penetração de jato para vazão de $160\text{Nm}^3/\text{h}$ comparando distância lança-banho e bicos.

Para vazão de $160\text{Nm}^3/\text{h}$ e distância lança-banho de $0,117\text{m}$ todos os bicos alcançaram o fundo. Lanças com torção apresentaram um aumento na área atomizada, contribuindo para rápida emulsão.

Para todas as vazões e distância lança-banho, o bico normal alcançou o fundo do convertedor.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam a penetração de jato durante a primeira descarga.

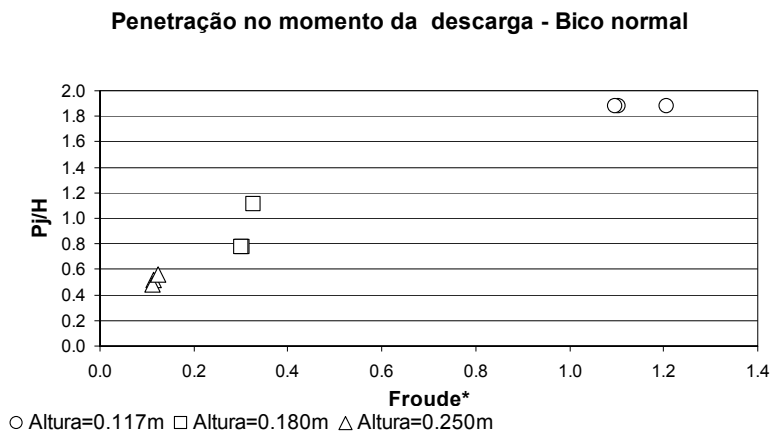


Figura 7: Penetração de jato para bico normal em todas as vazões durante a primeira descarga.

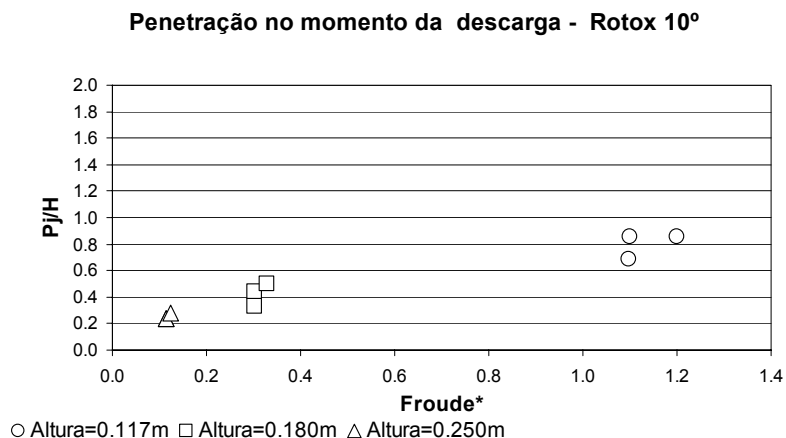


Figura 8: Penetração de jato para bico com 10° de torção em todas as vazões durante a primeira descarga.

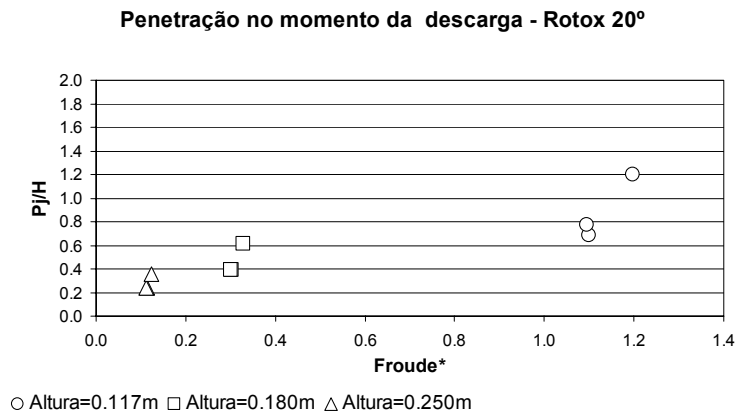


Figura 9: Penetração de jato para bico com 20° de torção em todas as vazões durante a primeira descarga.

A diferença entre os valores de mesma distância lança-banho foi em função da variação das vazões.

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as máximas penetrações de jato.

Para estas situações os bicos apresentaram a mesma máxima penetração de jato para os mesmos números de Froude modificado, principalmente para baixos valores de distância lança-banho. Quando a distância lança-banho aumenta, a penetração é reduzida para os bicos com torção.

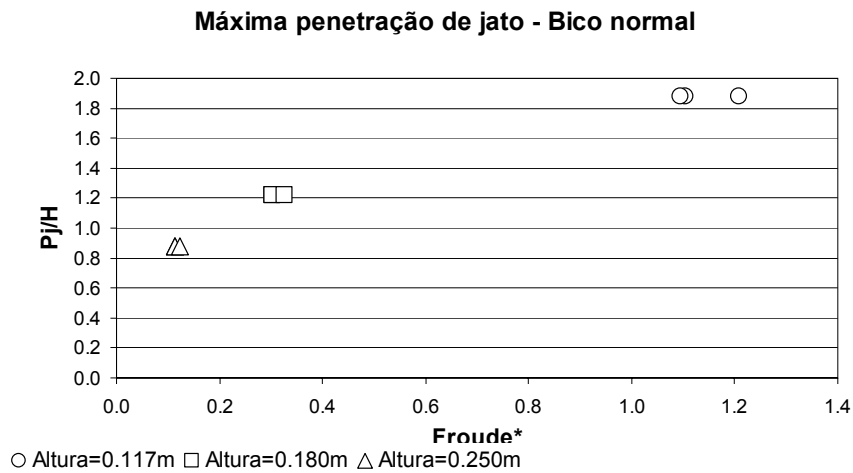


Figura 10: Penetração de jato para bico normal em todas as vazões durante a primeira descarga.

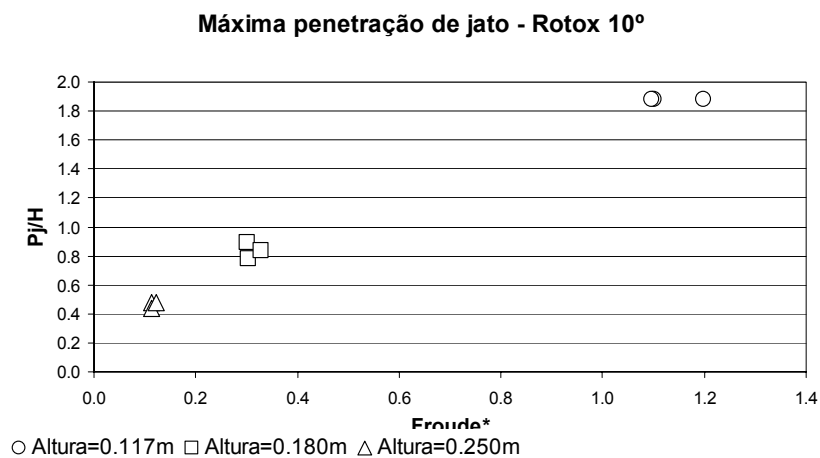


Figura 11: Penetração de jato para bico com 10° de torção em todas as vazões durante a primeira descarga.

Máxima penetração de jato - Rotox 20°

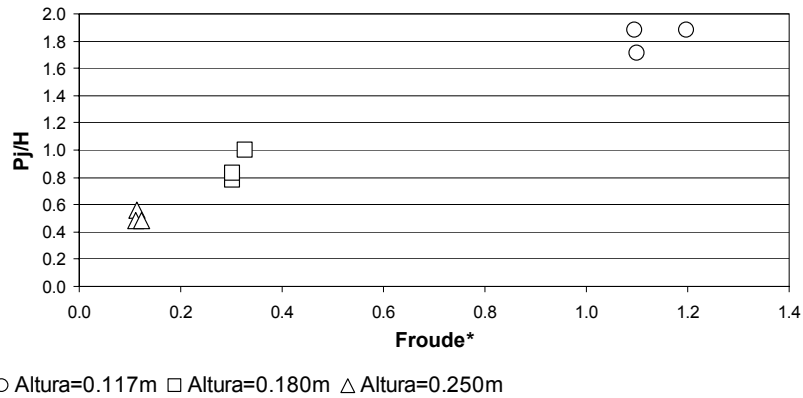


Figura 12: Penetração de jato para bico com 20° de torção em todas as vazões durante a primeira descarga.

É necessário separar duas situações nas medidas de penetração de jato. Primeiro, quando o jato atinge a sola do convertedor. Segundo quando o jato misturado alcança a sola do convertedor. A diferença entre estes dois casos é apresentado na Figura 13.

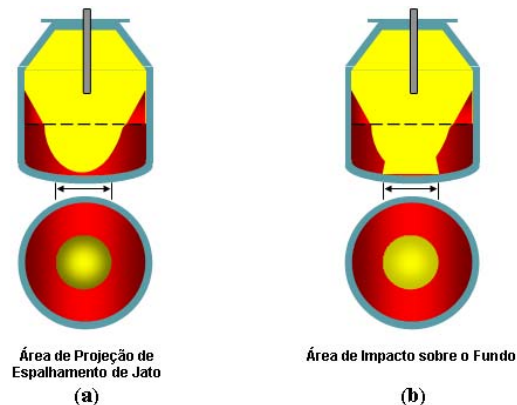


Figura 13: Casos da penetração de jato na sola do convertedor: (a) área de jato misturado próximo ao banho, (b) impacto de jato sobre a sola.

Com o objetivo de comparar as áreas, de impacto e mistura, imagens foram feitas da sola do convertedor e comparadas qualitativamente. Na figura 14 é apresentada um imagem para ilustrar a projeção do jato (área de impacto ou área de mistura) abaixo da sola do convertedor.



Figura 14: Imagem da sola do convertedor de acrílico.

Na Figura 15 é apresentado o projeção de jato sobre a sola do convertedor para uma vazão de $100\text{Nm}^3/\text{h}$.

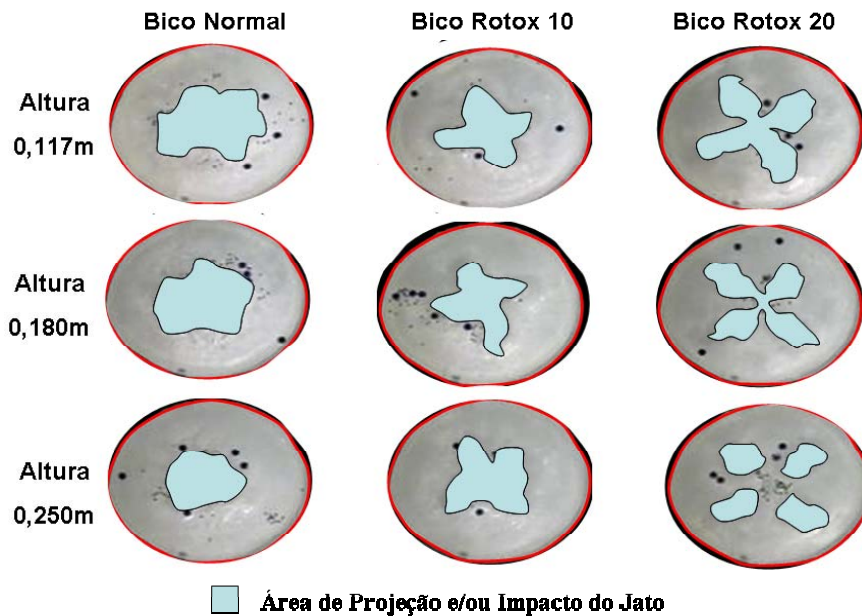


Figura 15: Projeção do jato sobre a sola do convertedor para vazão de $100\text{Nm}^3/\text{h}$.

Cada bico tem uma forma particular: próximo do circular para o bico normal, poligonal para bico de 10° de torção e com forma de estrela para bico de 20° de torção. As figuras foram capturadas quando o perfil de movimento já havia sido estabilizado. Desta forma, com aumento da distância lança-banho, existe a tendência de reduzir a projeção do jato.

Com aumento da vazão, a análise qualitativa apresenta o aumento da projeção de jato, conforme Figura 16. Os contornos de jato são mais irregulares devido a intensa circulação do banho.

Para a vazão de $160\text{Nm}^3/\text{h}$, novamente ocorre o aumento da projeção de jato sobre o fundo. O bico com torção de 20° é possível notar a união entre dois furos para a distância lança-banho de 0,117m, conforme a Figura 17.

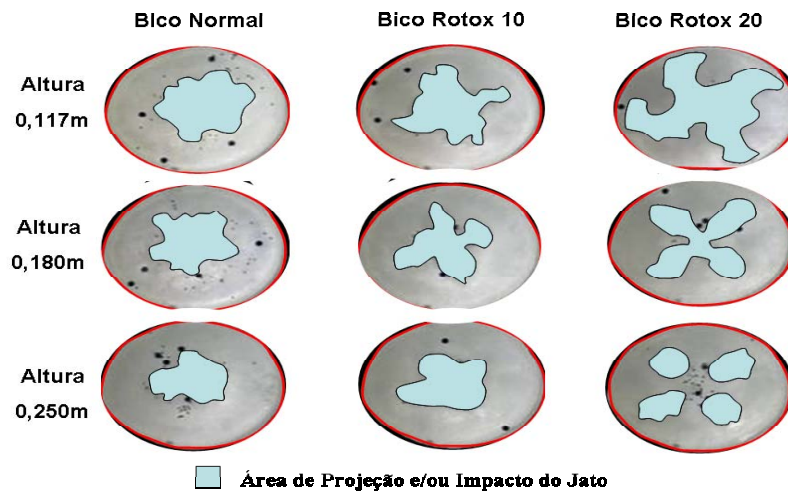


Figura 16: Projeção do jato sobre a sola do convertedor para vazão de $130\text{Nm}^3/\text{h}$.

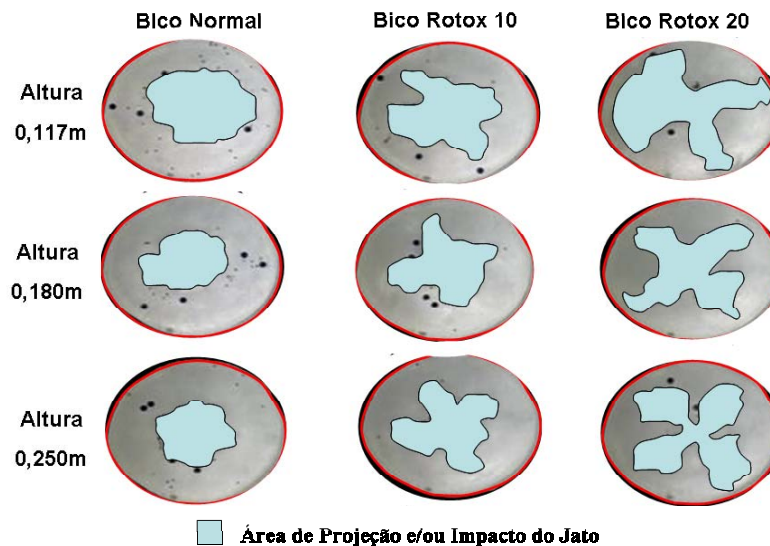


Figura 17: Projeção do jato sobre a sola do convertedor para vazão de $160\text{Nm}^3/\text{h}$.

4 CONCLUSÃO

A primeira tentativa para descrever o fenômeno do processo industrial de sopro de um convertedor de 30t foi feita por modelo físico. O trabalho passou por dificuldade para adquirir máquinas e equipamentos compatíveis que garantissem as condições impostas pelos números adimensionais.

Os experimentos foram montados e os procedimentos experimentais descritos. Novos procedimentos experimentais serão desenvolvidos e novos estudos planejados com os mesmos recursos transferidos da indústria para um centro de conhecimento, onde estudantes, professores e profissionais possam usar.

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 promove maior atomização no banho por jato. 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 o banho, mas para reduzir o tempo de sopro são necessárias mais informações sobre a área de impacto. As principais conclusões retiradas das imagens da sola do convertedor são:

1. Bicos com torção têm influência na forma da área de impacto;
2. O aumento da vazão aumenta a área de impacto;
3. Reduzindo a distância lança-banho, a área de impacto de jato aumenta.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos forneiros e sopradores da Gerdau Barão de Cocais pelo envolvimento com o trabalho durante os testes industriais para validação das conclusões retiradas deste trabalho e pela implantação dos novos bicos. Também agradece a Gerdau Barão de Cocais, representada pelo Engenheiro Metalurgista Sávio Cota Fonseca, pela oportunidade para o desenvolvimento contínuo do bolsista de graduação e colaboradores.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 DEO, B., ASSIS, P. S. Process Dynamics of Oxygen Steelmaking. ABM – Course. Indian Institute of Technology – Kanpur. Escola de Minas: UFOP, 2006. 328p.
- 3 VAN HOORN, A. I., KREYGER, P.J., KONYNENBURG J. T. Evolution of Slag Composition and Weight During the Blow. Research & Development Laboratories. Department Process Technology: Canada, 1976.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.