



## INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE TORÇÃO DOS BICOS DA LANÇA SOBRE A TAXA DE PROJEÇÃO EM CONVERTEDORES DE SOPRO COMBINADO<sup>1</sup>

Vitor Maggioni Gasparini<sup>2</sup>

Carlos Antonio da Silva<sup>3</sup>

Itavahn Alves da Silva<sup>4</sup>

Leandro Almeida<sup>5</sup>

Maíra Lois Rodrigues de Oliveira<sup>6</sup>

Augusto Pereira de Sá<sup>6</sup>

Varadarajan Seshadri<sup>7</sup>

Leandro Rocha Lemos<sup>8</sup>

### Resumo

Através de modelagem física, são apresentados os efeitos da altura e ângulo de torção dos furos da lança, da vazão de sopro de oxigênio, da inclinação das ventaneiras e da vazão de gás inerte pelo fundo do convertedor, sobre a taxa de projeção de metal em um convertedor de sopro combinado. Os resultados alcançados mostraram grande influência do ângulo de torção sobre a taxa de projeção, sendo que o ângulo de 10° provocou menor taxa de projeção. Dentre os parâmetros operacionais, a vazão pela lança e a distância lança-banho são os que mais influenciam o fenômeno de projeção, sendo que o sopro duro (menor distância lança-banho) e vazões altas pela lança provocam maior intensidade de projeção.

**Palavras-chave:** Projeção; Convertedor LD; Bico da lança; Sopro combinado.

### INFLUENCE OF TWISTING THE NOZZLE OF THE OXYGEN LANCE ON THE SPLASHING RATE INSIDE A COMBINED BLOW CONVERTER

### Abstract

Data from physical modeling is used to present the effects of lance to bath distance, the twisting angle of the oxygen lance nozzles, the rate of oxygen blowing, the bottom tuyere's angle and the rate of inert gas injection through the bottom tuyeres on the metal splashing rate. The results show great influence of twisting angle on the splashing rate and the angle of 10° resulted in a lower splashing rate. Among the operating parameters, top gas flow rate and lance to bath distance are the most influential on the splashing phenomenon, with the hard blow (lower distance lance-bath) and higher gas flow rates causing more splashing intensity.

**Key words:** Splashing; LD converter; Lance tip; Combined blowing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat / UFOP.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Ph.D, Professor da Universidade Federal de Ouro Preto.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Ds.C., Professor da Universidade Federal de Ouro Preto.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalúrgico, MSc., V&M do Brasil.

<sup>6</sup> Alunos graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP.

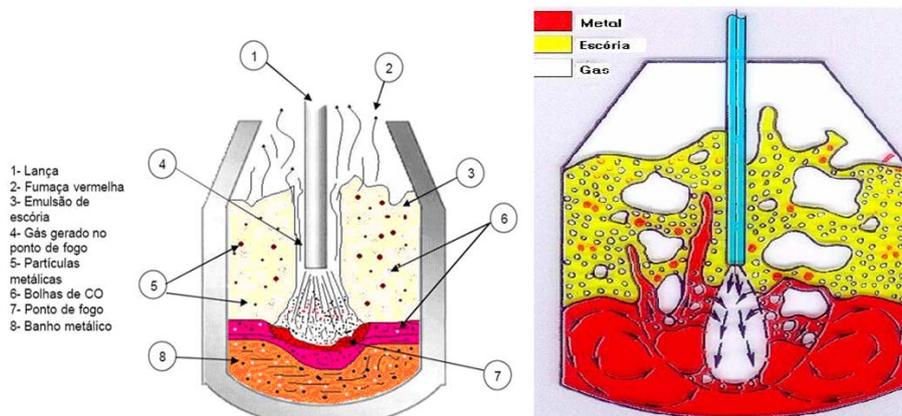
<sup>7</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr. Ing., Professor da Universidade Federal de Minas Gerais.

<sup>8</sup> Engenheiro Metalúrgico, Professor do Instituto Federal Minas Gerais, Mestrando Redemat/UFOP.



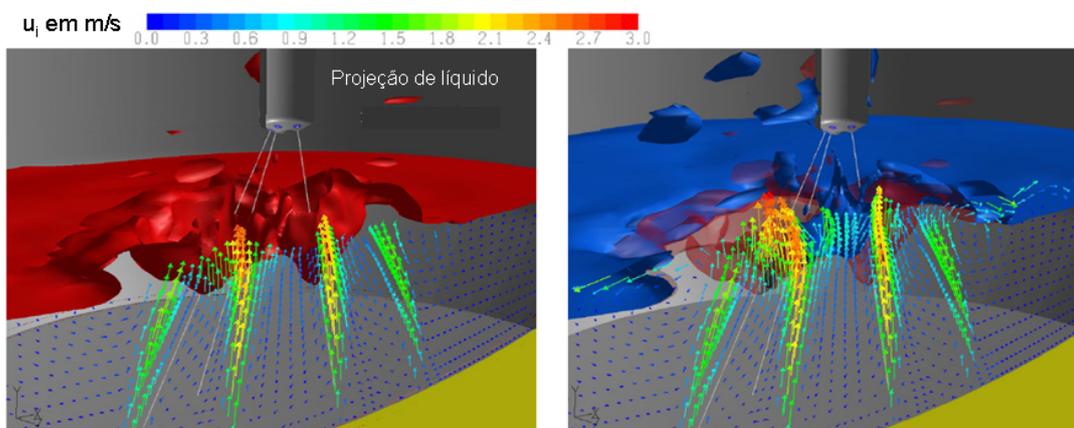
## 1 INTRODUÇÃO

A eficiência metalúrgica dos convertedores do tipo LD – descarbonação, dissolução de fundentes, dissolução de ligas e de refrigerantes – é afetada severamente pelos fenômenos de emulsificação, espumação e projeção de líquido. Estes fenômenos, Figura 1, são funções complexas de variáveis e condições operacionais, tais como: composição, temperatura e volume de metal e escória; altura, número e inclinação dos furos da lança; velocidade de sopro de oxigênio; número, disposição e inclinação das ventaneiras e vazão de gás inerte pelo fundo do reator. Outros eventos, tais como: formação de cascão, desgaste do revestimento refratário, especialmente na linha de escória e a liberação de fumaça vermelha; são também influenciados pelos mesmos parâmetros.



**Figura 1.** Características da distribuição de fases durante a operação de sopro de oxigênio no convertidor (emulsão metal-gás-escória).<sup>(1)</sup>

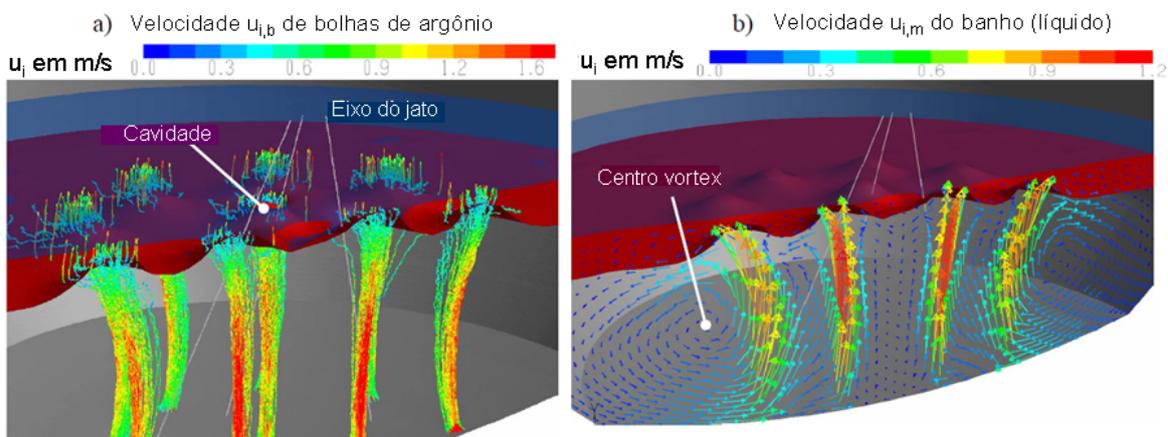
As características de sopro de oxigênio e borbulhamento de gás inerte pelo fundo do reator de sopro combinado afetam diversos parâmetros, tais como: penetração do jato supersônico de oxigênio; distribuição de temperatura; movimentação das interfaces metal-escória, escória-gás e metal-gás e taxas de transferência de massa e de calor. O jato de oxigênio (Figura 2), constitui-se no principal responsável por diversos fenômenos: oxidação, descarbonação, espumação, emulsificação, projeções e transbordamento de líquidos; desenvolvimento de cascões, oscilação do convertidor e ruídos.



**Figura 2.** Jato de oxigênio: Frações volumétricas de fases e velocidades instantâneas em um reator de sopro combinado, simulação via CFD.<sup>(2)</sup>



Silva<sup>(3)</sup> aponta que o aumento da taxa de descarburização do aço e, conseqüente aumento de produtividade não pode ser conseguido simplesmente pelo aumento da vazão de oxigênio: existe um limite superior ditado pelo aumento da taxa de projeção, o qual provoca formação de cascão na boca do convertedor, transbordamento da emulsão metal-gás-escória e perda de rendimento metálico. No caso de BOF com sopro combinado, o aumento da energia de agitação do banho é feito pelo borbulhamento de gás inerte pela base do convertedor (Figura 3). Esse processo além de proporcionar aumento de produtividade, evita oxidação excessiva do banho metálico; uma vez que requer menor volume de oxigênio soprado pelo topo. A movimentação e presença de bolhas de gás inerte, no banho metálico, por sua vez, estimulam os mecanismos de recirculação e misturamento, beneficiando os processos de transferência de massa e de calor e, conseqüentemente, as cinéticas das reações químicas passíveis de ocorrência.



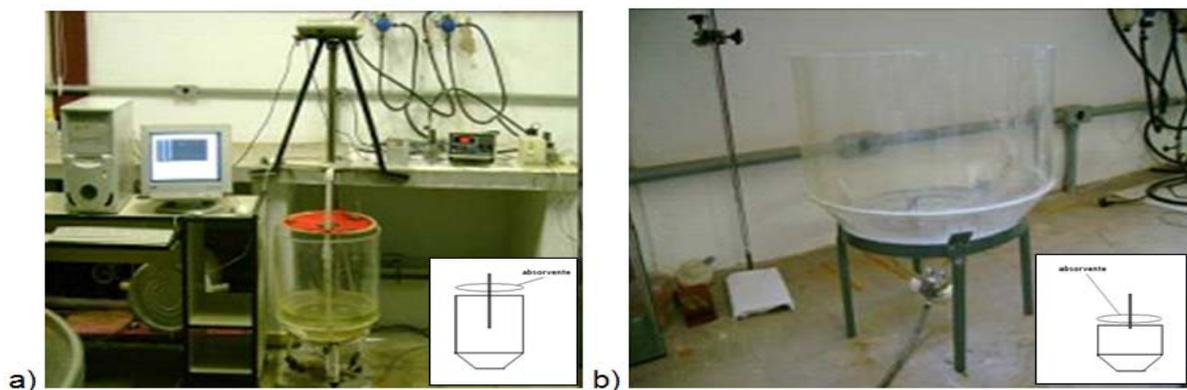
**Figura 3.** Comportamento fluidodinâmico induzido pelo borbulhamento de gás inerte (sopro combinado), simulação via CFD.<sup>(2)</sup>

Os efeitos da vazão de sopro, tipo e geometria de lança, número de ventaneiras, vazão de gás inerte pelo fundo sobre o comportamento fluidodinâmico no convertedor do tipo LD têm sido estudados por: Higuchi e Tago,<sup>(4)</sup> Luomola, Fabritius e Harkki,<sup>(5)</sup> Luomala et al.,<sup>(6)</sup> e Seshadri et al.,<sup>(7)</sup> via modelagem física.

Este trabalho aborda, via modelagem física baseada em dados operacionais relativos ao convertedor da V&M do Brasil, um destes aspectos: taxa de projeção.

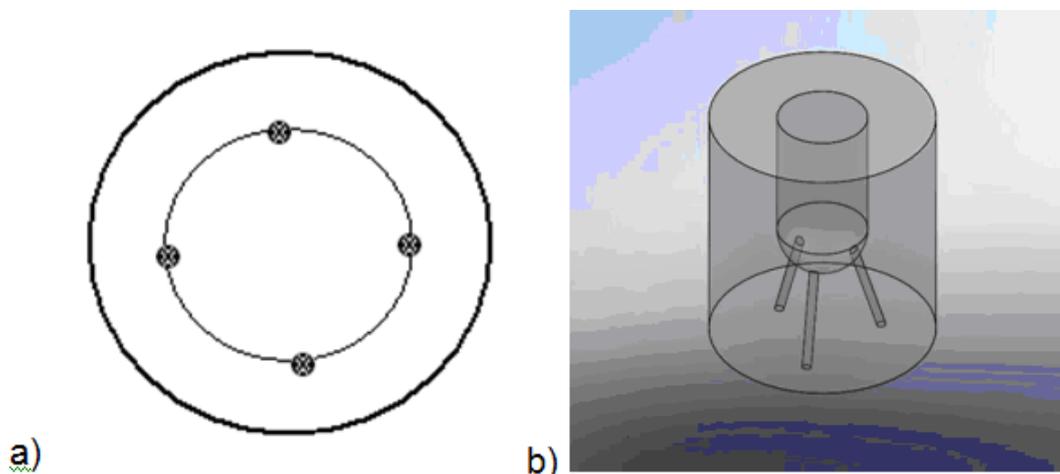
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo físico construído em acrílico, na escala de 1:10, do convertedor LD da V&M do Brasil, com capacidade de 75 toneladas de aço (volume útil de 59,2 m<sup>3</sup>) foi utilizado para a condução dos experimentos. A técnica de determinação da taxa de projeção consistia basicamente em medir a taxa de acumulação de água, absorvida por uma peça de feltro colocada sobre o modelo do reator (Figura 4), a qual era medida continuamente por uma balança digital ligada via porta serial a um computador. Maiores detalhes da técnica e as considerações quanto à semelhança entre modelo e reator industrial podem ser encontrados em Gasparini<sup>(8)</sup> e Gasparini et al.<sup>(9)</sup>



**Figura 4.** Vista do modelo físico do convertidor da V&M do Brasil, Laboratório de Pirometalurgia do Demet/UFOP: a) Modelo longo, altura de 37cm; b) Modelo curto, altura de 24cm.

A Figura 5 ilustra a configuração original das ventaneiras situadas no fundo do reator e do bico da lança de sopro de oxigênio.



**Figura 5.** a) Configuração esquemática das ventaneiras na base do convertidor LD; b) Configuração esquemática do bico da lança.

Para a investigação do fenômeno de projeções de líquidos, foram utilizadas duas situações de coleta das gotas projetadas. Em uma condição, utilizou-se o modelo de maior altura lateral – modelo longo (feltro mais distante da superfície da água), simulando projeção para fora do vaso. E, em uma segunda situação, utilizou-se o modelo de altura lateral menor – modelo curto (feltro mais próximo da superfície da água), simulando projeção na parede do vaso e condições de baixas taxas de projeção de líquidos. O modelo curto foi utilizado apenas nos testes com ventaneiras inclinadas na posição P2 (Figura 6).

A Figura 6 mostra a vista lateral das diferentes inclinações das ventaneiras, sendo “P1” referente à posição normal (90° em relação ao fundo do vaso) e “P2” inclinada 60° em relação ao fundo do vaso no sentido horário. Estas mesmas inclinações podem ser observadas pelo topo na Figura 7. Os ângulos de torção dos furos do bico da lança de sopro de oxigênio utilizados nos testes foram 0, 10° e 20°, conforme mostrado na Figura 8.

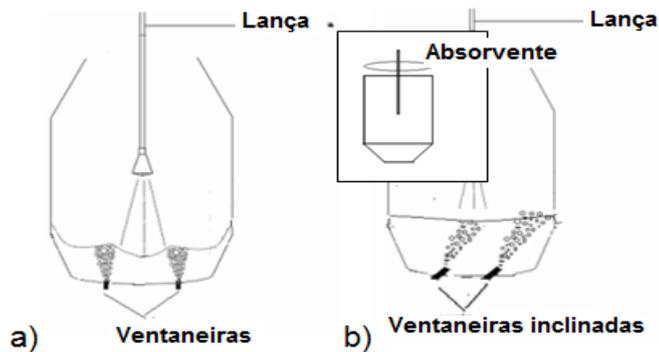


Figura 6. Vista lateral das diferentes inclinações das ventaneiras: a) P1; b) P2.

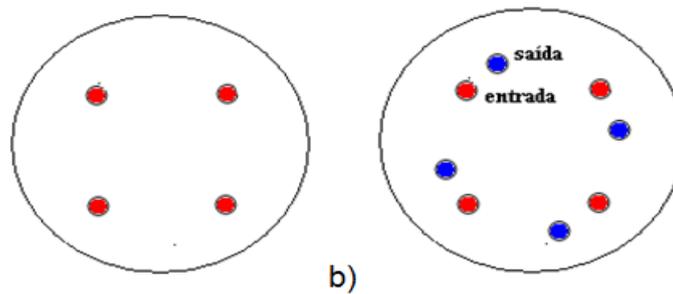


Figura 7. Vista de topo das diferentes inclinações das ventaneiras: a) P1; b) P2.

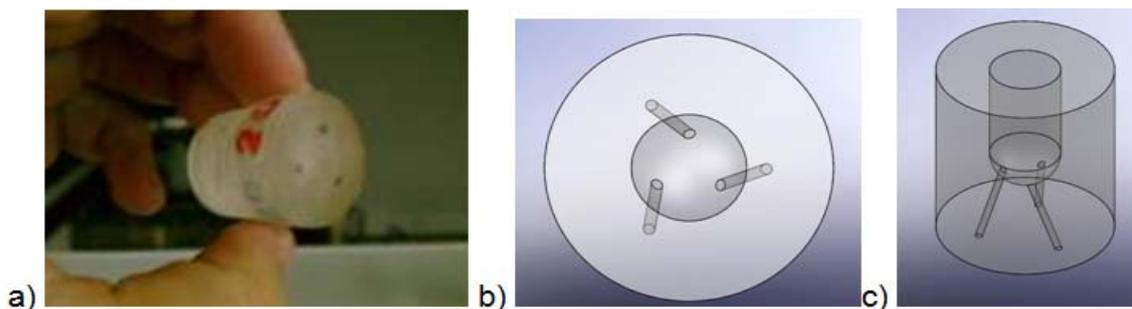


Figura 8. a) Bico de lança utilizado nos testes; b) esquema da vista de topo do bico torcido; c) vista lateral.

Nas figuras que se seguem QT significa vazão de ar pela lança de topo em lpm; QF a vazão de ar total pelas ventaneiras do fundo do reator lpm; Dlb a distância lança-banho em cm.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

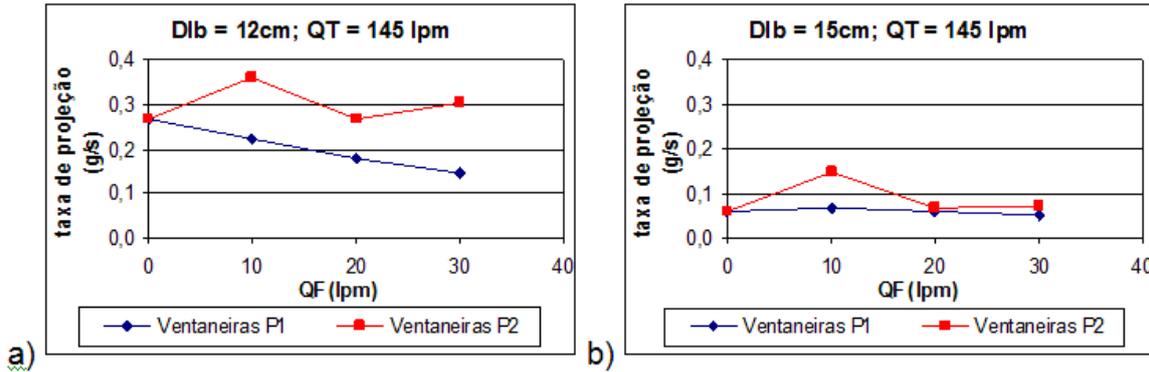
As Figuras 9 e 10 demonstram que, para uma dada vazão, a diminuição da distância lança-banho resultou no aumento da taxa de projeção de líquido, como esperado. Para condições de sopro duro, o aumento da vazão do gás inerte pelo fundo do reator parece reduzir substancialmente a taxa de projeção. No entanto, sob condições de sopro macio, este efeito mostrou-se negligenciável. Para maiores velocidades de sopro de oxigênio, especialmente com pequena distância lança-banho, a taxa de projeção mostrou-se menor para configuração P1 das ventaneiras em comparação com a configuração P2 (ambos com lança convencional, 0°). Este efeito mostrou-se mais pronunciado para maiores vazões de sopro de oxigênio, Figura 10.



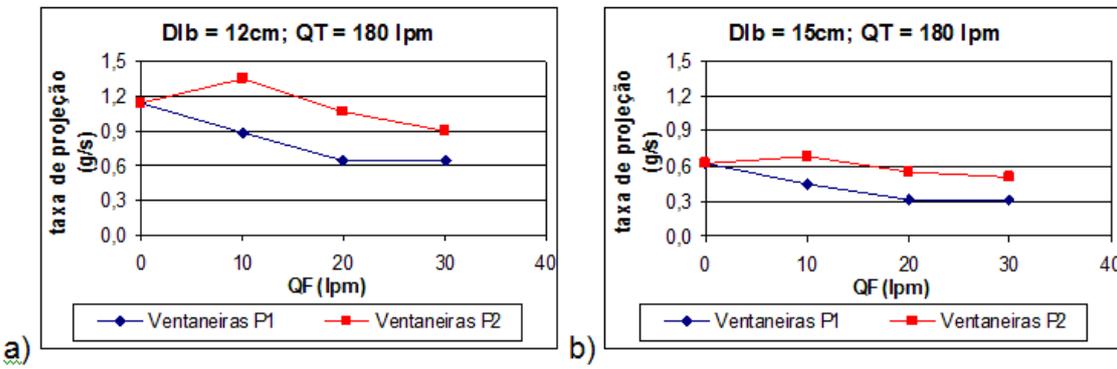
# 42º Seminário de Aciaria Internacional

42<sup>nd</sup> Steelmaking Seminar - International

15 a 18 de maio de 2011 / May 15<sup>th</sup> - 18<sup>th</sup>, 2011

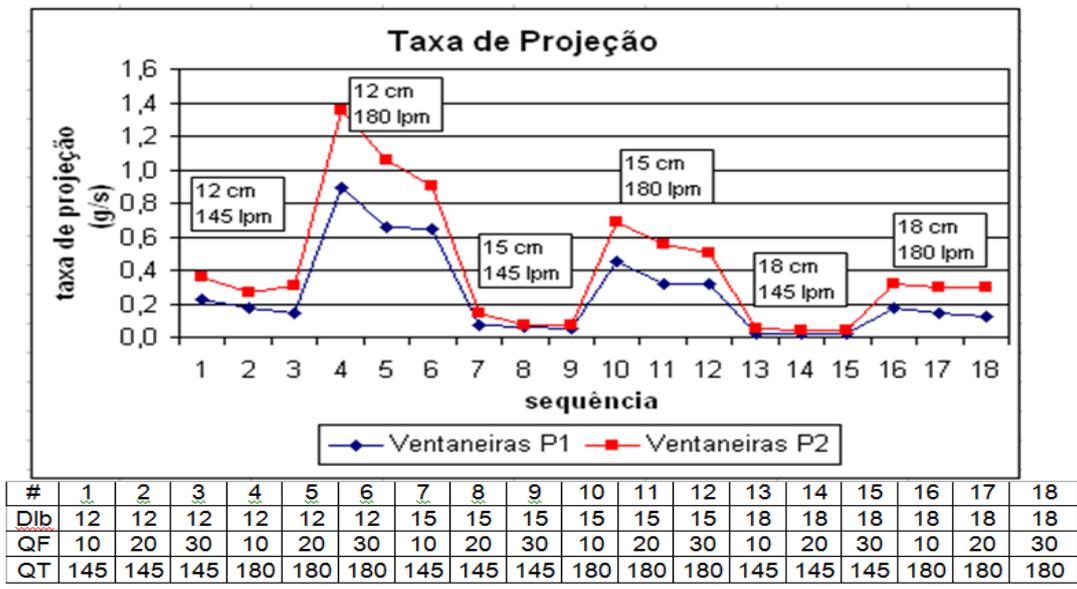


**Figura 9.** Efeito da configuração das ventaneiras, vazão pelo fundo e distância lança-banho sobre a taxa de projeção para vazão de sopro de oxigênio de 145 l/min (lança convencional).



**Figura 10.** Efeito da configuração das ventaneiras, vazão pelo fundo e distância lança-banho sobre a taxa de projeção para vazão de sopro de oxigênio de 180 l/min (lança convencional).

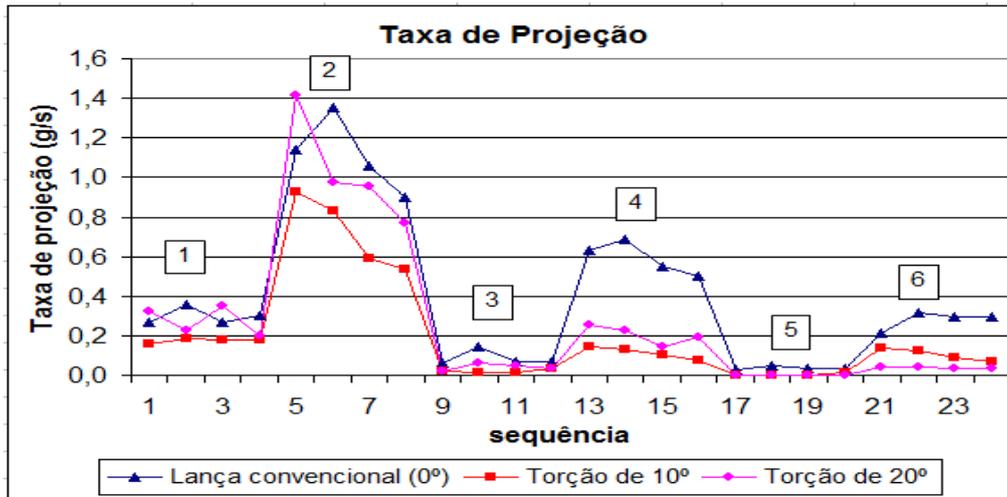
A Figura 11 mostra o aumento da taxa de projeção com a diminuição da distância lança-banho e aumento da vazão pela lança; este último proporcionando uma mudança de patamar da taxa de projeção muito mais acentuada. Ao mesmo tempo, o borbulhamento de gás pelas ventaneiras tende, na maioria dos casos, a provocar o decaimento na quantidade de gotas expelidas, principalmente no regime de sopro duro.



**Figura 11.** Resultados encontrados para a taxa de projeção com a indicação das condições operacionais (lança convencional).

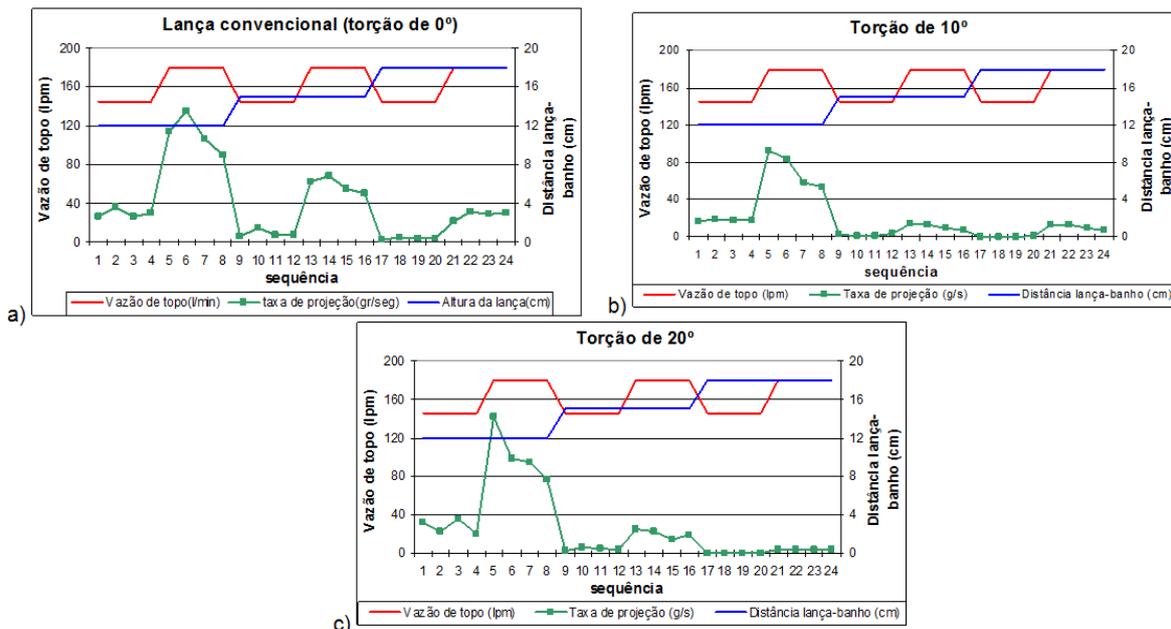


A Figura 12 ilustra o efeito do ângulo de torção dos furos da lança sobre a taxa de projeção de líquidos para as ventaneiras na posição P2. Distinguem-se seis patamares, os quais são relacionados com a vazão de topo e distância lança-banho. Nota-se que o patamar de número 2 foi aquele correspondente a maior taxa de projeção. Os quatro pontos presentes em cada patamar referem-se às vazões de fundo; 0, 10 lpm, 20 lpm e 30 lpm, respectivamente. Pode-se observar uma menor taxa de projeção para o ângulo de torção de 10° comparando com os ângulos de torção de 0° e 20°, para altura de lança de 12 cm. Ao comparar o ângulo de torção de 20° com a lança convencional, percebe-se que este causa menor ejeção de partículas.



**Figura 12.** Comparação das taxas de projeções entre os três ângulos de torção dos furos da lança estudados (ventaneiras na posição P2).

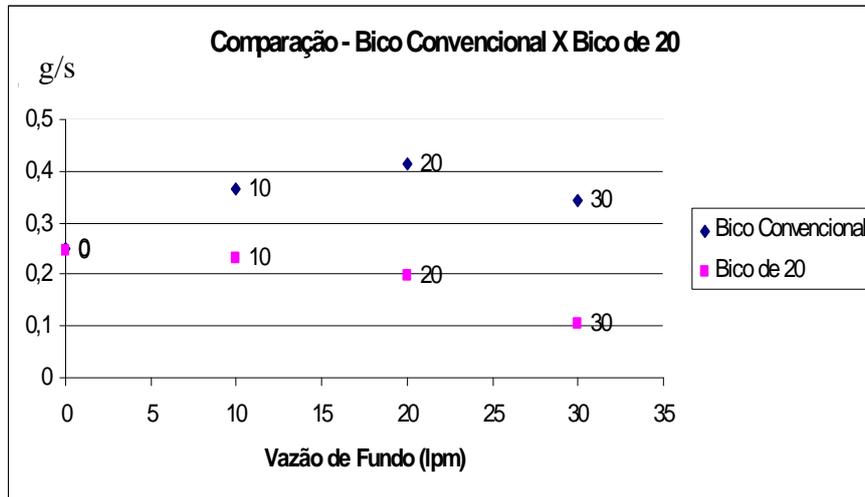
A Figura 13 mostra as influências da distância lança-banho e da vazão de topo sobre a taxa de projeção. Os resultados indicam que a distância lança-banho e vazão pelo topo possuem grande influência na taxa de projeção.



**Figura 13.** Influência da distância lança-banho e vazão pelo topo na taxa de projeção (ventaneiras na posição P2): a) Lança convencional (torção de 0°); b) Torção de 10°; c) Torção de 20°.

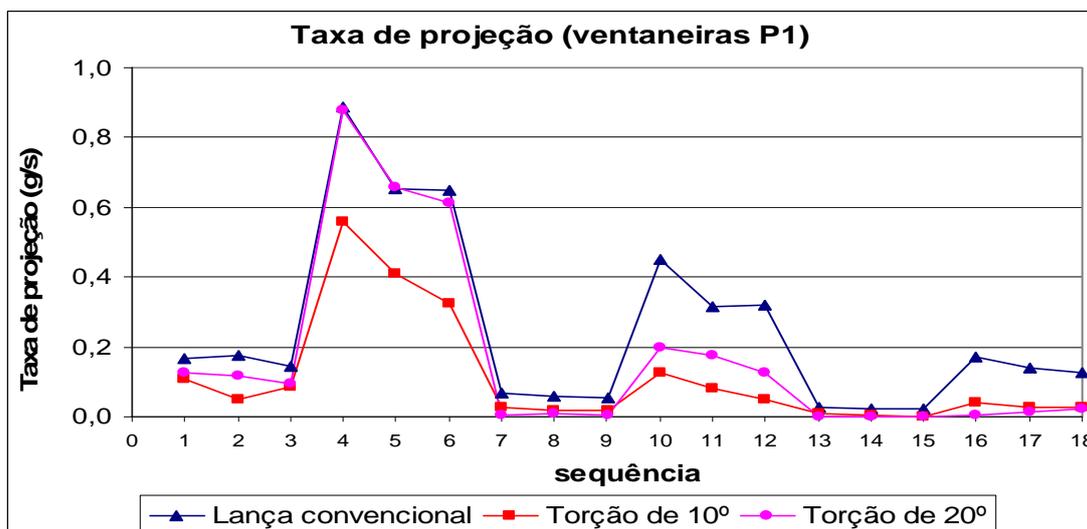


O gráfico da Figura 14 foi obtido a partir do modelo curto e mostra que para uma dada vazão de sopro de oxigênio, o aumento da vazão de gás inerte pelo fundo do reator causou diminuição da taxa de projeção. Este efeito mostrou-se mais pronunciado para o ângulo de torção do furo da lança de sopro de oxigênio de 20° em comparação com o bico convencional. Com relação a influência do ângulo de torção sobre a projeção no modelo curto, os resultados foram similares ao modelo longo.



**Figura 14.** Efeito da vazão do gás pelo fundo e ângulo de torção do furo do bico da lança sobre a taxa de projeção (modelo curto – ventaneiras na posição P2).

De acordo com a Figura 15, com as ventaneiras na posição P1, persiste a menor taxa de projeção para o ângulo de torção de 10°, em comparação com o ângulo de torção de 20° e a lança convencional.

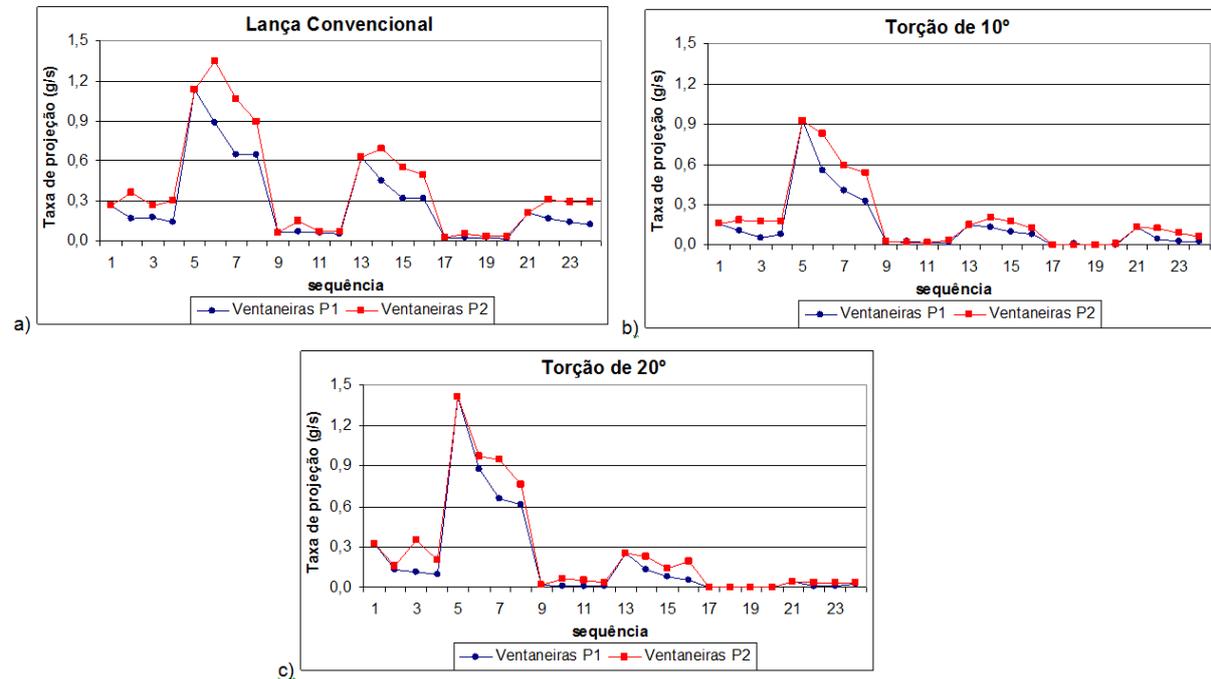


**Figura 15.** Comparação das taxas de projeções entre os três ângulos de torção testados.

A Figura 16 compara os efeitos da configuração das ventaneiras e ângulo de torção do bico da lança. De acordo com os testes realizados anteriormente, foi observado que, utilizando a lança convencional, as ventaneiras na posição P1 provocam menor ejeção de partículas. No caso das ventaneiras na posição P2, o ângulo de torção de 10° resultou em uma menor taxa de projeção comparado aos ângulos de 0 e 20°.



Resultados estes, que se confirmaram para as ventaneiras na posição P1, onde as menores taxas também foram encontradas para o ângulo de torção de 10°.



**Figura 16.** Comparação entre a taxa de projeção dos testes com ventaneiras na posição P1 vs posição P2: a) Lança convencional; b) Torção de 10°; c) Torção de 20°.

Foi realizada análise de regressão linear, sendo a variável resposta: taxa de projeção ( $T_{proj}$ ) e as variáveis explicativas: distância lança-banho, vazão pelo fundo e vazão pelo topo. As equações e coeficientes de ajuste encontrados podem ser observados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Equações de taxa de projeção em função de Dlb, QF e QT

Sistema	Equação	Coeficiente de ajuste ( $R^2$ )	Comparação	
			$T_{proj}$ (g/s)	Dif. %
Vent_P1 Torção_0°	$T_{proj} = \frac{-62,6 - 13,4 * Dlb - 1,06 * QF + 1,79 * QT}{100}$	93,5	0,486	PADRÃO
Vent_P2 Torção_0°	$T_{proj} = \frac{-91,1 - 17,4 * Dlb - 0,509 * QF + 2,32 * QT}{100}$	93,6	0,656	+ 34,93%
Vent_P1 Torção_10°	$T_{proj} = \frac{10,7 - 14,7 * Dlb - 0,828 * QF + 1,30 * QT}{100}$	84,4	0,260	- 46,49%
Vent_P2 Torção_10°	$T_{proj} = \frac{23,3 - 18,6 * Dlb - 0,486 * QF + 1,55 * QT}{100}$	91,9	0,351	- 27,75%
Vent_P1 Torção_20°	$T_{proj} = \frac{40,9 - 25,5 * Dlb - 1,33 * QF + 2,08 * QT}{100}$	89,9	0,396	- 18,58%
Vent_P2 Torção_20°	$T_{proj} = \frac{47,2 - 27,4 * Dlb - 0,801 * QF + 2,20 * QT}{100}$	91,7	0,493	+ 1,44%

Uma comparação entre a situação original (padrão) e os demais sistemas foi feita através das equações de regressão utilizando a média dos resultados para todas as combinações de parâmetros operacionais. O resultado da comparação pode ser observado na Tabela 1. De uma maneira geral, o sistema com ventaneiras na posição P2 e torção de 0° resultou em uma maior taxa de projeção, aumento da ordem de 35% com relação ao sistema original. A menor taxa de projeção foi obtida com ventaneiras na posição P1 e torção de 10°, tendo redução da ordem de 46%.



## 4 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, pode ser observado que:

- A diminuição da distância lança-banho e/ou aumento da vazão de sopro de oxigênio e menores vazões de gás inerte pelo fundo elevam a taxa de projeção de líquidos. Dentre estes, a vazão pelo topo é a que mais influenciou a taxa de projeção, sendo a vazão pelo fundo a menor influência.
- O ângulo de torção dos bicos da lança de sopro de oxigênio exerceu grande influência sobre a taxa de projeção. Entre as geometrias investigadas, o ângulo de torção de 10° provocou menor ejeção de partículas para as duas configurações de ventaneiras. A maior quantidade de partículas ejetadas foi resultante dos testes com lança convencional.
- Para as configurações das ventaneiras investigadas, para todos os ângulos de torção, as ventaneiras na posição P1 resultaram em menores taxas de projeção.
- Correlações matemáticas relacionando vazão de sopro de oxigênio, distância lança-banho e vazão de gás pelo fundo do reator para várias configurações das ventaneiras e ângulos de inclinação dos furos da lança de sopro de oxigênio foram obtidas.

## Agradecimentos

CNPq, CAPES, FAPEMIG e V&M do Brasil pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 QUINTÃO, H.A.; *Princípios Básicos de Fabricação do Aço Líquido*, 81p (Apostila), 2003
- 2 ODENTHAL, H.J., FALKENRECK, U & SCHLÜTER, J.; CFD Simulation of Multiphase Melt Flows in Steelmaking Converters - European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006, p. 1-21, 2006
- 3 SILVA C.A.; *Aumento de Produtividade em Convertedores de Produção de Aço*, Projeto de Pesquisa, FAPEMIG, 27p, 2009
- 4 HIGUCHI, Y., TAGO, Y., Effect of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, *ISIJ International*, v.43, n.9, p.1410-1417; 2003
- 5 LUOMALA M.J. et al., Splashing and Spitting Behavior in the Combined Blown Steelmaking Converter, *ISIJ International*, v42, n9, p944-949, 2002
- 6 LUOMALA M.J., FABRITIUS, T.M.J, HARKKI, .J.J., The Effect of Bottom Nozzle Configuration on the Bath Behavior in the BOF, *ISIJ International*, v44, n5, p. 809-816; 2003
- 7 SESHADRI, V., ALMEIDA, L.P., MAGGIONI, V., GRABRIEL W.V.; SILVA, C.A., SILVA, I.A.; *Effects of some operational parameters upon degasification rate, mixing time, splashing and skull development in a combined-blow converter during steelmaking refining: a physical model approach*. AISTech, Pittsburgh, Pa, USA; 3 a 6 de Maio, p. 1081-1089, 2010
- 8 GASPARINI, V.M., *Simulação a frio de um reator de sopro combinado*, Dissertação de Mestrado, REDEMAT, 132p, 2011
- 9 GASPARINI, V.M., SESHADRI, V., ALMEIDA, L. P., GRABRIEL. W. V., SILVA, C.A., SILVA, I. A., ARAÚJO, E.S.; *Uma Análise via Modelagem Física dos Efeitos de Alguns Parâmetros Operacionais Sobre a Velocidade de Mistura, de Desgaseificação e Taxa de Projeção em Conversores de Sopro Combinado*. 41º SEMINÁRIO DE ACIARIA INTERNACIONAL – ABM, Resende, RJ, Brasil, 23 a 26 de Maio, p. 153-162, 2010