

# AVALIAÇÃO VIA MODELAGEM FÍSICA DOS EFEITOS DE ALGUNS PARÂMETROS OPERACIONAIS SOBRE A PRODUTIVIDADE DE CONVERSORES/CONVERTEDORES DE SOPRO COMBINADO

Vitor Maggioni Gasparini <sup>1</sup>  
 Carlos Antônio da Silva <sup>2</sup>  
 Itavahn Alves da Silva <sup>3</sup>  
 Leandro Almeida <sup>4</sup>  
 Varadarajan Seshadri <sup>5</sup>  
 Ely da Silva Araújo <sup>6</sup>

## Resumo

Estuda-se pela modelagem física a influência de fatores geométricos e operacionais sobre o processo de mistura, velocidade de desgaseificação e taxa de ejeção de líquido em um reator de sopro combinado. Analisa-se a importância relativa do posicionamento das ventaneiras, e do padrão de sopro (distância lança-banho, vazão pela lança e vazão pelas ventaneiras) tendo por base um reator industrial de 80 toneladas.

**Palavras-chave:** Misturas; Desgaseificação; Projeções; Convertedor LD.

## EVALUATION VIA PHYSICAL MODELING OF THE EFFECTS OF SOME GEOMETRICAL AND OPERATIONAL PARAMETERS ON THE PRODUCTIVITY OF A COMBINED BLOW CONVERTER

## Abstract

Physical modeling is employed in order to assess the influence of some geometrical and operational parameters of a combined blow converter on mixing, degasification and rate of projections. The relative role of bottom tuyeres location and blow pattern (top gas blowing rate, tuyeres blowing rate and lance to bath distance) has been clarified. Operational data have been taken from a 80 tons reactor.

**Key words:** Mixing; Degaseification; Projections; LD converter.

## I INTRODUÇÃO

Os fenômenos fluidodinâmicos e físico-químicos ocorrentes no interior do conversor/convertedor de sopro combinado, especialmente devido à interação metal-escória, são complexos e apresentados esquematicamente na Figura 1. As intensidades desses fenômenos são funções de parâmetros geométricos e operacionais como distância

lança-banho, geometria da lança de sopro de oxigênio, vazão de gás via lança e ventaneiras, posicionamento das ventaneiras. A otimização desses parâmetros, de modo a maximizar o desempenho metalúrgico do processo, especialmente no que concerne à eficiência de descarbonização do banho metálico, é de interesse industrial.

<sup>1</sup>Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Rua João Dias da Mota, 340, Bairro Inconfidentes, Cep 36420-000, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: vitormaggioni@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Engenheiro Metalúrgico, Ph.D., Professor, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Campus Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, Bairro Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: casilva@em.ufop.br

<sup>3</sup>Engenheiro Metalúrgico, Ds.C., Professor, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Campus Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, Bairro Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: itavahnufop@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Engenheiro Metalúrgico, MSc., V&M do Brasil. Av. Olinto Meireles, 65, Bairro Barreiro, Cep 30640-010, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: leandro.almeida@vmtubes.com.br

<sup>5</sup>Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Rua Costa Rica, 333, apto. 702, Bairro Sion, Cep 30320-030, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: seshadri@demet.ufmg.br

<sup>6</sup>Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Av. Rita Maria Ferreira da Rocha, 855, apto. 504, Prédio Estados Unidos, Bairro Comercial, Cep 27510-060, Resende, RJ, Brasil. E-mail: elyjuniorgf8@yahoo.com.br

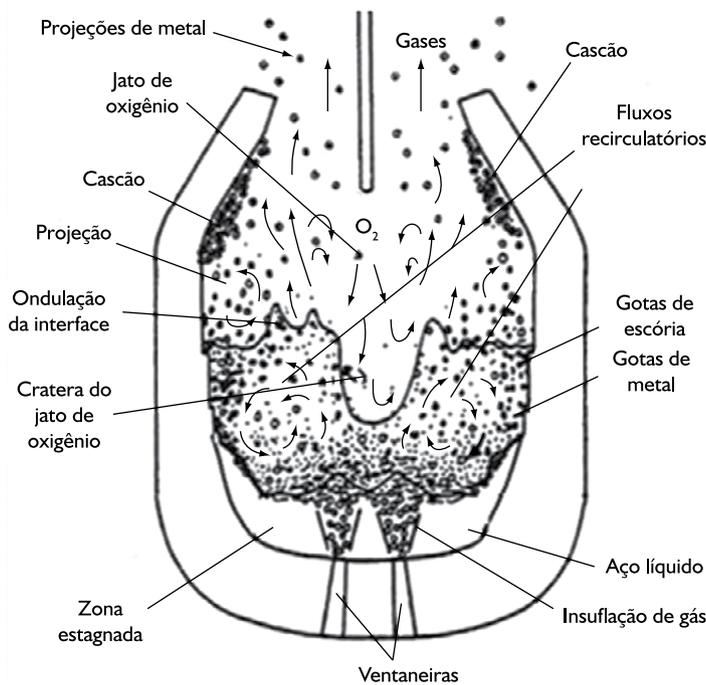


Figura 1. Fenômenos decorrentes da interação metal/gás/escória.<sup>(1)</sup>

A redução do tempo de sopro é possível pelo aumento da taxa de descarburização. Para isso, é necessário aumentar a agitação do banho de modo a facilitar o contato entre as espécies reagentes carbono e oxigênio. O aumento da taxa de descarburização não pode ser conseguido simplesmente pelo aumento da vazão de oxigênio: existe um limite superior ditado pelo aumento da taxa de projeção, que provoca a formação de cascão na boca do reator, transbordamento da emulsão gás/metálico/escória e perda em rendimento metálico.<sup>(1)</sup> Alguns estudos relacionando os efeitos citados e a produtividade em conversores podem ser encontrados na literatura. Por exemplo, Tago e Iguchi<sup>(2)</sup> desenvolveram experimentos no qual compararam os índices de projeção emitidos por lanças convencionais e outras em que os bicos continham um certo ângulo de torção. Seus resultados, Figura 2, sugerem que a taxa de projeção para fora do reator é afetada pela torção dos furos e que existe um valor de ângulo que a minimiza. Naito, Kitamura e Ogawa<sup>(3)</sup> constroem um modelo de refino em reator de sopro combinado no qual as reações de refino ocorrem essencialmente em um sub-reator denominado *hot spot*, região de contato direto entre o jato de oxigênio e o banho; essa região troca matéria continuamente, com o restante do banho. O modelo ressalta, portanto, a importância do processo de mistura sobre o refino do aço.

Também os fatores que afetam a formação da emulsão são objeto de interesse, por exemplo, Jung e Fruehan.<sup>(4)</sup>

Este trabalho reporta resultados provindos de simulação física de um reator de 80 toneladas, relativos ao processo de mistura, desgaseificação e projeção. Portanto, o objetivo deste trabalho é de identificar condições de aumento de produtividade em conversores/converteedores de sopro combinado.

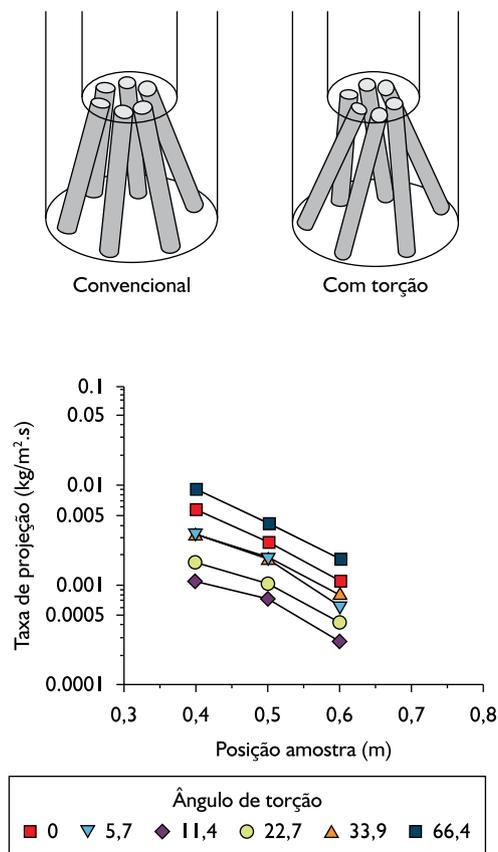


Figura 2. Influência do ângulo de torção sobre a taxa de projeção.<sup>(2,5)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos experimentos foi utilizado um modelo em acrílico construído em escala 1:10, do conversor de sopro combinado da V&M do Brasil cuja capacidade é de 80 toneladas. Ar é usado para substituir os gases soprados pelo topo (lança com bico de três furos) e pelas quatro ventaneiras localizadas no fundo.

A partir desse modelo realizaram-se testes de misturamento, desgaseificação e taxa de projeção, com as ventaneiras na posição normal e inclinada de 60° com relação ao fundo do vaso, variando também a vazão pelo topo (QT), pelo fundo (QF) e a altura de lança (Dlb). Também foram feitos testes variando o ângulo de torção dos furos da lança entre 0° e 30°, não reportados neste trabalho.

As condições operacionais de modelagem foram determinadas considerando os adimensionais de Froude modificado, de Weber e de Momentum, como descrito em Almeida et al.<sup>(1)</sup> Um resumo encontra-se na Tabela 1. O líquido utilizado para simular o aço foi a água.

**Tabela 1.** Condições operacionais na máquina industrial e modelo.

Dlb (cm)		QL (m <sup>3</sup> /min)		QF (m <sup>3</sup> /min)	
Indústria	Modelo	Indústria	Modelo	Indústria	Modelo
120	12	180	0,110	0,0	0,00
150	15	240	0,145	0,2	0,01
180	18	300	0,180	0,4	0,02
				0,6	0,03

## 2.1 Cinética de Desgaseificação

A avaliação da cinética da reação líquido/gás, via adsorção/desorção de CO<sub>2</sub> em soluções cáusticas, leva em consideração que o equilíbrio entre as espécies H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>, H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, e CO<sub>2(aq)</sub> possa ser rapidamente atingido quando a solução em questão entra em contato com um fluxo gasoso contendo CO<sub>2(g)</sub> ou ar. A distribuição das espécies em equilíbrio é determinada em função do grau de acidez da solução, sendo que, na faixa de pH entre 6 e 7, predomina a reação de desorção-adsorção de CO<sub>2</sub>.

Sendo assim, para simular a cinética de desgaseificação do aço líquido, utilizou-se uma solução cáustica cuja concentração é 0,02 molar. Nela foi insuflado CO<sub>2(g)</sub> de modo a abaixar o pH até o valor 6. Nesse momento é cessada a injeção desse gás e passa-se a soprar ar através da lança localizada no topo e pelas ventaneiras no fundo do reator, o que implica na liberação (desorção) de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, aumento do pH no banho, sendo essa variação medida por uma placa de aquisição de dados e enviadas a um arquivo de computador e que fornece parâmetros relacionados à cinética de reação.<sup>(1)</sup>

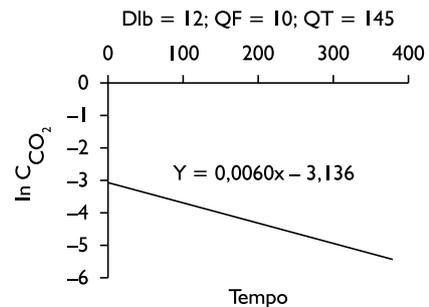
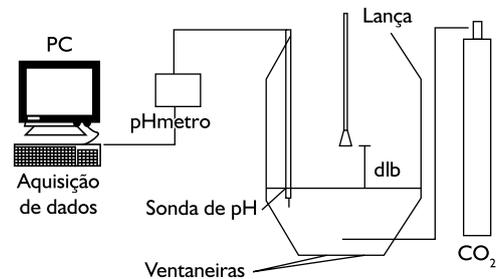
Um modelo cinético macroscópico é proposto para determinação da cinética de reação, considerando as seguintes variáveis:

- A: área interfacial, formada pelas bolhas do sopro pelo fundo, gotas ejetadas e a cavidade devido ao sopro pelo topo;
- C: concentração de CO<sub>2</sub> (mol.L<sup>-1</sup>);
- C<sub>0</sub>: concentração inicial de CO<sub>2</sub> (mol.L<sup>-1</sup>);
- V: volume de líquido (l);
- t: tempo de operação (s);
- K: velocidade de reação (m/s):  $\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -(K * A/V) * t$

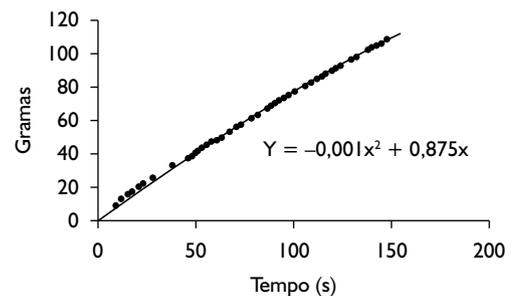
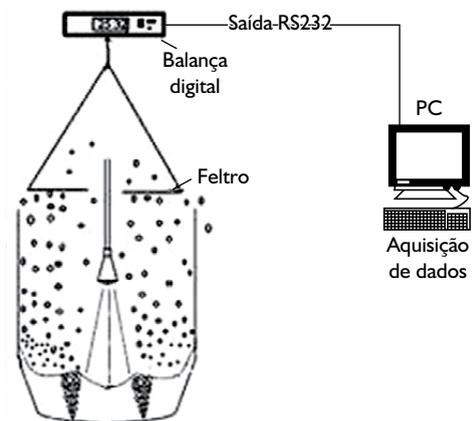
A Figura 3 mostra um esquema do aparato experimental e uma típica curva de desorção, para Dlb = 12 cm; QF = 10 lpm e QT = 145 lpm.

## 2.2 Medição da Taxa de Projeção

A Figura 4 mostra o esquema do aparato experimental utilizado para a determinação da taxa de projeção, bem como uma curva típica.



**Figura 3.** Aparato experimental e curva de desorção.



**Figura 4.** Aparato experimental para determinação de projeção.

Como sugere a Figura 4, as gotículas emitidas durante o sopro são absorvidas por um feltro colocado na parte superior do modelo. A variação de peso é continuamente registrada em

uma balança de precisão e porta de comunicação RS232. A taxa de projeção foi definida como sendo a inclinação da curva na origem, no exemplo: 0,8756 g/s.

### 2.3 Tempos de Mistura

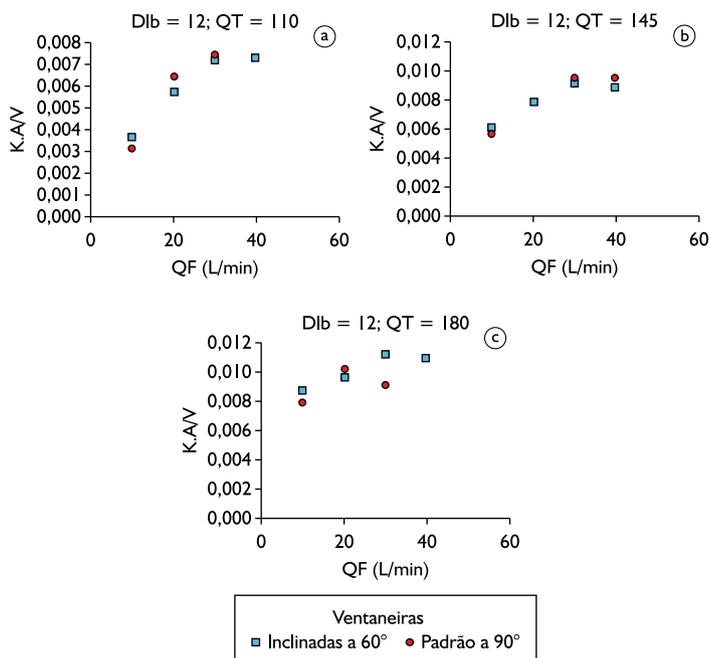
Utilizou-se o procedimento no qual faz-se a adição de um traçador (neste caso solução salina de KCl) em pulso, cuja dispersão pode ser seguida (nestes experimentos por três condutímetros localizados em pontos definidos do modelo). O tempo de mistura é definido como o intervalo de tempo necessário para que se alcance estabilização das leituras de condutividade, dentro de uma faixa de erro de  $\pm 5\%$ .<sup>(7)</sup>

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os mesmos parâmetros operacionais foram realizados testes com as ventaneiras do sopro submerso na posição perpendicular ao fundo do vaso e inclinada de  $60^\circ$ , a fim de identificar a influência desta inclinação sobre a cinética de desgaseificação, tempo de misturamento e taxa de projeção.

### 3.1 Cinética de Desgaseificação

Na Figura 5, observa-se a influência da inclinação das ventaneiras na velocidade de desgaseificação em função da vazão pelo fundo, considerando-se a distância lança-banho de 12 cm e variando a vazão pelo topo de 110 L/min (a), 145 L/min (b) e 180 L/min (c).

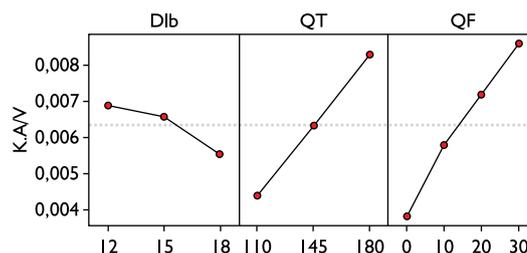


**Figura 5.** Análise da influência da inclinação das ventaneiras na velocidade de desgaseificação em função da vazão pelo fundo, para Dlb = 12 cm e QT de: a) 110 L/min; b) 145 L/min e c) 180 L/min.

A técnica experimental empregada retorna o valor do parâmetro  $k \cdot \frac{A}{V}$ . O valor da área interfacial não é mensurável diretamente; isto implica que um eventual aumento no valor de  $k \cdot \frac{A}{V}$  pode advir tanto de maior valor de área interfacial (como resultado de maior taxa de projeções) como do aumento do coeficiente de transferência de massa (em virtude de maior grau de misturamento).

Como se pode verificar, para todas as variações dos parâmetros operacionais, não houve nenhuma mudança significativa com relação ao tempo de desgaseificação devido à mudança da inclinação das ventaneiras. A vazão de gás inerte pelo fundo parece ser o principal fator responsável pela melhora de eficiência na remoção de gases. Além do mais, a velocidade de desgaseificação mostra-se significativamente afetada pela taxa de sopro pela lança, QT, provavelmente pelo seu papel em gerar interface adicional em função da projeção de líquido. Resultados similares, quando avaliada a influência da inclinação das ventaneiras sobre a cinética de desgaseificação, foram encontrados para distância lança-banho de 15 cm e 18 cm.

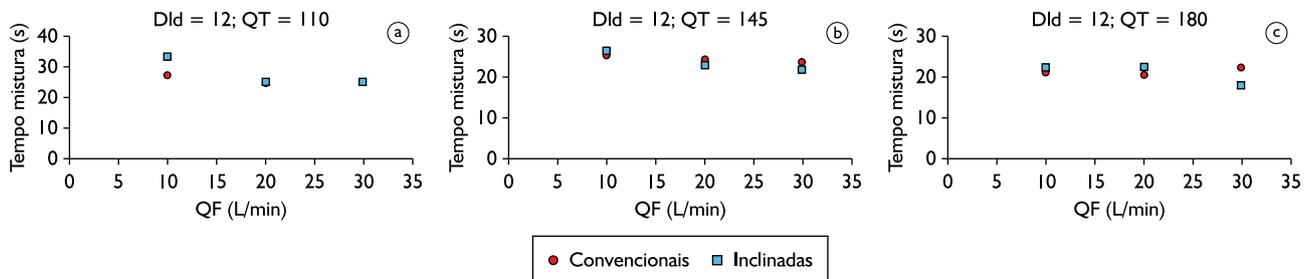
A Figura 6 permite identificar o grau relativo de importância das variáveis em jogo; a vazão pelo topo (QT) e o borbulhamento de gás pelo fundo (QF) são os fatores que mais influenciam na cinética de desgaseificação, uma vez que as curvas relativas a estes parâmetros estão mais inclinadas. Os maiores valores de K são obtidos quando se aumentam os mesmos.



**Figura 6.** Avaliação da intensidade com que os parâmetros operacionais (Dlb; QF e QT) influenciam na cinética de desgaseificação.

### 3.2 Tempo de Misturamento

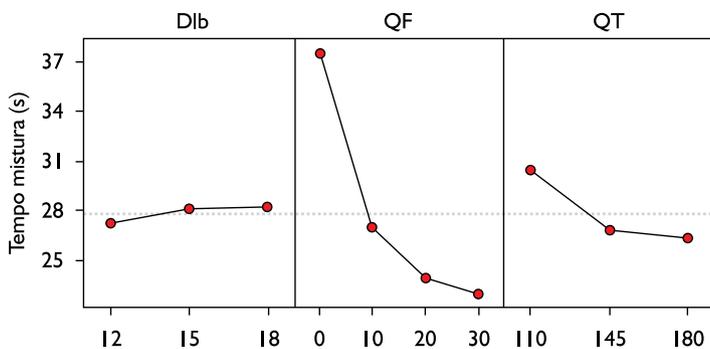
De modo análogo à análise de cinética de desgaseificação, foi determinado o tempo de misturamento em função das configurações das ventaneiras (inclinação); como anteriormente não se verificou influência significativa da mudança para nenhuma das combinações dos parâmetros operacionais, como mostram os gráficos apresentados na Figura 7.



**Figura 7.** Influência da inclinação dos bicos das ventaneiras no tempo de misturamento em função da vazão pelo fundo, para DId = 12 cm e QT = 110 L/min (a); QT = 145 L/min (b); e QT = 180 L/min (c).

Como se pode verificar, o tempo de misturamento é reduzido quando se aumenta a vazão de ar soprado pelas ventaneiras, resultados semelhantes aos reportados por Luomala, Fabritius e Harkki<sup>(8)</sup> e Choudhary e Ajmani.<sup>(9)</sup> A redução da distância lança-banho e o aumento da vazão de ar injetado pelo topo também contribuem para redução no tempo de homogeneização; porém, para as combinações em que há sopro combinado essa diferença não é muito significativa, uma vez que nesses casos a diferença de tempo obtida nas diversas combinações é de no máximo cinco segundos. Resultados similares, relativos à influência da inclinação das ventaneiras sobre o tempo de mistura, foram encontrados para distância lança-banho de 15 cm e 18 cm.

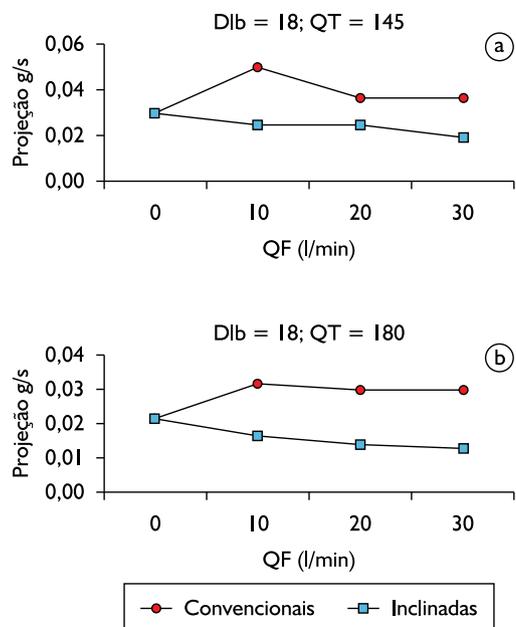
O papel relativo de cada variável sobre o tempo de misturamento pode ser visualizado na Figura 8, em que se verifica que a vazão pelo fundo apresenta o maior efeito, enquanto a distância lança-banho é a que exerce menor interferência.



**Figura 8.** Efeito da variação dos parâmetros cinéticos: distância lança-banho, vazão de ar pelo topo e pelo fundo sobre o tempo de misturamento.

### 3.3 Taxa de Projeção

Os testes para simulação de projeção em conversores foram realizados para vazões de topo 145 L/min e 180 L/min, valores de distâncias lança-banho 12 cm, 15 cm e 18 cm, e vazões pelo fundo de 0, 10 L/min, 20 L/min e 30 L/min. A Figura 9 apresenta valores de taxa de projeção em função do borbulhamento de gás pelo fundo mantendo-se constantes a distância lança-banho e a vazão de topo.

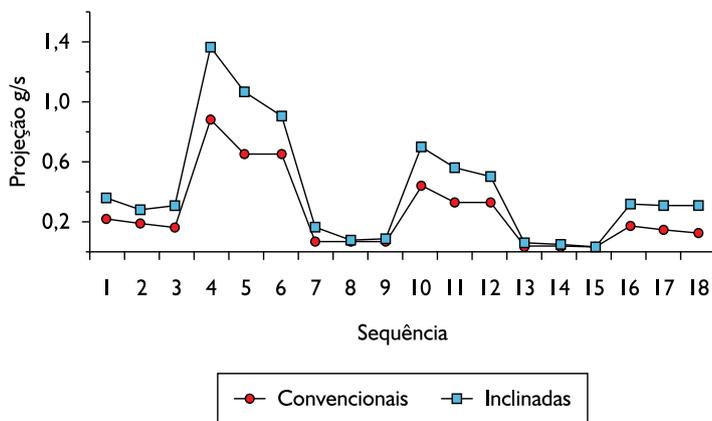


**Figura 9.** Taxa de projeção (g/s) em função da vazão pelo fundo para DId = 18 cm e QT = 145 L/min (a); e QT = 180 L/min (b).

Nota-se a forte influência da vazão pelo fundo sobre a taxa de ejeção e, em decorrência, a necessidade do sopro duro para se garantir criação de área interfacial e também que ventaneiras inclinadas produzem mais projeção. Resultados similares ocorrem para as outras distâncias lança-banho (DId).

Um resumo dos resultados pode ser encontrado na Figura 10, para a qual se encontram identificadas as condições operacionais.

Portanto, a influência da inclinação das ventaneiras sobre o processo de mistura e de degaseificação foi negligenciável; entretanto, a taxa de projeção foi fortemente afetada. Geometria do sistema (neste caso, representada pelo posicionamento das ventaneiras) bem como parâmetros de sopro como vazão e distância lança-banho são os que mais afetam a taxa de projeção. Estes resultados sugerem projetos otimizados do reator, de acordo com as características operacionais da planta.



#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
dlb	12	12	12	12	12	12	15	15	15	15	15	15	18	18	18	18	18	18
QF	0	20	30	0	20	30	0	20	30	0	20	30	0	20	30	0	20	30
QT	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180

**Figura 10.** Resultados encontrados para a taxa de projeção com a indicação das condições operacionais.

## 4 CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos permite concluir que:

- a inclinação da ventaneira leva a tempos de misturamento e velocidades de desgaseificação na prática idênticos da configuração original; entretanto as taxas de projeção são maiores;
- dentre todos os parâmetros analisados, o borbulhamento de gás inerte pelo fundo do reator é o principal responsável pela variação do tempo de misturamento, sendo reduzido com o aumento da vazão;
- quanto maior a vazão de oxigênio pelo topo e o borbulhamento de gás inerte pelo fundo, melhor será a cinética de desgaseificação;
- menores distâncias lança-banho e maiores vazões de topo implicam no aumento da taxa de projeção.

## Agradecimentos

À FAPEMIG e à V&M do Brasil pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALMEIDA, L. P. *et al.* Effects of some operational parameters upon degaseification rate, mixing time, splashing and skull development in a combined-blow converter during steelmaking refining: a physical model approach. In: AISTEch 2010 – THE IRON & STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, 2010, Pittsburgh. *Proceedings...* Warrendale, PA: AIST, 2010. p. 274-85.
- 2 TAGO, Y.; HIGUCHI, Y. Fluid analysis of jets from nozzles in top blow process. *ISIJ International*, v. 43, n. 2, p. 209-15, 2003.
- 3 NAITO, K.; KITAMURA, S.; OGAWA, Y. Effects of BOF top blowing and bottom stirring conditions on suppressing excessive oxidation. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 3, p. 209-14, June 2002.
- 4 JUNG, S.; FRUEHAN, R. J. Foaming characteristics of BOF slags. In: IRONMAKING CONFERENCE, 59., 2000, Pittsburgh, PA. *Proceedings...* Warrendale, PA: ISS, 2000. p. 517-27.
- 5 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. 1410-7, 2003.
- 6 SESHADRI, V. *et al.* Decarburization rates in RH-KTB degasser of CST steel plant through physical modelling study. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 33, n. 1, p. 1-5, 2006
- 7 SESHADRI, V. *et al.* Optimization of the pig iron desulfurization inside a torpedo car by physical modeling techniques. In: TMS ANNUAL MEETING, 2005, San Francisco, CA. Warrendale, PA: TMS, 2005. p. 747-59
- 8 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*, v. 44, n. 5, p. 809-16, 2003.
- 9 CHOUDHARY, S. K.; AJMANI, S. K. Evaluation of bottom stirring in BOF steelmaking vessel using cold model study e thermodynamic analysis. *ISIJ International*, v. 46, n. 8, p. 1171-6, 2006.

Recebido em: 28/09/2010

Aceito em: 03/01/2011