

# MISTURA, PROJEÇÃO E EMULSIFICAÇÃO EM UM REATOR DE SOPRO COMBINADO: UMA AVALIAÇÃO VIA MODELAGEM FÍSICA PARA 6 E 12 VENTANEIRAS\*

Pedro Henrique Silva<sup>1</sup>  
Weslei Viana Gabriel<sup>2</sup>  
Victor Assis de Souza Santos<sup>3</sup>  
Johne Jesus Mol Peixoto<sup>2</sup>  
Carlos Antônio da Silva<sup>4</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>4</sup>  
Henrique Silva Furtado<sup>5</sup>

## Resumo

Para explorar as vantagens do sopro combinado, deve-se otimizar os parâmetros operacionais e geométricos de modo a se obter menores tempos de mistura, altas taxas de descarburização e menor tempo de sopro. No entanto, devem-se levar em consideração as taxas de projeção de aço e escória na parede refratária do convertidor (*splashing*) e para fora do mesmo (*sppiting*), assim como a formação de emulsão. Neste trabalho, foram avaliados aspectos operacionais e geométricos através de modelagem física a frio em um modelo 1:15. Verificou-se que o fator de maior influência sobre o tempo de mistura é a vazão pelo fundo, enquanto a taxa de projeção é mais fortemente afetada por vazão pela lança e distância lança-banho. A altura máxima de emulsão apresentou variação significativa em função da vazão pelo fundo, mas também foi dependente, em menor grau, da vazão de sopro e número de ventaneiras.

**Palavras-chave:** BOF; Projeção; Emulsão; Tempo de mistura.

## MIXING, PROJECTION AND EMULSIFICATION IN A COMBINED BLOWING CONVERTER: AN EVALUATION VIA PHYSICAL MODELING FOR 6 AND 12 TUYERES

## Abstract

In order to explore to the most the advantages of combined blowing in converters, operational and geometrical parameters can be optimized to reduce mixing time, increase decarburization rate and reduce blowing time. However, it has to be taken into account splashing and spitting of slag and steel, and foaming. Operational and geometrical parameters have been assessed through a physical cold model in scale 1:15. Gas flow in the bottom has shown the greatest influence on mixing time. Top blowing and distance between lance and bath have shown greater influence on splashing and spitting. The maximum height of foaming was considerably influenced by bottom blowing but also showed itself slightly dependent of top blowing, as well as number of bottom tuyeres.

**Keywords:** BOF; Splashing and Spitting; Slag foaming; Mixing time.

- <sup>1</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- <sup>2</sup> Eng. Metalurgista, MSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- <sup>3</sup> Eng. Metalurgista, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.
- <sup>4</sup> Eng. Metalurgista, Doutor, Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil
- <sup>5</sup> Eng. Metalurgista, Dr., Arcelor Mittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As acentuadas velocidades de reação, típicas de um reator de sopro combinado, são asseguradas pelo sopro de grandes quantidades de oxigênio em velocidades supersônicas sobre a superfície do banho metálico (gusa). Além da cavidade formada em função do impacto, a elevada tensão de cisalhamento na interface jato/metálico é capaz de lançar gotas de metal ao seio da camada de escória onde as reações metal escória podem ocorrer com mais facilidade, em função da alta razão área superficial/volume das gotas. Monóxido de carbono é continuamente gerado pela reação entre oxigênio e carbono dissolvidos no metal, no “hot spot” e nas gotas. Uma coluna de bolhas de gás atravessa então a camada de escória e fica parcialmente retida, formando uma emulsão cujo volume aparente pode ocupar cerca de 70% do reator. Manifestações indesejáveis associadas a estes fenômenos são as projeções e o transbordamento de escória, além da formação de cascão na lança (Albani et al. [1]). Daí controle da taxa de ejeção de gotículas e da formação de emulsão é chave para o sucesso da operação.

De modo geral, considera-se que a projeção de metal e escória nos convertedores de sopro combinado tem efeitos negativos na produtividade do reator, aumenta o desgaste refratário e eleva as perdas metálicas. Por outro lado, o aumento da área interfacial entre o metal e a escória proporcionada pela formação de gotículas favorece reações de descarburização durante o sopro (FABRITIUS et al. [2]; SANTOS [3]).

A produtividade de um BOF é ditada fundamentalmente pela taxa de descarburização, que tende a aumentar com o aumento da vazão de oxigênio pela lança. No entanto, o simples aumento da vazão eleva a taxa de projeção, podendo provocar transbordamento da emulsão gás/metálico/escória, implicando em perdas de rendimento metálico e consequências ambientais (GASPARINI [4]). Uma combinação adequada de fatores operacionais e geométricos nos convertedores leva a menores tempos de mistura (LAI et al., [5]) e conseqüentemente a uma maior taxa de descarburização, menor perda metálica, maior tempo de vida da lança e menor desgaste de refratários (LUOMALA et al. [6]).

Modelagem física pode ser utilizada para avaliar estes aspectos do processo de refino em conversor de sopro combinado. Higuchi e Tago [7] analisaram diferentes lanças com furos torcidos em diferentes ângulos comparando-os entre si e com uma lança normal. A taxa de projeção de água em um modelo em acrílico cilíndrico foi medida a partir da variação da massa de absorventes de algodão posicionados na parte superior do modelo em função do molhamento pelas gotículas ejetadas.

Gasparini [4] realizou testes para medição da taxa de projeção em dois modelos de acrílico em escala 1:10 possuindo quatro ventaneiras no fundo. Os ensaios de projeção foram feitos utilizando-se um feltro preso em um suporte que, por sua vez, encontrava-se pendurado em uma balança para medir a variação de massa devido à projeção de gotas do banho. Esta técnica foi adotada por Santos [3] para avaliar a influência da vazão pela lança, vazão pelo fundo, distância lança-banho, rotação da lança em relação às ventaneiras e ainda do diâmetro dos furos da lança sobre a taxa de projeção de um modelo do conversor de sopro combinado (escala 1:15).

Lai et al. [5] avaliaram o tempo de mistura para diferentes arranjos simétricos e assimétricos de ventaneiras no fundo do convertedor via modelagem física a frio. Os autores verificaram que, no caso dos arranjos simétricos de ventaneiras, o tempo de mistura diminui com o aumento da vazão pela lança devido ao aumento da agitação do banho. No entanto, nesse tipo de arranjo a vazão pelo fundo adotada não apresenta efeito apreciável sobre o tempo de mistura para a maior parte das distâncias lança-banho avaliadas devido à interação de algumas plumas com o jato da lança. No caso dos arranjos assimétricos, Lai et. al [5] obtiveram tempos de mistura menores do que os de arranjos simétricos.

Luomala et al. [6] avaliaram a influência da vazão de gás soprada sobre o tempo de mistura para arranjos com três, quatro e cinco ventaneiras e também observaram que o aumento da vazão de fundo diminui o tempo de mistura ao passo que introduz mais energia cinética e energia de fluibilidade ao gás injetado. O menor tempo obtido nos testes de mistura foi no arranjo de três ventaneiras, o que contraria outros estudos que apontam para diminuição do tempo de mistura com o aumento do número de ventaneiras. Luomala et al. [4] recorreram à explicação de Das et al. [8] para justificar essa anomalia: segundo os últimos, o aumento do número de ventaneiras pode aumentar o tempo de mistura até um valor crítico a partir do qual passa a diminuí-lo, quando ocorre sobreposição de plumas individuais, o que melhora as condições de homogeneização.

Luz et al. [9] apresenta uma revisão abordando os aspectos que determinam a formação de emulsão em processos de fabricação de aço. Como citado por outros, por exemplo, Lahiri et al. [10], sugere-se utilizar um *Foaming Index* ( $\Sigma$ ), determinado como a razão entre o acréscimo de altura  $\Delta h$  de uma coluna de escória, em decorrência da espumação, e a velocidade superficial ( $V_{gás}$ ) de gás que lhe dá origem:

$$\Sigma = \frac{\Delta h}{V_{gás}} \quad (1)$$

Sugere-se a relação seguinte para escórias ácidas:

$$\Sigma = 115 \frac{\eta^{1,2}}{\sigma_e^{0,2} \rho_e d^{0,9}} \quad (2)$$

Onde  $\eta$  é a viscosidade (Pa.s),  $\sigma_e$ , a tensão interfacial escória – gás (N/m),  $\rho_e$  a densidade da escória(kg/m<sup>3</sup>) e d, o diâmetro da bolha (m).

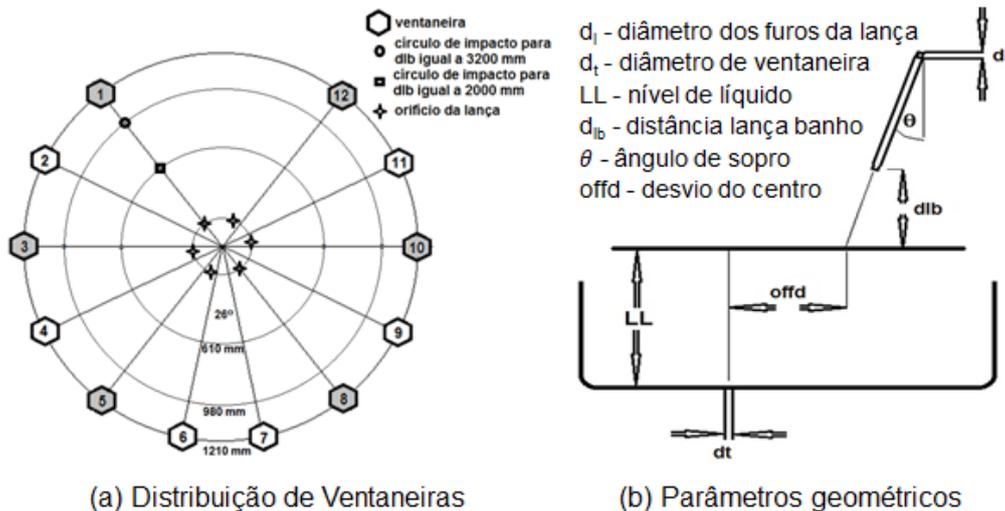
Misra et al. [11] sugerem que o gás gerado por reações *in situ*, por exemplo de redução do FeO da escória ao contato com gotículas suspensa de metal, precisa ser tomado em consideração.

Nesse contexto, este estudo foi realizado com o intuito de se comparar o desempenho de duas diferentes disposições de ventaneiras ao fundo de um conversor de sopro combinado, considerando a influência do ângulo de rotação da lança (fator geométrico), vazão pela lança e pelas ventaneiras (fatores operacionais) sobre tempo de mistura, taxa de projeção e **formação de emulsão**.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O modelo a frio, em escala 1:15, foi operado em situação de similaridade com um reator industrial com capacidade de 320 ton. Valores típicos: de vazão de oxigênio estão na faixa 60000 a 75000 Nm<sup>3</sup>/h; de distância lança banho 3,2 a 2,0 m; de vazão de gás inerte pelas ventaneiras de 400 a 600 Nm<sup>3</sup>/h. A lança possui seis furos inclinados de 17° com a vertical e o sistema de injeção com 6 ou 12 ventaneiras, Figura 1.a.

A Figura 1.a mostra uma visão de topo do reator, ressaltando a posição das ventaneiras, que fazem ângulo entre si de 26°. As duas circunferências imediatamente interiores abrigam os presumíveis pontos de impacto do jato dos orifícios da lança sobre a superfície do banho estático, para distâncias lança banho de 3,2 m e 2,0 m, respectivamente. A orientação relativa dos 6 orifícios da lança em relação à 1ª ventaneira, tal como exposta, é identificada com “Ângulo de Rotação igual a Zero”. O ângulo de rotação, associado à distância lança banho, determina a interação entre jatos e plumas. Quando as 12 ventaneiras estão ativas existe possibilidade de interação entre plumas adjacentes.



**Figura 1.** (a) Disposição de ventaneiras de injeção no fundo do reator: todas as 12 ventaneiras ativas ou 6 ventaneiras (1,3,5,8,10 e 12) ativas; (b) descrição esquemática dos parâmetros geométricos para testes de interação individual do jato submerso.

Quatro tipos de procedimentos foram efetuados. O primeiro deles para avaliar os tempos de mistura. Outro para avaliar, de forma individual, a interação do jato de gás efluente de um dos orifícios da lança e uma das plumas geradas pela injeção de gás pelas ventaneiras e a taxa de projeção resultante. Um terceiro procedimento para estimar a taxa de projeção quando da interação dos jatos da lança com as plumas de injeção. E um final, para estimar a emulsificação.

A determinação de tempo de mistura consiste na análise da dispersão de um traçador que é injetado na forma de pulso ao líquido contido no reator. O traçador utilizado é uma solução saturada de KCl. A dispersão do traçador é acompanhada por condutivímetros e dados de variação da condutividade são capturados por uma placa de aquisição A/D acoplada a um computador. Uma curva típica de dispersão é mostrada na Figura 2.b, onde se ressalta que o critério de conclusão da mistura foi

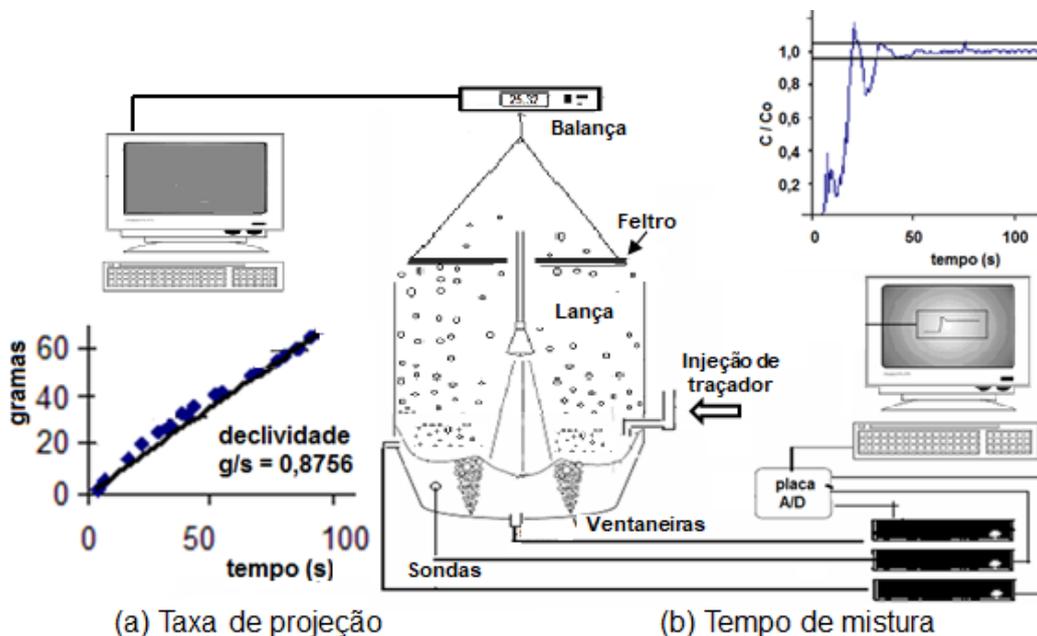
arbitrado entre 0,95 e 1,05 da concentração nominal de traçador. Este método é similar ao utilizado por Luomala et al. [5].

Para a determinação das condições operacionais do modelo em regime de semelhança adotou-se o procedimento descrito por Gasparini [4], que considerou os números adimensionais mais relevantes, como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Grupos adimensionais considerados para modelagem

Interação entre o jato e o banho metálico	Weber	$\frac{\rho_g u^2}{[\rho g \sigma]^{1/2}}$
Interação entre jatos, e jato - escória	Momento	$\frac{\rho_g u^2 d_l^2}{\rho g d_{lb}^3}$
Inércia do gás soprado e peso do líquido	Froude	$\frac{\rho_g u^2}{\rho g H}$
Inércia do gás injetado e peso do líquido	Froude	$\frac{\rho_g v^2}{\rho g H}$
Taxa específica de aporte de energia	$\epsilon$	$\frac{Q_F R T}{22,4 m} \left[ \ln 1 + \frac{\rho g H}{P_a} \right]$

Onde:  $\rho_g$  e  $\rho$  - massa específica do gás e do líquido ( $\text{kg/m}^3$ ) respectivamente;  $u$  = velocidade do gás soprado ( $\text{m/s}$ );  $\sigma$  = tensão interfacial líquido/gás ( $\text{N/m}$ );  $d_{lb}$  = distância lança/banho ( $\text{m}$ );  $H$  = altura do banho ( $\text{m}$ );  $d_l$  = diâmetro do furo da lança ( $\text{m}$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $v$  = velocidade do gás injetado ( $\text{m/s}$ );  $\epsilon$  = taxa de aporte de energia ( $\text{W/kg}$ );  $Q_F$  = vazão de gás injetado ( $\text{N L/s}$ );  $R$  = constante dos gases ( $\text{J/Kmol}$ );  $T$  = temperatura absoluta ( $\text{K}$ );  $m$  = massa de líquido ( $\text{kg}$ );  $P_a$  = pressão ambiente ( $\text{Pa}$ ).



**Figura 2.** Representação esquemática do aparato experimental para determinação: (a) da taxa de projeção; (b) do tempo de mistura e curva típica de dispersão do traçador.

A interação individual jato da lança – pluma de injeção foi investigada em modelo em separado, dotado de uma ventaneira ao fundo de um recipiente e um tubo inclinado, representando o orifício da lança, Figura 1.b. Foram realizados três testes para cada combinação: vazão pela lança ( $Q$ : 30; 40 e 50 L/min); vazão pela ventaneira ( $Q_F$ : 5,0, 7,5 e 10 L/min) e distância lança banho ( $d_{lb}$ : 4,0 e 6,5cm); distância do ponto de

impacto ao eixo da ventaneira (offd: +1,5 ; 0 e -1,5cm) , mantido fixo o ângulo em 17°.

A medição das projeções é realizada utilizando-se um obstáculo de feltro (colocado na parte superior do modelo) que absorve as gotículas de água ejetadas durante a prática de sopro combinado, Figura 2.a. Essa absorção causa variação no peso do tecido, sendo assim, através de uma balança de precisão e a placa de aquisição de dados, é possível obter a variação de massa do feltro em função do tempo. Este experimento foi baseado no método utilizado por Higuchi e Tago [7].

O processo de formação da emulsão foi estudado de forma a se levar em conta, além do sopro pela lança e da injeção de gás inerte pelo fundo do reator, gases produzidos por reações químicas ocorrentes na interface entre os dois líquidos partícipes da emulsão (gotas metálicas e escória). Para simular a escória empregou-se uma dispersão (proporção fixa) de bicarbonato de sódio em uma mistura de uma parte de querosene e três partes de óleo de motor 10W30 (propriedades finais: viscosidade 31,9 mPa.s, densidade 0,85 kg/m<sup>3</sup>) enquanto que o aço foi simulado por uma solução de ácido acético (4% em volume). Na ausência de reação química (sem adição de bicarbonato) se nota uma elevação inexpressiva das colunas de líquido; por outro lado a emulsificação é expressiva quando se tem o efeito de geração in situ de dióxido de carbono. Os testes, realizados de forma comparativa para diferentes vazões pela lança utilizando 6 ou 12 ventaneiras, com distância lança banho e ângulo de rotação fixos, foram filmados a partir de uma posição lateral, de maneira a permitir o registro da evolução da altura e quantidade de emulsão formada ao longo do tempo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

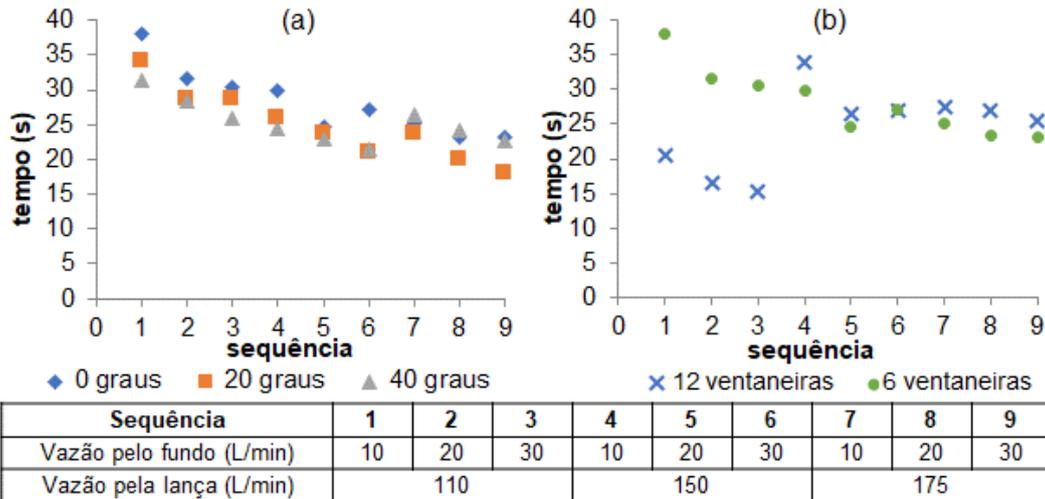
#### 3.1 Tempos de mistura

A Figura 3.a apresenta o tempo de mistura, para a configuração de seis ventaneiras e distância lança banho de 20 cm. Os dados estão ordenados de modo a ressaltar a influência da vazão de topo, pela lança, para três ângulos de rotação (0<sup>0</sup>, 20<sup>0</sup> e 40<sup>0</sup>) dos furos da lança em relação à primeira ventaneira, Figura 1.a.

Observa-se a tendência esperada de melhoria das condições de mistura em função do aumento de vazão pelo topo. Para algumas das configurações se observa influência do ângulo de rotação, mas não em magnitude importante. Uma análise de regressão *stepwise* destes dados sugere uma correlação (com menor significância para rotação da lança) entre as variáveis do tipo (Equação 3, R<sup>2</sup> = 77,78%):

$$t \text{ (s)} = 49,98 - 0,1241 \cdot Q - 0,2239 \cdot Q_F - 0,0710 \cdot \text{Rotação da lança } (^\circ) \quad (3)$$

Um comparativo das condições de mistura, para seis e doze ventaneiras, é mostrado na Figura 3.b. Como se nota as condições de mistura são piores para seis ventaneiras, mas apenas para as mais baixas vazões de sopro pela lança. A Figura 3.a sugere que a rotação da lança, de modo a diminuir interações jato-pluma, leva à obtenção de menores tempos de mistura. Isso justifica a deterioração das condições de homogeneização observada no arranjo de doze ventaneiras para vazões de 150 e 175 L/min em relação à 110 L/min pela lança (Figura 3.b).



**Figura 3.** Tempos de mistura em função de vazão de topo e vazão pelas ventaneiras para: (a) diferentes ângulos de rotação da lança em relação à primeira ventaneira, utilizando 6 ventaneiras; (b) influência do número de ventaneiras, seis ou doze, ângulos de rotação da lança 0°.  $d_{lb} = 20$  cm.

### 3.2 Interação individual jato – pluma

As equações seguintes apresentam um resumo referente à taxa de projeção em experimentos de Interação individual jato – pluma (Equação 4 e Equação 5):

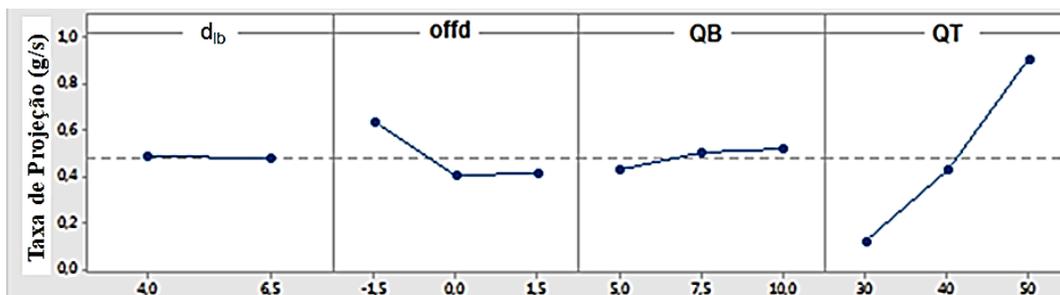
$$(g/s) = -1,075 - 0,0427 \text{ offd} + 0,03900 * Q_T \quad R^2 = 84\% \quad d_{lb} = 4,0 \text{ cm} \quad (4)$$

$$(g/s) = -1,038 + 0,03564 * Q_T \quad R^2 = 75\% \quad d_{lb} = 6,5 \text{ cm} \quad (5)$$

Note-se que, embora a vazão de ventaneira,  $Q_B$ , possa não aparecer explicitamente na expressão de regressão, existe interação entre o sopro pela lança e a pluma/cavidade provocada pela injeção de gás pela ventaneira. Esta interação é quantificada pelos parâmetros  $Q_T$  e  $\text{offd}$  (distância entre ponto de contato do jato com o banho e ventaneira – Figura 1.b).

Os dados destas duas séries foram agrupados, resultando na avaliação estatística seguinte (Equação 6). A Figura 4 apresenta curvas de efeito principal de cada uma das variáveis para taxa de projeção resultante da interação isolada de sopro e injeção. Agrupados, os dados ressaltam a forte influência de vazão pela lança e um efeito de interação, menos pronunciado, com a cavidade / pluma.

$$(g/s) = -1,092 - 0,0711 * \text{offd} + 0,03928 * Q_T \quad (6)$$

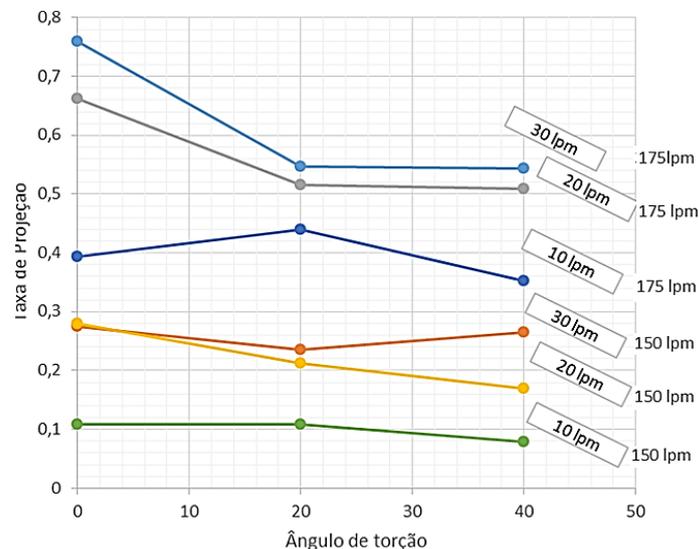


**Figura 4.** Curvas de efeito principal de cada variável para taxa de projeção resultante de interação isolada de sopro e injeção.  $d_{lb}$  é distância lança banho;  $\text{offd}$  é a distância entre o ponto de impacto do jato no banho e centro da ventaneira;  $Q_B$  é vazão pelas ventaneiras;  $Q_T$  é vazão pela lança.

Então se espera que a taxa de projeção dependa (além das vazões de sopro e injeção) da proximidade e disposição do ponto de impacto entre o jato do orifício da lança e a superfície do banho, medidas em relação ao cone da pluma formada pela injeção pelas ventaneiras. Entretanto ao se considerar os jatos dos vários orifícios da lança (seis) e as ventaneiras (seis ou doze) este efeito pode ser mascarado pelas interações entre os cones dos jatos e das plumas; como resultado, o efeito da rotação da lança.

### 3.3 Taxa de projeção para seis ou doze ventaneiras:

A Figura 5 apresenta os valores médios obtidos de taxa de projeção em função do ângulo de rotação da lança, para distância lança banho igual a 16cm e seis ventaneiras. Como se nota a taxa de projeção cresce com o aumento da vazão pelo topo; a partir de certo patamar de vazão de gás injetado pelas ventaneiras o efeito desta deixa de ser significativo. As maiores taxas de projeção são alcançadas para ângulo de rotação igual a zero e vazões pela lança maiores.



**Figura 5.** Taxa de projeção média em função do ângulo de rotação da lança destacando vazão pelo fundo. Seis ventaneiras.

Para vazão de 10 L/min pelo fundo, a interação jato-pluma é notavelmente menor e, portanto, não se observa grande influência da rotação sobre a taxa de projeção. Estes dados podem ser representados pela regressão seguinte (Equação 7,  $R^2 = 77,78\%$ ):

$$(g/s) = -1,94 + 0,0133*Q + 0,00955*Q_F - 0,00233 \text{ Rotação da lança } (^\circ) \quad (7)$$

Para a situação de doze ventaneiras os resultados experimentais incluem dois diâmetros de orifício, 1,5 mm e 2,0 mm, Figura 6. Como esperado verifica-se o aumento da taxa de projeção com a diminuição da distância lança-banho, com o aumento da vazão de gases injetados pelas ventaneiras e o aumento da vazão de oxigênio soprado pela lança, sendo esse último o mais expressivo nos resultados, como verificado por Fabritius et al [2]. O diâmetro de orifício de lança também afetou de forma significativa a taxa de projeção.

No caso de interação individual entre uma pluma e um jato da lança, portanto sem considerar possíveis interações entre os cones das plumas e dos jatos, se mostra que a taxa de projeção é alterada em função da posição relativa do ponto de impacto. Como se mostra na Figura 6, este efeito não é evidente com várias ventaneiras em operação e lança de múltiplos furos, indicando que não há condições de impacto direto.

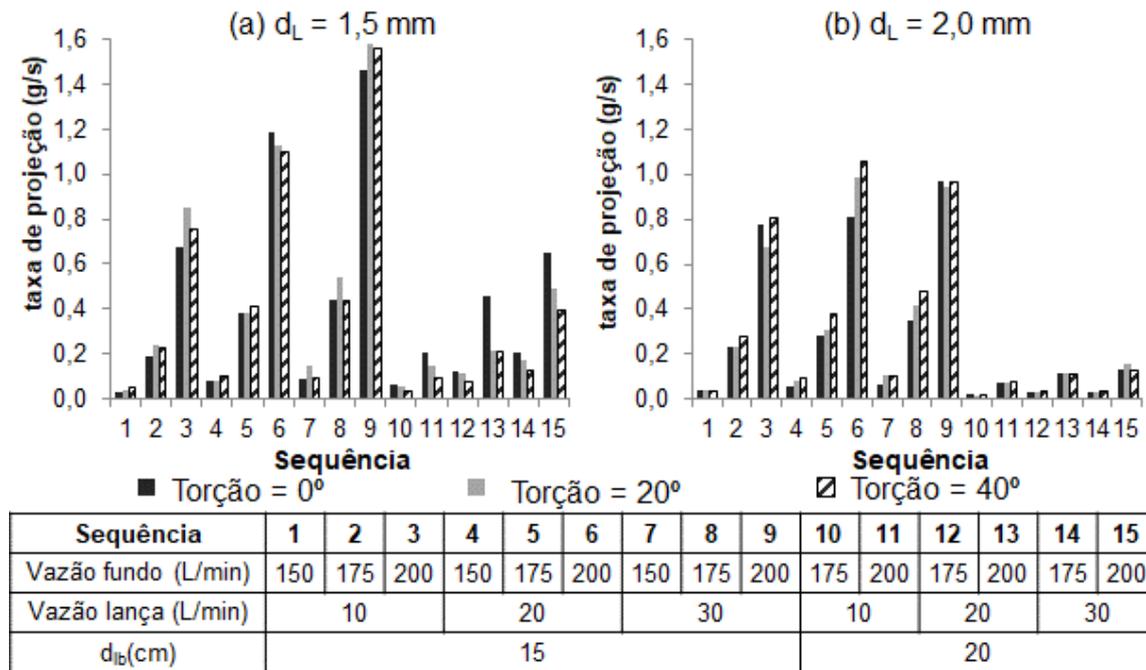


Figura 6. Taxa de projeção (g/s) em função das diferentes condições operacionais para orifício da lança: a) 1,5 mm e b) 2,0 mm. 12 ventaneiras.

Os dados de projeção, para as várias condições e um sistema de injeção de gás inerte com doze ventaneiras podem ser resumidos pela equação de regressão *stepwise*,  $\alpha = 0,15$  (Equação 8,  $R^2=0,8214$ ):

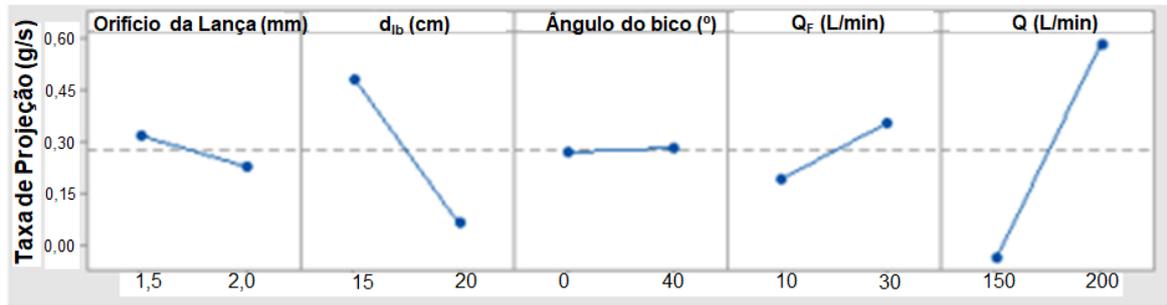
$$\left(\frac{g}{s}\right) = -0,541 + 0,01625 * Q + 0,01039 * Q_F - 0,10813 * d_{lb} - 0,2346 * d_l \quad (8)$$

A variável ângulo de rotação da lança em relação às ventaneiras não aparece na regressão, pois não afetou consideravelmente a taxa de projeção, como pode ser observado nas curvas de efeito principal de cada variável para taxa de projeção resultante de interação jato/banho, para sistema de doze ventaneiras (Figura 7). Como esperado, nota-se maior influência das variáveis distância lança banho e vazão de sopro pela lança.

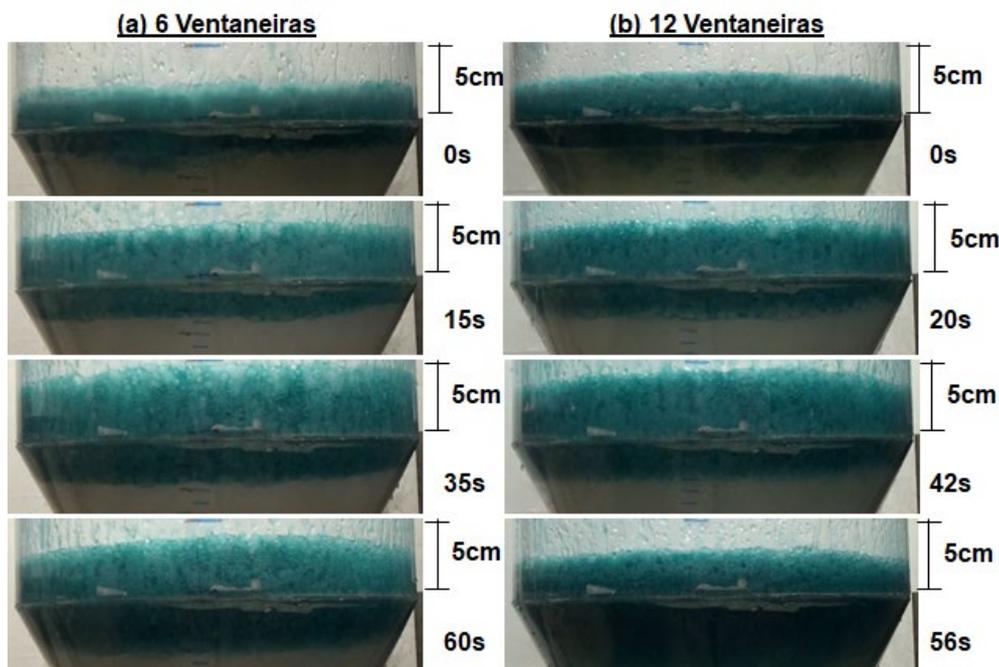
### 3.4 Formação de emulsão

A Figura 8 apresenta imagens capturadas das filmagens dos testes de emulsão para 6 e 12 ventaneiras (a e b, respectivamente) com vazões de 200 L/min pela lança e 30 L/min pelas ventaneiras. Considera-se o tempo “0 s” o instante em que se inicia o sopro pela lança que possibilita o crescimento efetivo da camada de emulsão. Destaca-se que a formação de emulsão só foi observada na presença de

bicarbonato de sódio no óleo, evidenciando que a formação de gás *in situ* é necessária para a formação da emulsão no modelo físico.



**Figura 7.** Curvas de efeito principal e de interação entre variáveis para taxa de projeção resultante de interação entre jato e banho, sistema com doze ventaneiras.  $d_{lb}$  é distância lança-banho;  $Q_F$  é vazão pelas ventaneiras;  $Q$  é vazão pela lança.



**Figura 8.** Emulsão para (a) 6 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras e (b) 12 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras.

Nota-se que a altura máxima da emulsão apresentou diferença conforme a configuração de ventaneiras, como se pode observar também na Figura 9. Essa diferença é mais significativa quando se altera as vazões de gás. Como observado nos testes de projeção, combinações que resultam em maior interação entre jato da lança e plumas intensificam a ejeção de gotículas. Em conformidade com isso, a maior altura atingida foi em uma configuração de maior taxa de projeção (Figuras 5 e 6). Nessa condição de maior projeção, gotas da solução ácida encontram com mais facilidade partículas de bicarbonato no óleo tornando mais intensa a formação de espuma.

A partir das filmagens de evolução da camada de espuma, construíram-se curvas relacionando a espessura da camada de espuma na parte superior do modelo (cilíndrica) em função do tempo. Pode-se observar que para a configuração de 6

ventaneiras, o crescimento da camada é ligeiramente mais rápido do que para 12 ventaneiras (Figura 10).

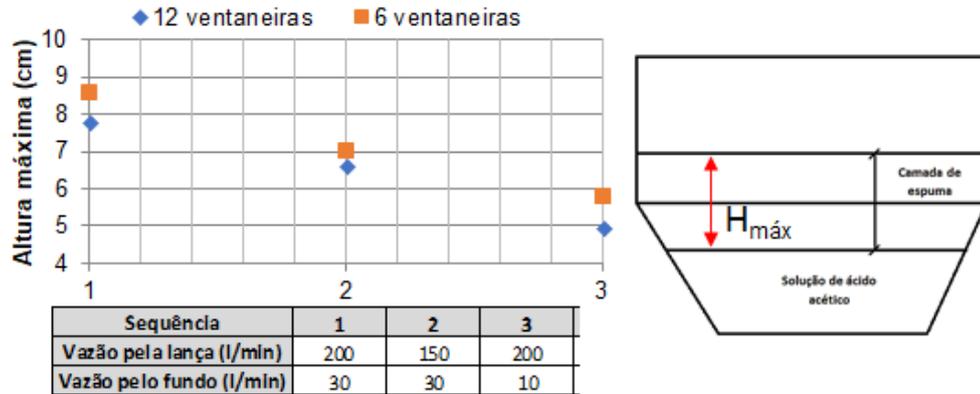


Figura 9. Espessura máxima da camada de espuma em função de condições operacionais (vazões pela lança e pelo fundo) para 6 e 12 ventaneiras.

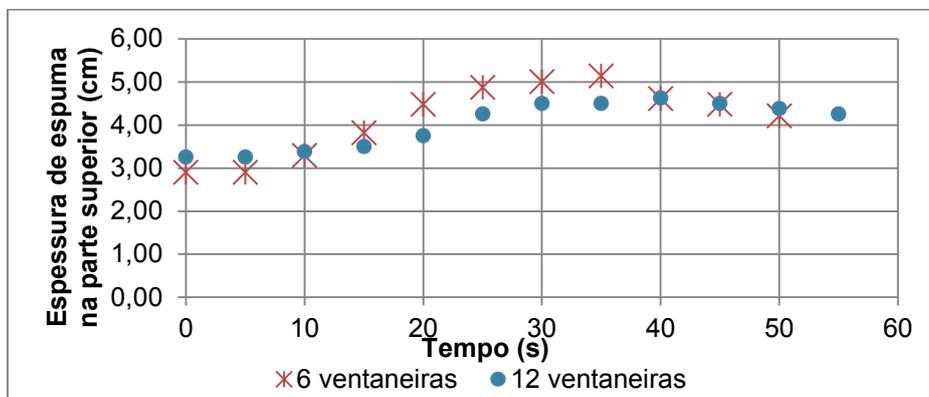


Figura 10. Espessura da camada de espuma na parte superior (cilíndrica) do modelo em função do tempo para 6 e 12 ventaneiras com vazões pela lança e pelo fundo fixas em 200 L/min e 30 L/min respectivamente.

Analisando-se com mais detalhe a influência das vazões pelo fundo e pela lança, nota-se que a altura máxima atingida parece ser mais sensível à primeira do que à última. Isso foi avaliado a partir da Equação 9, que leva aos resultados mostrados na Tabela 2.

$$\text{Sensibilidade à vazão de fundo ou da lança} = \frac{h_{\max(\text{vazão } A)} - h_{\max(\text{vazão } B)}}{Vazão_A - Vazão_B} \quad (9)$$

Tabela 2. Sensibilidade da altura máxima em relação às vazões pela lança e pelo fundo.

Sensibilidade à vazão pelo fundo (12 vent.)	0,05225
Sensibilidade à vazão pela lança (12 vent.)	0,01618
Sensibilidade à vazão pelo fundo (6 vent.)	0,0855
Sensibilidade à vazão pela lança (6 vent.)	0,0188

Esses valores sugerem que a vazão pelas ventaneiras tem maior influência sobre a formação de emulsão do que a vazão pela lança.

Em todas as configurações analisadas foi observado o fenômeno de emulsão reversa: após atingir a altura máxima de espuma e decaimento da mesma, o óleo mistura em sua totalidade com a solução de ácido acético ocupando todo o modelo. Isso provavelmente se deve à pequena diferença de densidade entre as fases.

## 4 CONCLUSÃO

- Observou-se que, naturalmente, condições de maior agitação implicam em menores tempos de mistura sendo que a vazão pelo fundo é o fator de maior influência. A rotação da lança influenciou na redução do tempo de mistura em configurações com menor interação jato/pluma.
- Nota-se que o aumento da vazão dos gases e a diminuição do diâmetro do orifício da lança e da distância lança-banho aumentam a taxa de projeção e que os fatores de maior influência são a vazão pela lança e a distância lança-banho. A alteração do ângulo de rotação da lança não apresentou grande influência na taxa de projeção no modelo com doze ventaneiras, mas apresentou diminuição no arranjo de seis ventaneiras.
- Observou-se que a geração de gás in situ foi fundamental para a formação de emulsão no modelo físico e que a configuração com seis ventaneiras apresentou velocidade de formação da espuma superior à configuração com doze ventaneiras. Modo geral, as condições de maior projeção formam espumas que atingem maior altura, sendo que a altura máxima de emulsão foi mais sensível à vazão pelo fundo e, em menor grau, à vazão pela lança.

## Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES, à Fundação Gorceix e à FAPEMIG pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 Albani CB, Furtado HS, Oliveira JR. Estudo das Causas de Projeções de Escória no Convertedor LD. In: 48º Seminário de Aciaria, Fundação e Metalurgia de Não-Ferrosos; 2017; São Paulo, Brazil. São Paulo: ABM; 2017. p. 289-298.
- 2 Fabritius TMJ, Luomala MJ, Virtanen EO, Tenkku H, Fabritius TLJ, Siivola TP, Härkki JJ. Effect of Bottom Nozzle Arrangement on Splashing and Spitting in Combined Blowing Converter. ISIJ International, v. 42, n. 8, p. 861-867, 2002.
- 3 Santos VAS. Efeito de Algumas Condições Operacionais Sobre a Taxa de Projeção de Aço no Convertedor de Sopro Combinado. 2018. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto, 2018.
- 4 Gasparini VM. Simulação a Frio de um Reator de Sopro Combinado. 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, UFOP, Ouro Preto.
- 5 Luomala MJ, Fabritius TMJ, Härkki JJ. The Effect of Bottom Nozzle Configuration on the Bath Behavior in the BOF. ISIJ International. 2004; 44(5):809-816.
- 6 Higuchi Y, Tago Y. Effect of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process. ISIJ International. 2003; 43(9):1440-1414.
- 7 Lai Z, Xie Z, Zhong L. Influence of Bottom Tuyere Configuration on Bath Stirring in a Top and Bottom Combined Blown Converter. ISIJ International. 2008; 48(6):793-798.
- 8 Das AK, Chatterjee A, Ray HS. Role of Dispersed Gas Bubble Agitation in Steelmaking. ISIJ Int., 1989; 29(4):284-290.
- 9 Luz AP, Martinez AGT, López F, Bonadia P, Pandolfelli VC. Slag foaming practice in the steelmaking process. Ceramics International. 2018;44(8):8727-8741.
- 10 Lahiri AK, Pal S. Foaminess of slag: cause and control. VII Int. Conf. on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004:473-478.
- 11 Misra P, DeO B, Chhabra RP. Dynamic model of Slag foaming in oxygen steelmaking, ISIJ International. 1998;38(11):1225-1232.