

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE MISTURA EM MODELO FÍSICO DO CONVERTEDOR LD UTILIZANDO BICOS 04 FUROS VARIANDO ÂNGULO VERTICAL¹

Breno Totti Maia²
Ronan Almeida Faustino³
Gustavo Abreu⁴
Bernardo Costa⁵
Roberto Parreiras Tavares⁶

Resumo

O objetivo de reduzir o tempo de sopro em processos de fabricação de aço através de convertedores BOF levou a necessidade de desenvolver meios que permitam acelerar a interação oxigênio e o banho metálico. Para aciarias, há uma tendência dos bicos de lança terem maiores ângulo verticais de acordo com o aumento da capacidade de produção do convertedor. Os bicos de lança com maiores ângulos de jato promovem jatos independentes e são uma tecnologia que atende aos objetivos do processo e do custo da implantação. Neste trabalho, um modelo a frio foi utilizado para comparar bicos com ângulos de aberturas diferentes, vazão e distância da lança ao banho e seus efeitos no tempo de mistura de uma solução ácida. Os menores resultados de tempo de mistura foram alcançados com o ângulo vertical de 12° com geometria suavizada associado com vazão elevada e curta distância lança banho.

Palavras-chave: Convertedor; Modelo físico; Ângulo com vertical; Tempo de mistura.

EFFECT OF BLOW PARAMETERS IN THE MIXING TIME USING PHYSICAL MODEL OF BOF CONVERTER

Abstract

The goal to reduce the blow time in steel process by BOF converter brought developments in techniques to increase the interaction oxygen and metallic bath. It is a tendency to increase the vertical angle between tip holes according to BOF's production capacity. Lance tips with larger angle between holes promote independent supersonic jets and they are technology that reach the process aim and implementation costs. This paper utilizes a cold physic model to compare mixing time in a acid solution when the angles between tip holes, airflow and bath-lance distance are changed. Results indicate 12° tip with smoothed geometry associated with high airflow and low bath-tip distance produce lower mixing times.

Key words: Converter; Physical model; Vertical angle between tip holes; Mixing time.

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

² Engenheiro Metalurgista. Sócio da ABM. Pesquisador da Lumar Metals, Santana do Paraíso, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, sócio da ABM. Assessor Técnico, Ferbasa, Pojuca, Brasil.

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

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

⁶ Engenheiro Metalurgista, Doutor e Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de aço pelo processo BOF (*Basic Oxygen Furnace*) é responsável atualmente por aproximadamente 60% da produção mundial de aço.⁽¹⁾ Este processo tem como característica a composição de carga metálica de aproximadamente 80% de gusa líquido e o restante de sucata.

Das etapas de produção do aço, o sopro é a que consome a maior parte do tempo no ciclo de uma corrida, correspondendo a cerca de 60% para o processo BOF.⁽²⁾ Desta forma, a redução do tempo de sopro implica em aumento direto da capacidade de produção. Para reduzir o tempo de sopro é necessário aumentar a velocidade de descarburização, que por sua vez, é afetada pela vazão de oxigênio, sua penetração e mistura no banho metálico.⁽³⁾

A realização de testes no ambiente industrial é muitas vezes difícil devido às altas temperaturas inerentes ao processo e pelo ônus que tal procedimento acarretaria. Sendo assim, lança-se mão das simulações físicas que sustentadas pelos critérios de similaridade representam bem os fenômenos do processo e levam a resultados satisfatórios do processo simulado. O uso de modelos físicos para testes tem como vantagens o custo reduzido e a segurança para realização dos ensaios, uma vez que na maioria dos casos estes são realizados em temperaturas próximas do ambiente.⁽⁴⁻⁶⁾

No processo de descarburização um tempo de mistura menor indica descarburização mais eficiente, sendo assim o efeito das diferentes configurações no tempo de mistura é um bom indicativo para o comportamento da descarburização.⁽⁷⁻¹⁰⁾ O presente trabalho pretende através do modelo físico do BOF, avaliar o efeito de diferentes configurações de bico de lança, vazões e altura de lança sobre o tempo de mistura assim como o perfil de movimentação do banho e a penetração do jato supersônico.

2 METODOLOGIA

Os experimentos foram feitos no modelo físico do Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP) da Escola de Engenharia da UFMG, usando água para simular o banho metálico e sopro de ar comprimido simulando o oxigênio dos convertedores industriais. O modelo físico em acrílico representa um convertedor de 220 toneladas de aço por corrida. O convertedor pode ser dividido basicamente em três partes: a parte superior em forma de tronco de cone, a parte central, um cilindro de diâmetro de 68 cm e a parte inferior com fundo abaulado. O modelo em acrílico foi construído na escala de 1/8 em relação ao reator industrial (Figura 1). O vaso foi preenchido com água na altura que representa o nível do banho metálico. Na saída do sistema de ar comprimido os bicos de lança foram conectados. A distância da lança até o nível do banho foi um dos parâmetros operacionais investigados, representando situações de sopro duro e sopro mole para o convertedor LD. Para alimentar o sistema com ar comprimido foi utilizado um compressor 22,5 kW, capaz de fornecer $7,87 \times 10^5$ Pa de pressão máxima e uma vazão máxima de $189 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os bicos de lanças usados na série de experimentos no convertedor BOF têm bocais com diferentes inclinações com relação à vertical e mesmos diâmetros de saída.



Figura 1. Dimensões do modelo físico do convertedor BOF.

Os experimentos foram conduzidos comparando os efeitos do ângulo com a vertical e a suavização da geometria do bocal. A Figura 2 apresenta vistas de cima e em corte com as diferenças entre os bicos.

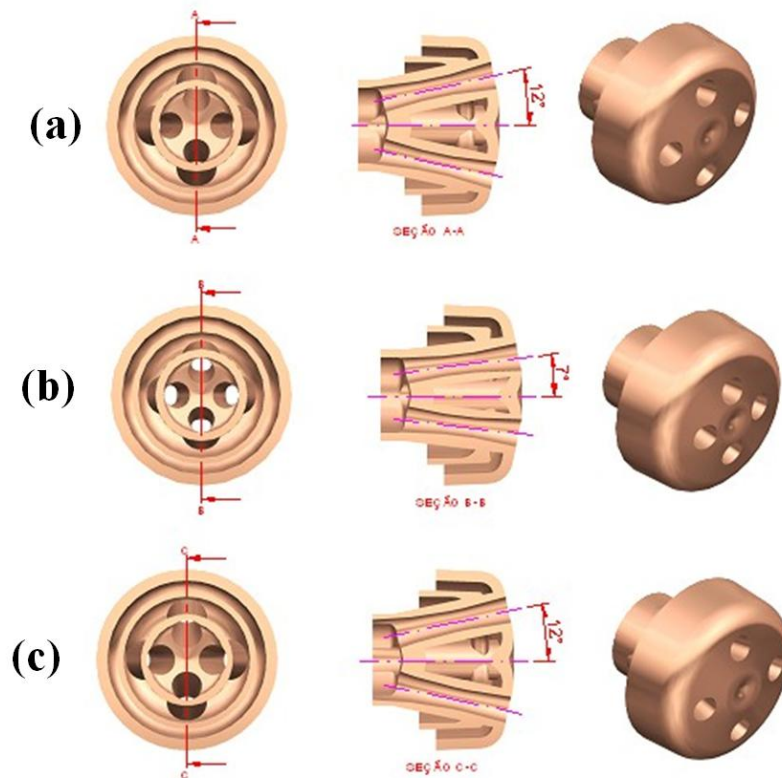


Figura 2. Comparação entre (a) bico normal com 12° em relação a vertical; e (b) bico normal com 7° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

Nas Figuras 2a e 2b é possível notar o aumento do ângulo com relação à vertical com o afastamento dos bocais em relação aos outros. Na Figura 2c a atenção deve ser dada à geometria interna do bocal, constituída de uma parábola que vai do trecho convergente ao trecho divergente, tendo como objetivo reduzir o comprimento do segmento reto do diâmetro crítico, apresentado em detalhes na Figura 3. Segundo Maia et al.,⁽¹¹⁾ o trecho reto na região da garganta provoca queda na eficiência de transição das propriedades do gás e conseqüente perda na penetração do jato.

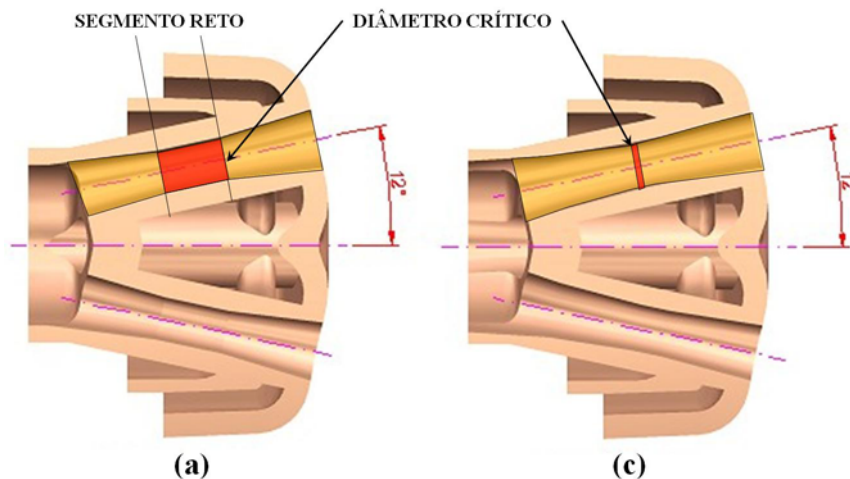


Figura 3. Detalhe da diferença construtiva entre: (a) bico normal com 12° em relação a vertical e (c) bico com bocal suavizado e 12° com relação a vertical.

A similaridade entre as velocidades do gás durante o sopro pode ser comprovada utilizando o número de Mach.⁽¹³⁾ Segundo Meidani et al.,⁽¹⁴⁾ a profundidade de penetração do jato de gás depende dos números de Froude, Reynolds e Weber modificados para o líquido, refletindo a relação entre as forças da gravidade, viscosas e forças de tensão superficial para o jato. A Tabela 1 apresenta uma comparação de valores entre os adimensionais com os parâmetros da indústria e os parâmetros do modelo físico a frio.

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

	Símbolo	Unidade	Descrição	Industrial	Modelo físico
Números adimensionais	Ma	#	Número de Mach	2,07	2,01
	Fr*	#	Froude modificado	0,0357	0,04616
	Re*	#	Reynolds modificado	7,19E+05	9,09E+04
	We*	#	Weber modificado	4,399E+03	2,076E+03

Os experimentos realizados alterando as configurações de bico, as alturas de lança e as vazões de sopro. A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos ensaios que tentam avaliar o efeito do ângulo vertical entre furos nos bicos.

Tabela 2. Parâmetros variados nos ensaios com variação do ângulo em relação à vertical

Configuração de bico	Alturas	Vazões
7°	0,250m	160 Nm ³ /h
12°	0,180m	130 Nm ³ /h
12° suavizada	0,117 m	100 Nm ³ /h

A avaliação dos tempos de mistura foi feita utilizando solução do sal KCl 2M adicionado a água.⁽¹⁵⁾ Na lateral, no fundo e em uma posição intermediária foram instalados três sensores de condutividade elétrica, construídos no próprio laboratório utilizando placas de aço inoxidável (Figura 4).

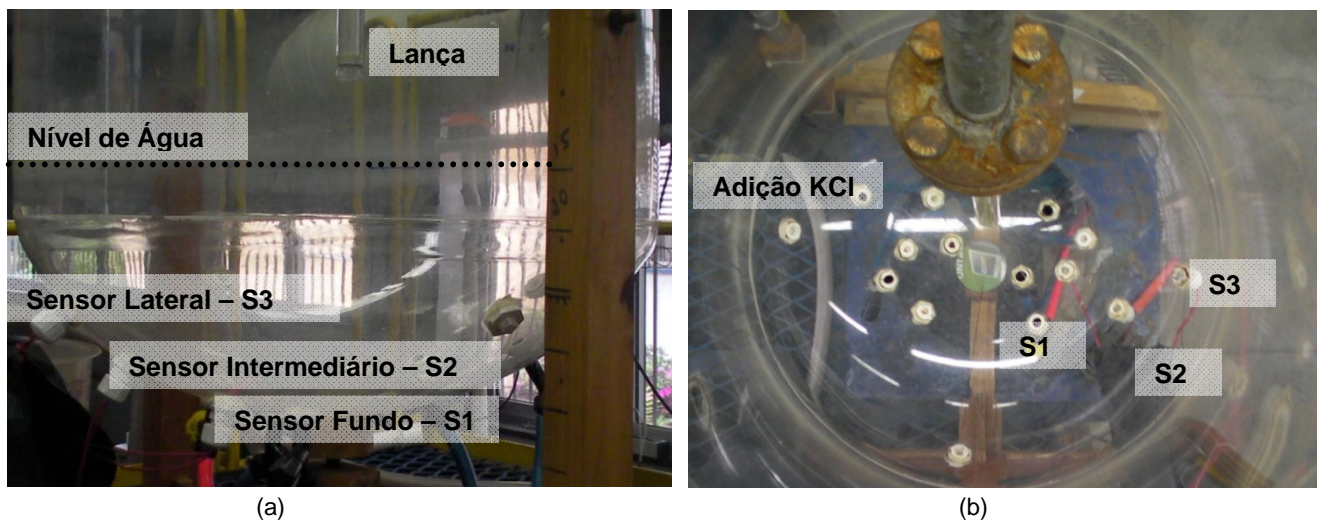


Figura 4. Posicionamento dos sensores no modelo do convertedor: (a) vista lateral; e (b) vista de topo.

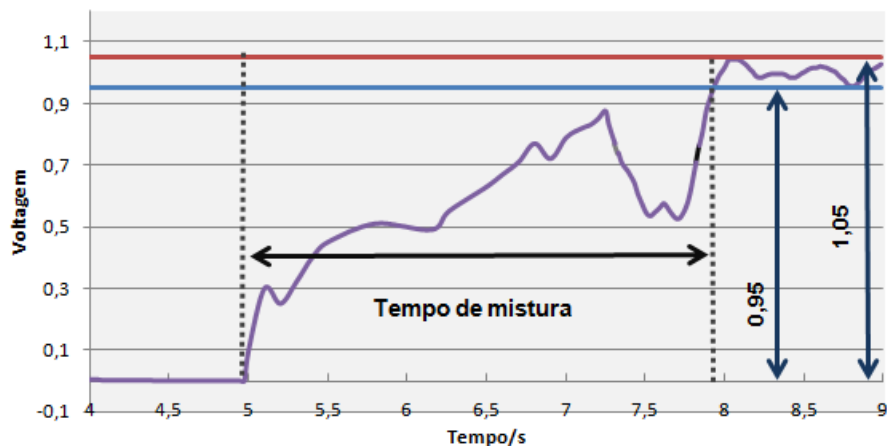


Figura 5. Esquema do critério de avaliação para determinar tempo de mistura.

A coleta dos dados foi realizada por um computador equipado com placa de aquisição de dados e software específico, que fornece a variação da tensão versus tempo nos pontos de medição instalados. A forma de injeção do sal foi semelhante à adotada por Diaz-Cruz et al.,⁽¹⁶⁾ o ponto de injeção se situa na região diametralmente oposta aos sensores. Os valores máximos e mínimos de tensão serão utilizados para transformar a tensão em valores adimensionais de forma a facilitar as análises (Figura 5).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma primeira análise será feita apresentando os resultados de tempo de mistura obtidos para os experimentos considerando todos os tipos de bicos testados na Figura 6.

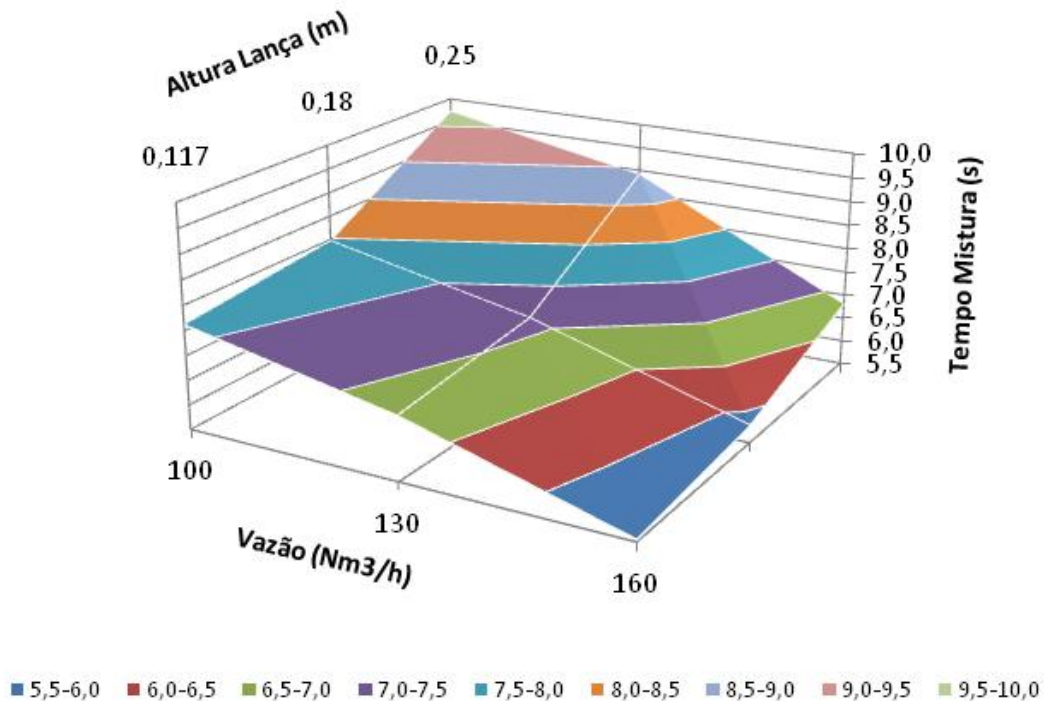


Figura 6. Tempo de mistura em função da vazão e altura de lança.

Na Figura 6 é possível notar uma confirmação da prática industrial, pois os menores tempos de mistura são obtidos através da menor altura de lança e da maior vazão. As variações de comportamento estão associadas aos tipos de bico de lança testados envolvendo variação no ângulo com a vertical e concepção da geometria de saída. Contudo é importante lembrar que o banho líquido foi representado apenas por uma fase e nos processos industriais a fase escória é formada ou alterada continuamente durante o processo podendo interferir na decisão dos operadores sobre os parâmetros desenvolvidos neste estudo.

3.1 Efeito de Ângulo dos Bicos em Relação à Vertical nos Tempos de Mistura

A análise realizada nestes ensaios mostra os resultados obtidos para os bicos 7°, 12° e 12° com geometria suavizada (aqui representado por 9,5). A Figura 7 mostra o resultado dos tempos de mistura para o sensor no fundo, posição S1 do convertidor. O comportamento do tempo de mistura no fundo mostrou-se independente do tipo de bico para altura de 0,250. Para alturas intermediárias, 0,150 m a 0,180 m e bico com geometria suavizada, o aumento da vazão não reduz o tempo de mistura. Isso é oposto ao comportamento esperado. A hipótese levantada reside no fato do sensor do fundo ser o que está mais próximo da região de impacto do jato gerando uma região ao qual o sal adicionado é sistematicamente afastado pelo jato que toca no fundo do convertidor.

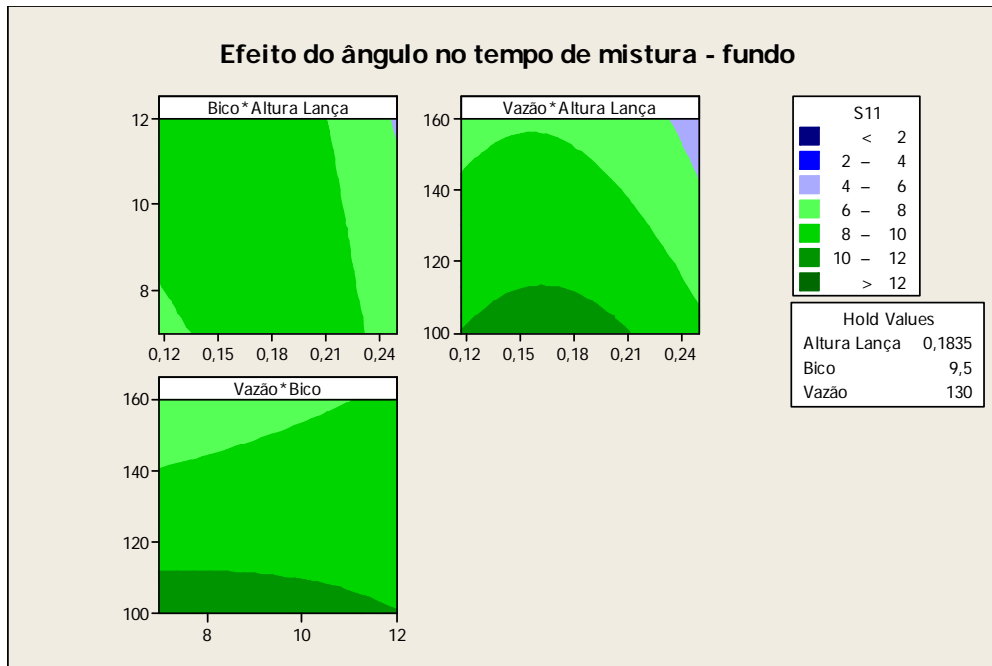


Figura 7. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado no fundo do convertidor, sensor S1.

A Figura 8 mostra os resultados de tempo de mistura para sensor S2, alturas abaixo de 0,150 m, o bico 7° é melhor, já para alturas acima de 0,210 m é mais adequado o uso de bicos com 12°. O bico de geometria suavizada é semelhante tanto para alturas inferiores a 0,150 m quanto para superiores a 0,210 m. Para essa região o tempo de mistura é menor para vazões acima de 140 Nm³/h e condições de sopro duro e sopro mole.

No sensor lateral, S4 (Figura 9), mostra que para maior vazão o bico mais adequado é o de geometria suavizada, que fornece os menores tempos. Nota-se que para este sensor maiores vazões e maiores alturas fornecem tempos melhores.

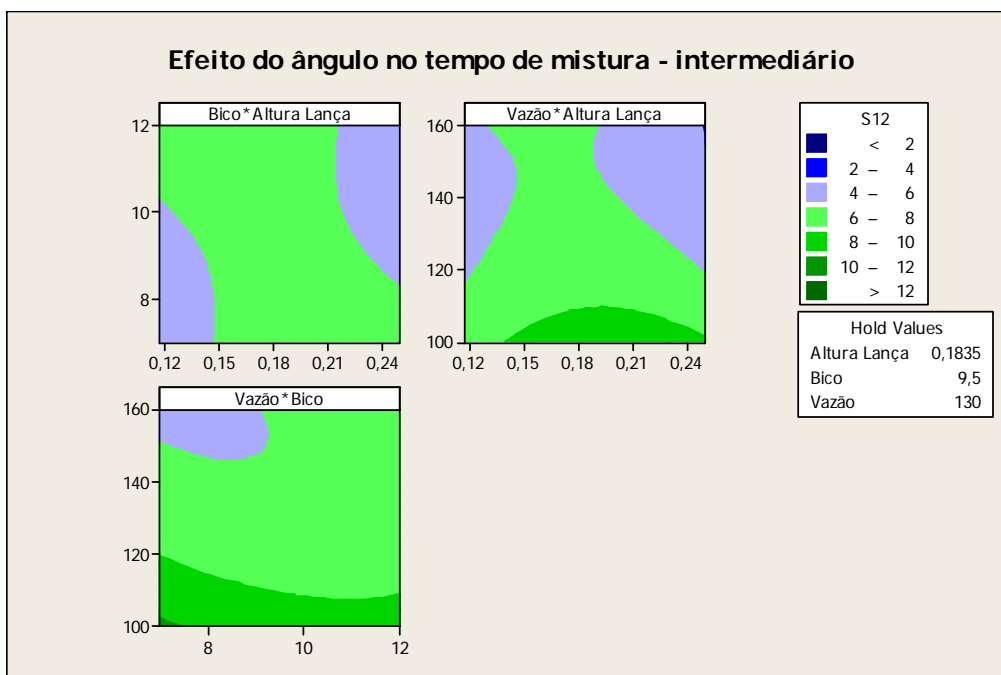


Figura 8. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado na posição intermediária do convertidor.

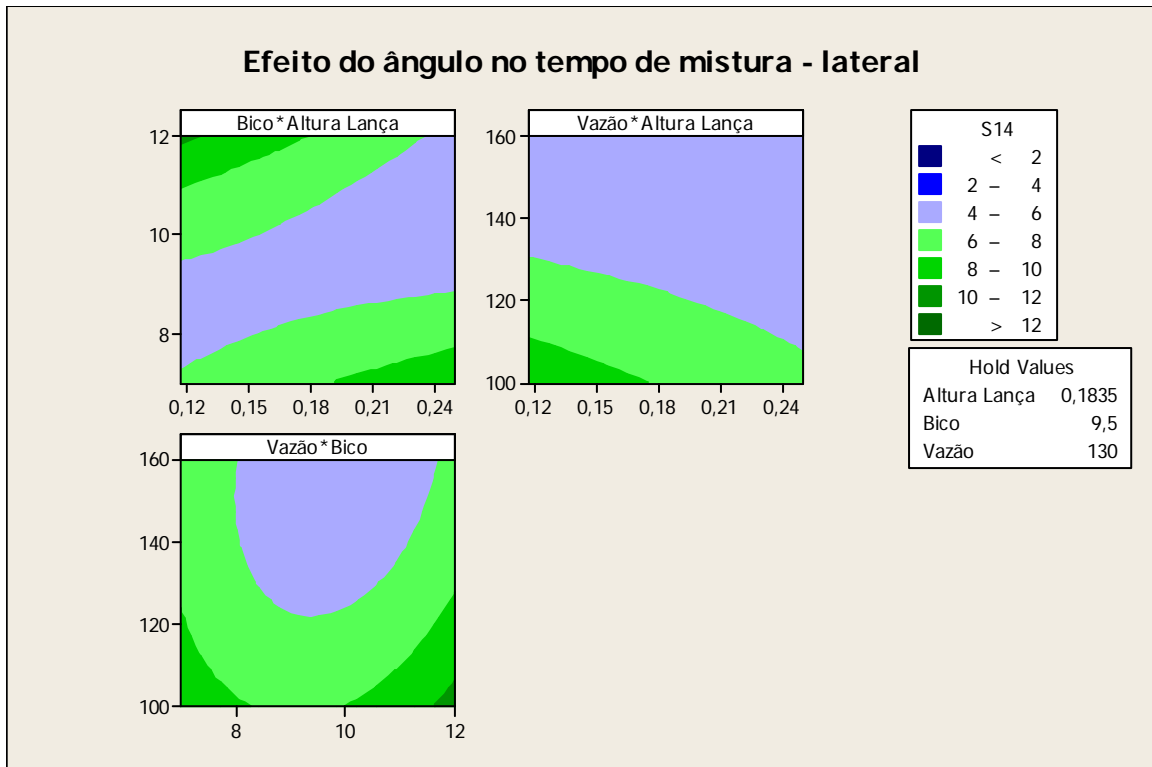


Figura 9. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado na lateral do convertidor.

Industrialmente, não se pode escolher um tipo de bico para cada região do banho, então o bico mais adequado será aquele que conciliar o menor tempo de mistura em todas as regiões do convertidor, considerando as diversas alturas durante o sopro da corrida.

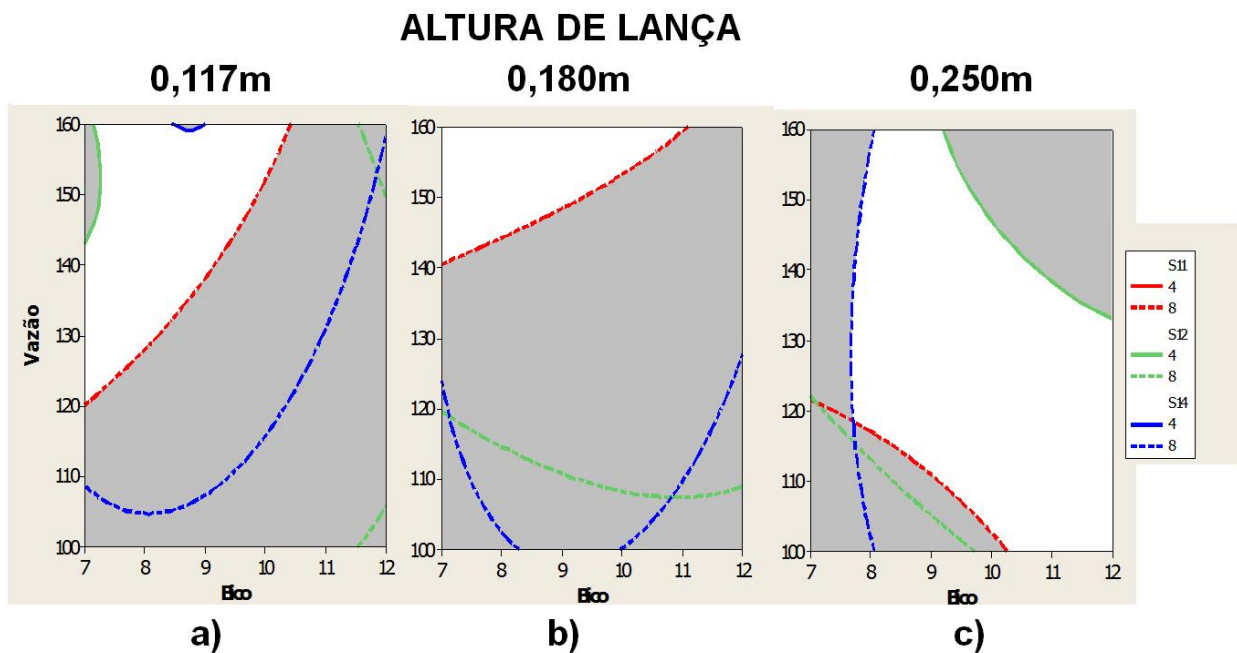


Figura 10. Sobreposição de superfície de contorno para os tempos de mistura entre 4 s e 8 s para as alturas de lança: (a) 0,117m; (b) 0,180; e (c) 0,250 para bicos com ângulo em relação vertical.

Na Figura 10 são apresentados os resultados de ambos sensores para as diferentes alturas. Para altura de 0,117 m a configuração ideal seria de vazões acima de 130 Nm³/h e com ângulos inferiores a 12° com geometria suavizada (Figura 10a). Para altura de 0,180 m (Figura 10b), vazões mais adequadas são acima de 140 Nm³/h para o bico 7° e próximas as 160 Nm³/h para o bico de geometria suavizada. Para altura de lança de 0,250 m, o menor tempo de mistura é alcançado para os bicos 12° normal e 12° com geometria suavizada com vazões acima de aproximadamente 110 Nm³/h (Figura 10c). O processo industrial é muito mais complexo, deve ser levada em consideração formação de escória, evolução de gases do banho, fusão de sucata, tipo e qualidade de sucata sendo enforada, entre outras variáveis. Sendo assim os resultados devem ser analisados sabendo de suas limitações quanto à aplicação direta na prática. Para os bicos com ângulo em relação à vertical a configuração com melhor resultado foi o bico 12° com geometria suavizada com a vazão máxima, neste caso 160 Nm³/h. É interessante notar que para este bico, um sopro mole teria bons resultados, sendo adequado para cargas com alto teor de fósforo.

4 CONCLUSÕES

Das análises dos tempos de mistura, determinados pelos 3 sensores, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- o menor tempo de mistura para os bicos com ângulo em relação à vertical é alcançado para o bico 12° com geometria suavizada, para a vazão 160 Nm³/h; e
- aumento da vazão diminui o tempo de mistura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Minas Gerais pelas as dependências do Laboratório de Simulação de Processos e insumos para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- 1 GONÇALVES, W. M. Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG, 1995. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica.
- 2 FARIA, M.A.A. Apostila do curso de Aciaria a Oxigênio da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, capítulo 4, 2011.
- 3 MUNDIM, M.J. Tecnologia de Fabricação de Aço Líquido. v.2 - Aciaria LD. UFMG, 3ed. Belo Horizonte: 1980.
- 4 BARBOSA, F. A. Modelamento Matemático e Físico do Escoamento do Aço Líquido em Diferentes Projetos de Distribuidor do Lingotamento Contínuo da USIMINAS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 188p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 5 SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA, C. A., SILVA, I. A., Fenômenos de Transporte: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010. P.812.
- 6 SZEKELY, J.,THEMELIS, N. J., Rate Phenomena in Process Metallurgy. 1 ed. Montreal: John Wiley & Sons, 1971. 784p.

- 7 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.
- 8 LEE, C. K., NEISON, J. H., GILCHRIST, A. Correlation of the Decay Characteristics of Jets from Multi-nozzle Oxygen Lances with the Performance of the Charge in Steel Converters, *Iron and Steel Internacional*, p.175-184, jun.1977.
- 9 LEE, C. K., NEISON, J. H., GILCHRIST, A. Effects of Nozzle Damage in Multi-hole Oxygen Lances on the Blow Produced in Steel Converters, *Iron and Steel Internacional*, p.399-410, dec.1977.
- 10 KAWAKAMI, K, Kinetics of Blowing Reaction in a Basic Oxygen Furnace, *Journal of Metals*, p.836-845, jul.1966.
- 11 TAKATSUKA, Y, IGUCHI, M, Effect of Swirl Motion on Mixing Time in Water Bath Agitated by Upward Gas Injection, *ISIJ Internacional*, v.41, n.2, p124, fev.2001.
- 12 MAIA, B. T., BARROS, J. E. M., NASCIMENTO, L.M., GUERRA, M. S. L.,TAVARES, R. P. Estudo do efeito da pressão e da geometria de bocal de lança no comportamento supersônico do oxigênio através de análise por CFD. 42ºSeminário de Aciaria Internacional,Salvador,Bahia. 2011.
- 13 CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 14 MEIDANI, A. R. N., ISAC M.,RICHARDSON, A., CAMERON, A., GUTHRIE, R. I. L., Modelling Shrouded Supersonic Jets in Metallurgical Reactor Vessels, *ISIJ Internacional*, v.44, n.10, p.1639, out. 2004.
- 15 HIGUCHI, Y, TAGO, Y, Effecto of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, *ISIJ Internacional*, v.43, n.9 p1410, set.2003.
- 16 DIAZ-CRUZ, M., MORALES, R. D., OLIVARES, O., ELIAS, A. Physical and Mathematical Models of Gás-Liquid Dynamics in BOF Converters. 2002 Steelmaking Conference Proceedings. p737-748.