

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOPRO NO TEMPO DE MISTURA UTILIZANDO MODELO FÍSICO DE CONVERTEDOR¹

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

Resumo

O objetivo é reduzir o tempo de sopro no convertedor BOF através de desenvolvimento de técnicas que aumentem a interação do oxigênio com banho metálico. Para algumas plantas muitas das modernas soluções necessitam investimentos elevados. Bocais com torção é uma tecnologia que pode atender aos objetivos de tempo de sopro e custo de investimento. Neste trabalho, um modelo a frio foi utilizado para comparar bocais com torção, bicos com inclinação, vazão e distância lança-banho e seus efeitos no tempo de mistura de uma solução ácida. Os melhores resultados foram alcançados com bocais com torção, vazão elevada e pequena distância lança-banho.

Palavras-chave: Convertedor; Modelo físico; Torção; 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. To small steelplants many solutions are most expensive. The twist nozzles are the technology that can attempt both targets; blown time and investments' costs. In this work, the cold model was use to compare twist nozzles, flow and lance-bath distance and the effects in the acid solution mixing time. The best results were reaches with twist angle and right flow rate and short lance-bath distance.

Key words: Converter; Physical model; Twist nozzle; Mixing time.

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

² *Eng. Metalurgista, Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM, Santana do Paraíso, Brasil.*

³ *Eng. Metalurgista, UFMG, sócio da ABM, Belo Horizonte, Brasil.*

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

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

⁶ *Eng. Metalurgista, Dr. e Prof. do Depto. de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A principal função da lança de oxigênio no refino do aço em convertedores é o fornecimento de oxigênio para eliminação de impurezas contidas na carga metálica, e não relegando a um segundo plano, a redução do tempo de processamento de fabricação do aço. Traduzindo de forma mais científica, a energia cinética do jato de oxigênio é transferida para o banho metálico criando turbulência requerida para induzir as reações de refino. Nas primeiras aplicações comerciais do processo LD, foram utilizadas lanças com um único furo central em convertedores de 30 toneladas a 100 toneladas. Com a entrada em operação de unidades de tamanhos maiores de convertedores, objetivando manter-se a mesma produtividade sem aumentar o tempo de refino, elevou-se as vazões de oxigênio.⁽¹⁻⁴⁾ Entretanto, apareceram efeitos colaterais tais como: penetração profunda do jato no interior do banho metálico afetando o revestimento refratário; perturbações excessivas durante o sopro tendo como consequências projeções de escória e de metal e, principalmente, o aumento da taxa de descarbonização, porém promovendo uma deficiente desfosforação, direcionaram toda a evolução para o uso de lanças com multi furos.⁽²⁾ Desde o início do processo LD até a presente data, a lança de oxigênio desempenha papel crucial no processo de fabricação do aço.

O jato de oxigênio ao sair de um dos furos do bocal sofre interações com o ambiente do convertedor que reduzem velocidades supersônicas de gases para sônicas e subsônicas. Imediatamente ao deixar o bocal o jato subsônico entra em contato com o meio ambiente, e as camadas mais externas interagem, havendo transferência de condições térmicas, momento e massa.⁽⁵⁾

As forças tangenciais entre o meio ambiente e o jato, promovem arrastes de uma maior quantidade de gases do ambiente para dentro do jato causando um aumento de massa deste, mas reduzindo a velocidade ao longo do tempo. A interação entre os dois meios ocorre nas interfaces, desenvolvendo um gradiente de velocidade, temperatura e massa com um perfil de distribuição normal em relação à linha de centro do jato.⁽⁶⁾

À temperatura ambiente, na região inicial de núcleo potencial, com distância correspondente de 3 a 7 vezes o diâmetro externo do bocal, a velocidade no centro do jato permanece inalterada, com valor igual à velocidade de saída do bocal.

Após a região de núcleo potencial ou fluxo potencial, tem-se pequena região de transição, vindo a seguir uma região de fluxo totalmente desenvolvido, contendo perfis de velocidade iguais em relação a outras seções transversais ao centro do jato.

Na região seguinte a do núcleo potencial, a velocidade no centro do jato decresce, mantendo-se maior do que a velocidade do som. Esta região a qual a velocidade axial do jato é maior do que a velocidade sônica é denominada como cone supersônico, e inclui o núcleo potencial. Além do cone supersônico, encontra-se uma região subsônica, similar à região de fluxo totalmente desenvolvida em um jato subsônico. Na Figura 1 é apresentado as regiões do jato supersônico obtidos através do Método de Schlieren.

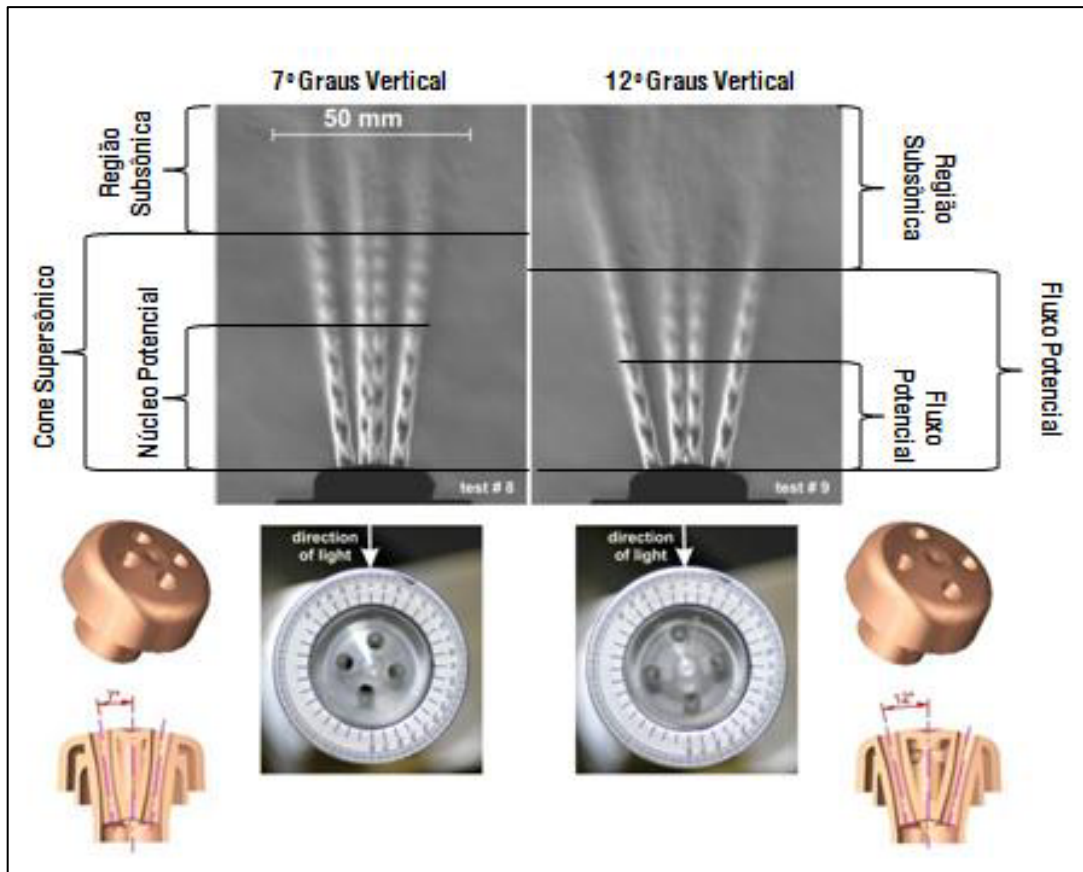


Figura 1. Regiões do jato supersônico para bicos multifuros (Método Schlieren).

Nas práticas operacionais, objetivo é preservar as características do jato, permitindo uma sua penetração no banho a uma altura que lança não sofra com as agressivas condições do refino primário dos aços.

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. 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 m³/h.

Os bicos de lanças usados na série de experimentos no convertedor BOF têm bocais com a mesma inclinação com relação à vertical e mesmos diâmetros de saída. A diferença entre os bicos é a inserção de um ângulo entre a posição da entrada convergente e a posição da saída divergente do gás, caracterizando o

ângulo de torção. Na Figura 2 apresenta vistas de topo e lateral com as diferenças entre os bicos.

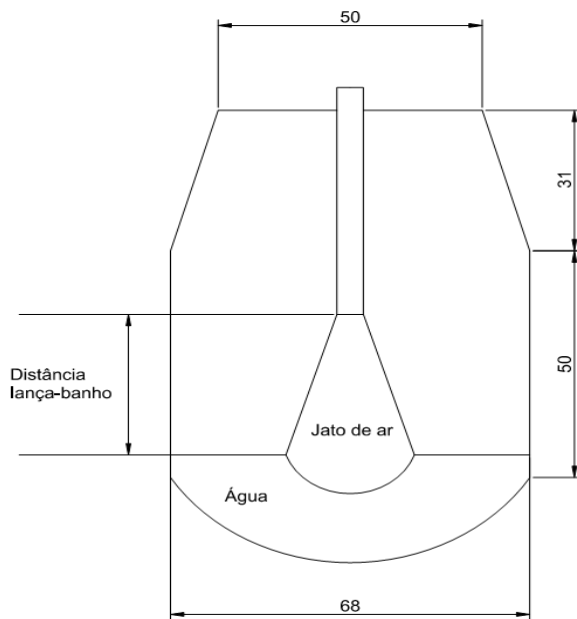


Figura 2. Dimensões do modelo físico do convertedor BOF.

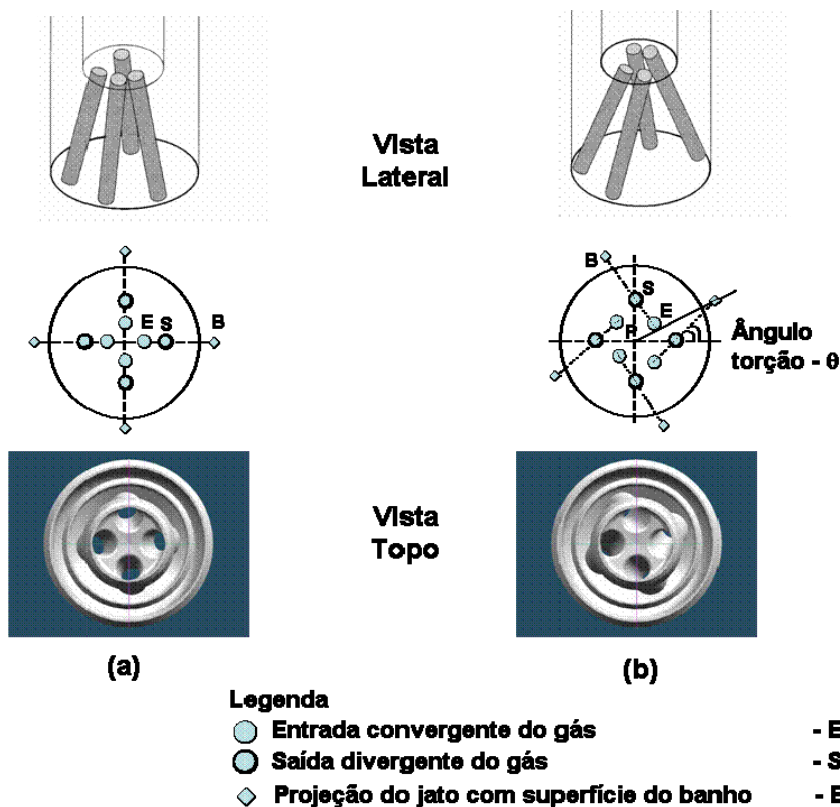


Figura 3. Comparação entre (a) bico normal e (b) bico com torção.

Na Figura 3, a lança com ângulo de rotação 0° , corresponde ao bico normal (a). O bico com ângulo de torção (θ é definido na Figura 2b). O eixo da lança está no ponto "P", a entrada do bocal está no ponto "E" e a saída no ponto "S". O ponto "B" é a projeção do eixo do bocal sobre a superfície do banho. No bico normal, o ponto "P",

a entrada “E” e a saída “S” do bocal estão alinhados, conseqüentemente o ponto “B” também está no mesmo alinhamento. No bico com torção, o ponto “B” está alinhado com a entrada “E” e a saída “S”, não interceptando o ponto “P”, ou seja, o centro da lança. Desta forma, o ângulo de torção é definido pela intersecção de duas linhas no ponto “S”, sendo a primeira linha, determinada entre dois bocais de saída passando pelo ponto “P” e a segunda linha, a que une os pontos “E”, entrada e “S”, saída de um dos bocais.⁽⁷⁾

A similaridade entre as velocidades do gás durante o sopro pode ser comprovada utilizando o número de Mach.^(8,9) Segundo Meidani et al.,⁽¹⁰⁾ 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

Números adimensionais	Símbolo	Unidade	Descrição	Industrial	Modelo físico
	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 foram separados em duas, uma para avaliar o efeito de torção no bico e outra o efeito do ângulo em relação com a vertical. Em ambas as séries foram alteradas 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 de torção nos bicos.

Tabela 2. Parâmetros variados nos ensaios com torção

Configuração de bico	Alturas	Vazões
Torção 20	0,250 m	160 Nm ³ /h
Torção 10	0,180 m	130 Nm ³ /h
Torção 0	0,117 m	100 Nm ³ /h

A avaliação dos tempos de mistura foi feita utilizando solução do sal KCl 2M adicionado a água.⁽¹¹⁾ 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.

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.,⁽¹⁰⁾ o ponto de injeção se situa na região diametralmente oposta aos sensores, apresentados na Figura 6.

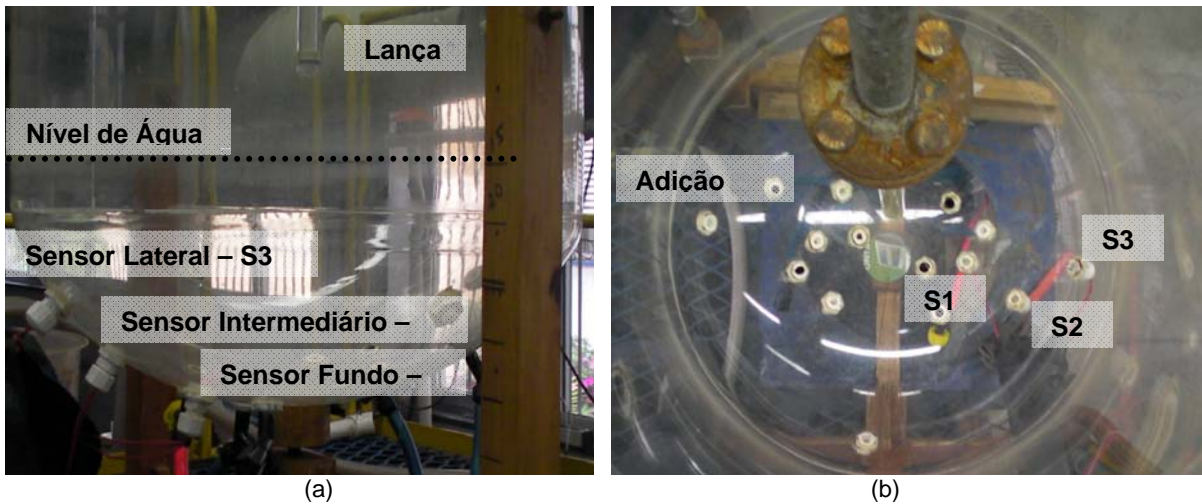


Figura 6. Posicionamento dos sensores no modelo do convertedor: (a) vista lateral; e (b) vista de topo.

Os valores máximos e mínimos de tensão serão utilizados para transformar a tensão em valores adimensionais de forma a facilitar as análises (Figura 7).

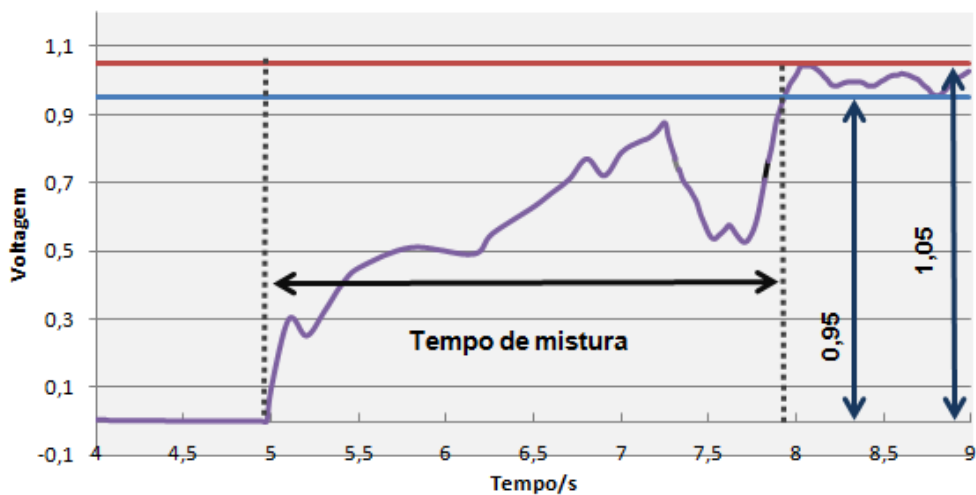


Figura 7. Esquema do critério de avaliação para determinar tempo de mistura.

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 8.

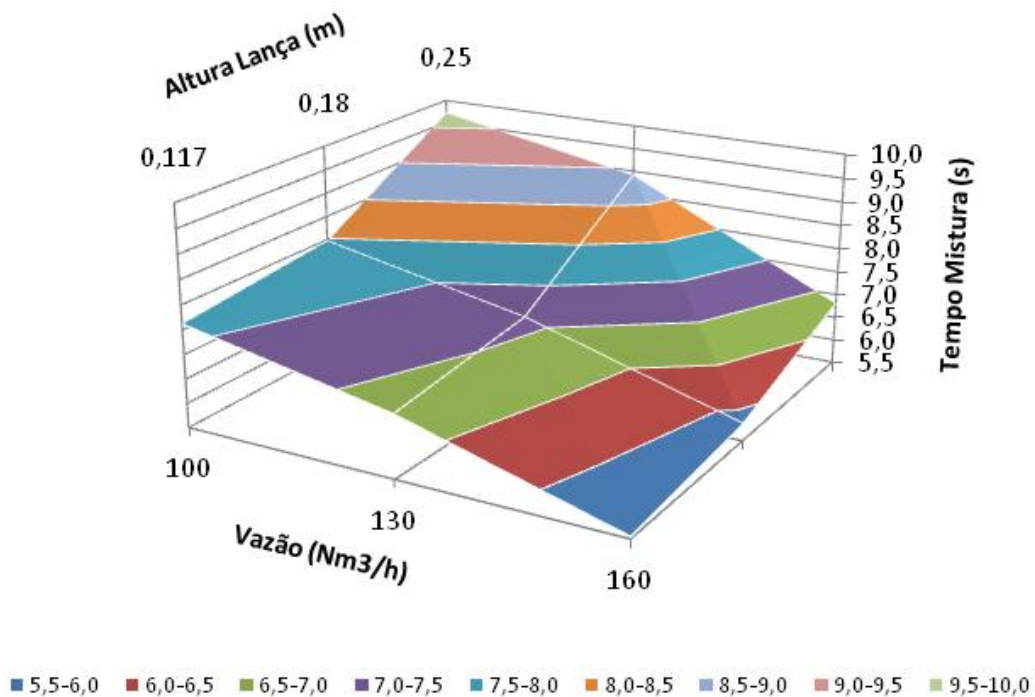


Figura 8. Tempo de mistura em função da vazão e altura de lança.

Na Figura 8 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 testado envolvendo variação no ângulo com a vertical, variação no ângulo com torção e mesmo 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.

A partir dos tempos de mistura, utilizando o *software* estatístico Minitab foram criadas superfícies de contorno representativas aos tempos obtidos. Todos os dados foram comparados com os valores médios dos experimentos, no caso: altura 0,180 m, vazão 130 Nm³/h, bico Torção 0°. O recurso permite visualizar campos de respostas para as condições determinadas nos teste de tempo de mistura de forma independente para cada sensor e depois uma análise conjunto para determinar a condições de menor tempo de mistura levando em consideração a resposta de todos os sensores, que buscam representar o comportamento do banho em função da geometria do convertedor. A primeira superfície foi a do sensor localizado no fundo do convertedor, denominado de S1 (Figura 9).

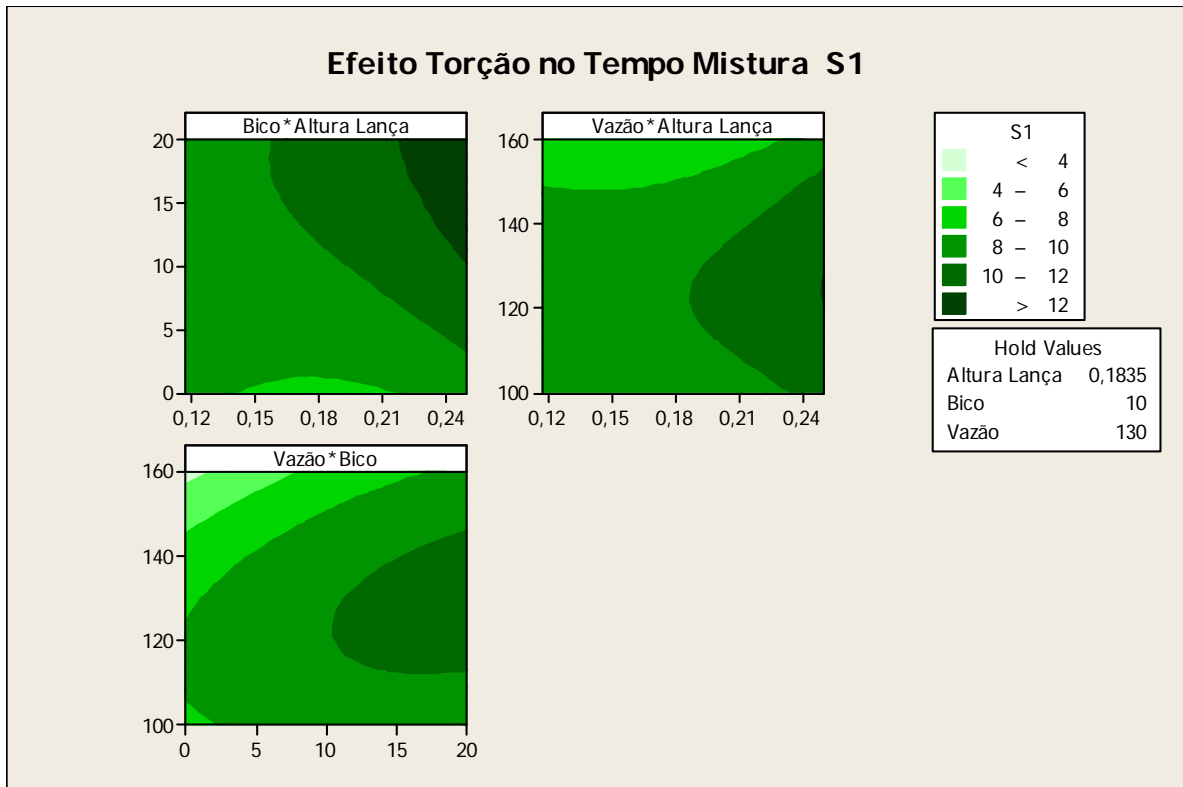


Figura 9. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado no fundo do convertedor.

Na Figura 9, as superfícies de contorno mostram que para o sensor no fundo o menor tempo de mistura ocorre para altura de 0,180 m para o bico sem torção. O tempo de mistura é menor nas condições de maiores vazões.

A Figura 10 apresenta a superfície de contorno dos tempos obtidos para o sensor localizado na posição intermediária do convertedor, o sensor S2. O menor tempo foi obtido para o bico sem torção e vazão 160 Nm³/h. O tempo de mistura é menor para as condições de sopro duro. Para condição de Torção 10°, a combinação vazão e altura de lança, apresenta tempos de mistura inferiores a 6 segundos para as vazões 100 Nm³/h e 160 Nm³/h e altura de lança 0,117. Isto mostra que o sensor S2, na posição intermediária, é afetado pela penetração jato provocado pela vazão elevada e pela movimentação provocada pela rotação para uma mesma altura de lança.

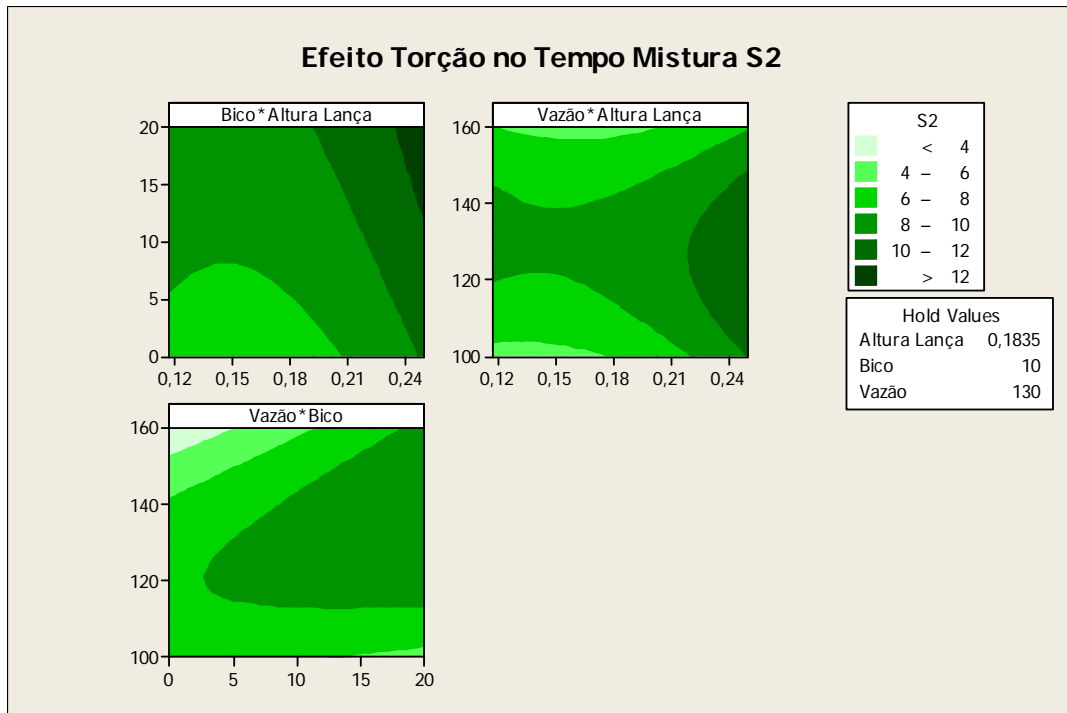


Figura 10. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado em posição intermediária do convertidor.

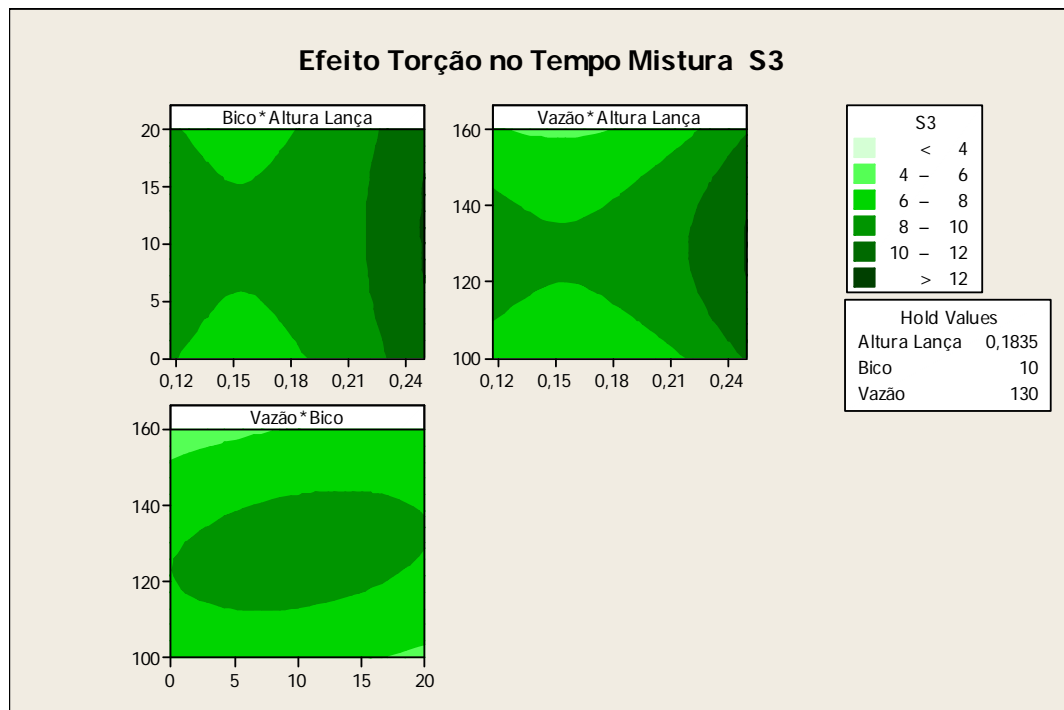


Figura 11. Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado na lateral do convertidor.

Na Figura 11, a superfície representada é a do sensor lateral, sensor S3, o mais próximo do nível de banho estático. Pela posição do sensor o bico Torção 20° e sem torção apresentaram comportamento semelhante. O menor tempo ocorre para o bico sem torção em condições de sopro duro e vazão de 160 Nm³/h. Para o Torção 20° o menor tempo ocorre para vazão de 100 Nm³/h. Com o aumento da torção, a movimentação do banho ocorre nas regiões próximas ao nível de banho do estático.

Com a baixa penetração provocada pela baixa vazão, a movimentação exerce maior influência no comportamento do tempo de mistura do sensor S3.

É possível inserir no mesmo gráfico as superfícies de contorno para ambos os sensores, de forma a determinar a condição que permite o menor tempo de sopro simultaneamente. A Figura 12 apresenta o gráfico de sobreposição de superfícies de contorno para as alturas testadas.

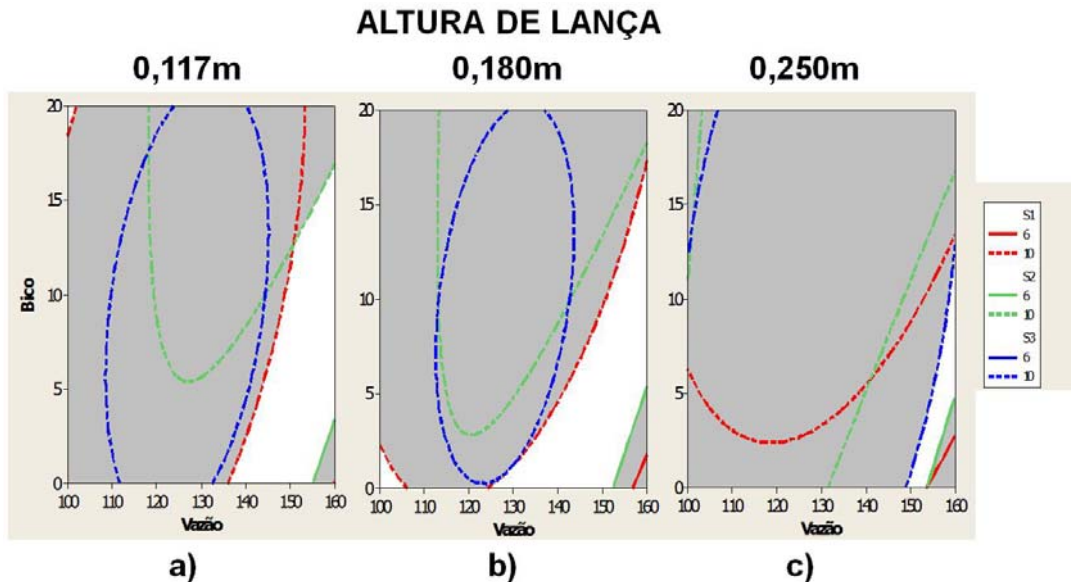


Figura 12. Sobreposição de superfície de contorno para os tempos de mistura entre 4 s e 8 s para as alturas de lança: (a) 0,117 m; (b) 0,180; e (c) 0,250 para bicos com torção.

Na Figura 12 nota-se que os menores tempos ocorrem para vazões maiores que $140 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e para ângulos de torção inferiores a 15° . A área em branco representa a região onde os tempos de mistura estão entre 4 s e 8 s, para todos os sensores. Das configurações de montagem a que fornece o melhor resultado é o bico com torção de 10° , Torção 10° , e vazão $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Há um indício de que o bico Torção 20° , apresenta menor tempo de mistura para vazão de $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Em analogia ao processo industrial é possível criar a hipótese que o bico Torção 20° seria adequado para operações que buscam conciliar bons índices de desfosforação com redução no tempo de sopro, considerando ainda a hipótese de redução no consumo de oxigênio devido à baixa vazão utilizada. Efeitos deletérios devem ser esperados no desempenho dos refratários na região dos munhões do convertedor. Para a altura de $0,180 \text{ m}$ em relação ao banho o menor tempo de mistura é conseguido para o bico sem torção com a vazão de $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e para os bicos com torção até 15° para vazões de gás acima de $130 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Para altura de $0,180 \text{ m}$ não deve haver diferença significativa entre o tempo de mistura do bico sem torção e $130 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e o bico Torção 10° com vazão de $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Os ensaios para a altura $0,250 \text{ m}$ não houve interseção para tempos entre 4 e 8 segundos, redimensionando a escala, a região que os 3 sensores apresentam menor tempo foi bem reduzida. O gráfico mostra que esse tempo é menor para vazões acima de $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e para bicos com torção de até 10° .

Para a altura de lança de $0,250 \text{ m}$ a melhor combinação é o bico Torção 10° e vazão de $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

4 CONCLUSÃO

Das análises do tempo de mistura, determinados pelos três sensores, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- quanto maior a vazão e menor a distância lança banho, menor o tempo de mistura;
- para o sensor de fundo o menor tempo de mistura foi com Torção 0°, elevada vazão elevada;
- para o sensor intermediário sofre influências da rotação provocada pelos jatos, mas o menor tempo de mistura está relacionado com a vazão;
- para o sensor lateral é influenciado pela torção, pois apresentou tempos de mistura baixo para condição de baixa vazão e altura de lança intermediária;
- entre os bicos com torção, o que apresentou menor tempo de mistura foi o Torção 10°, com vazão de 160 Nm³/h;

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 MAIA, B.T. e outros: Lança de Oxigênio. Curso de Aciaria a Oxigênio, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- 2 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.
- 3 FARIA, M.A.A. Apostila do curso de Aciaria a Oxigênio da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, capítulo 4, 2011.
- 4 MUNDIM, M.J. Tecnologia de Fabricação de Aço Líquido. v.2 - Aciaria LD. UFMG, 3ed. Belo Horizonte: 1980.
- 5 STASCHOWER, M., MOREIRA, J. R. S., Estudo Experimental de Escoamento de Gases em Bocais Convergente Divergente. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, 2002. (Iniciação Científica da Escola Politécnica de São Paulo).
- 6 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.417-435.
- 7 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).
- 8 CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 9 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.
- 10 DIAZ-CRUZ, M., MORALES, R. D., OLIVARES, O., ELIAS, A. Physical and Mathematical Models of Gas-Liquid Dynamics in BOF Converters. 2002 Steelmaking Conference Proceedings. p737-748.
- 11 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.