

EFEITO DO BICO COM TORÇÃO NO TEMPO DE MISTURA ATRAVÉS DE UM MODELO FÍSICO DE CONVERTEDOR LD¹

Breno Totti Maia²
Jairo Átila Alvarenga³
Rafael Fernandes Reis⁴
Roberto Parreiras Tavares⁵

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 de pequeno porte, muitas das soluções desenvolvidas são inviáveis economicamente. Os bicos de lança com torção de jato 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 torção diferente, 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 de torção de 20° associado com vazão elevada e curta distância lança banho.

Palavras-chaves: Convertedor; Modelo físico; Bicos com torção; Tempo de mistura.

EFFECT OF NOZZLE TWISTED 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 steel plants many solutions are most expensive. The twist nozzles are the technology that attempts both targets: blown time and investment costs. In this work, the cold model was used to compare twist nozzles, flow and lance-bath distance and the effects in the acid solution mixing time. The best results were reached with 20°-twist angle and right flow rate and short lance-bath distance.

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

- 1 *Contribuição técnica a ser apresentada no "XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional da ABM", 12 a 16 de Maio de 2008 em Curitiba – Paraná.*
- 2 *Sócio da ABM, Engenheiro Metalúrgico, Assessor de Processos Aciaria – Gerdau Barão de Cocais.*
- 3 *Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.*
- 4 *Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.*
- 5 *Sócio da ABM; Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.*

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação de aço líquido através do BOF, desde sua concepção sofreu diversas transformações, passando pela posição por onde oxigênio é injetado, variando o tipo de gás injetado e mesmo a injeção de material pulverizado. As conclusões destes desenvolvimentos permitiram a combinação de técnicas contribuindo para o aumento da capacidade de produção e ao atendimento de especificações de qualidade finais cada vez mais exigentes.

Como parte deste desenvolvimento, o conjunto da lança de sopro de oxigênio foi objeto de importantes parametrizações. A distância da lança ao banho tem influência nos teores finais de fósforo na corrida. Este parâmetro também determina a aderência de material metálico na lança durante o sopro, principalmente quando o ferro gusa líquido contém baixos teores de silício. Para permitir sopros sem aderência de cascos já existem tecnologias disponíveis para as lanças de oxigênio.⁽¹⁾

Os bicos de lanças também foram largamente estudados por outros autores.⁽²⁻⁶⁾ Os estudos estabeleciam uma relação entre as pressões de rede envolvidas, números de furos e suas conseqüências na vazão, desgastes dos furos, alcance do jato, queda de pressão de rede, queda de pressão de jato e formas de aumentar coerência de jato durante o sopro de oxigênio. Os resultados permitiram a criação de uma grande variedade de bicos com finalidades específicas; partindo das lanças de furo único, passando pelas lanças multifuros com jatos protegidos a lanças com segmentos para realização de pós-combustão.

Conceito da torção de jato, passou a ser recentemente explorado^(7,8) e consiste na mudança do tradicional alinhamento do laval com o centro da lança para o concepção do deslocamento do alinhamento em relação centro, gerando um ângulo entre a entrada e a saída do laval, denominado ângulo de torção.

Para permitir estudos e aprimoramentos de novas tecnologias, são utilizados modelos a frio. Os modelos a frio possibilitam a simulação de processos em escala menores do que o processo industrial.⁽⁹⁾ A representatividade dos modelos a frio é garantida por números adimensionais que representam as forças envolvidas. Nas simulações de processos siderúrgicas como agitação em moldes, perfil de escoamento e arraste de escória em distribuidores, vortex no vazamento de painéis de aço, sopro de convertedores, são utilizados água para representar o metal líquido e ar para representar os gases envolvidos no processo, como o oxigênio, argônio, nitrogênio. O uso da água para representar o metal líquido é garantida pela semelhança no valor da viscosidade dinâmica destes elementos.

A aproximação destes conceitos e os modelos a frio permitem a criação de uma visão integrada dos fenômenos e facilita a implementação prática das soluções desenvolvidas. Outro aspecto importante reside na análise crítica das premissas adotadas e o campo de validade das respostas encontradas.

2 METODOLOGIA

2.1 Definição dos Equipamentos e Procedimentos Experimentais

O modelo a frio foi feito usando água para simular aço líquido e ar para simular oxigênio. Um vaso cilíndrico com a parte superior cônica foi feito em resina acrílica com um diâmetro interno de 0,460 m e altura de 0,646 m. O vaso cilíndrico foi

preenchido com água na mesma altura que caracteriza o nível do banho. O modelo a frio foi construído na escala 1/6 de um convertedor de 30t.

O ar comprimido foi produzido por compressor de 22,5kW, com máxima pressão de $7,87 \times 10^5 \text{ Pa}$ e máxima vazão de gás de $189 \text{ m}^3/\text{h}$. O aparato do modelo a frio é apresentado na Figura 1. A vazão foi controlada por três válvulas: protetor do medidor de vazão, controladora do fluxo e descarga do compressor. O sistema de controle de vazão é apresentado na Figura 2.

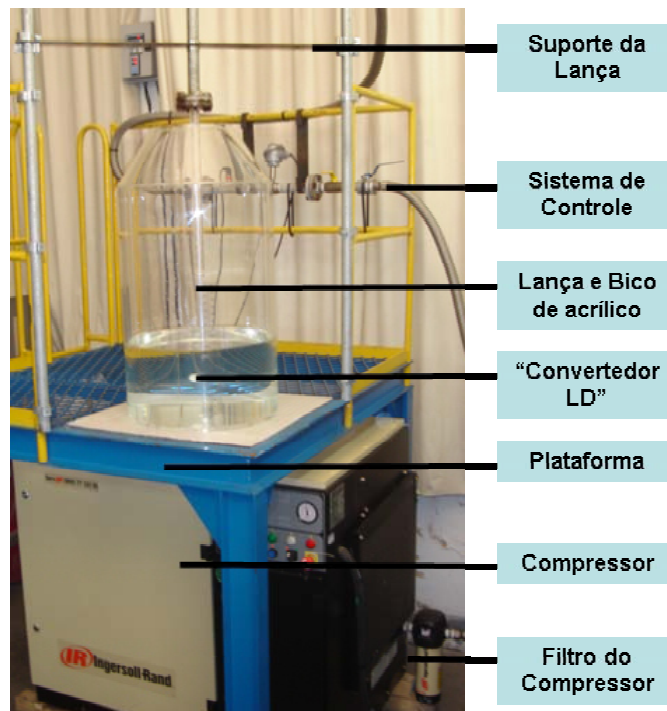


Figura 1: Aparato do modelo a frio do convertedor LD.

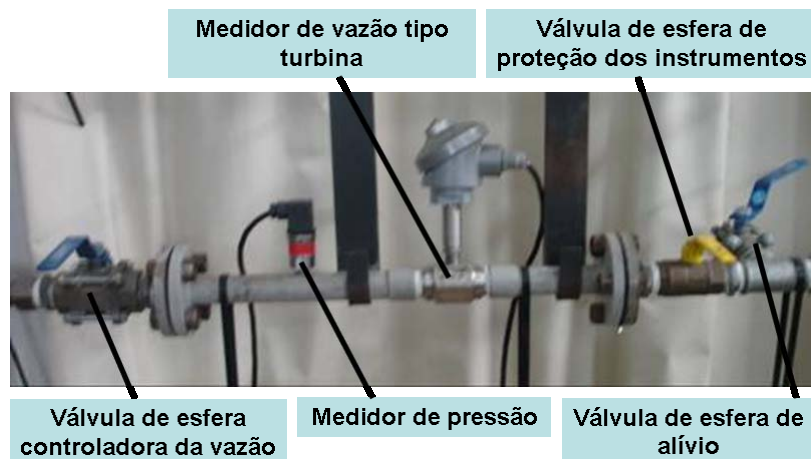


Figura 2: Sistema de controle de vazão.

2.2 Tipos de bico de lança

As lanças, normais e com torção, tem o mesmo ângulo de inclinação com a vertical e os mesmos diâmetros de garganta e saída. Os furos são fixos e a diferença na torção está entre o ângulo da entrada convergente e a saída divergente do gás, como mostrado na Figura 3.

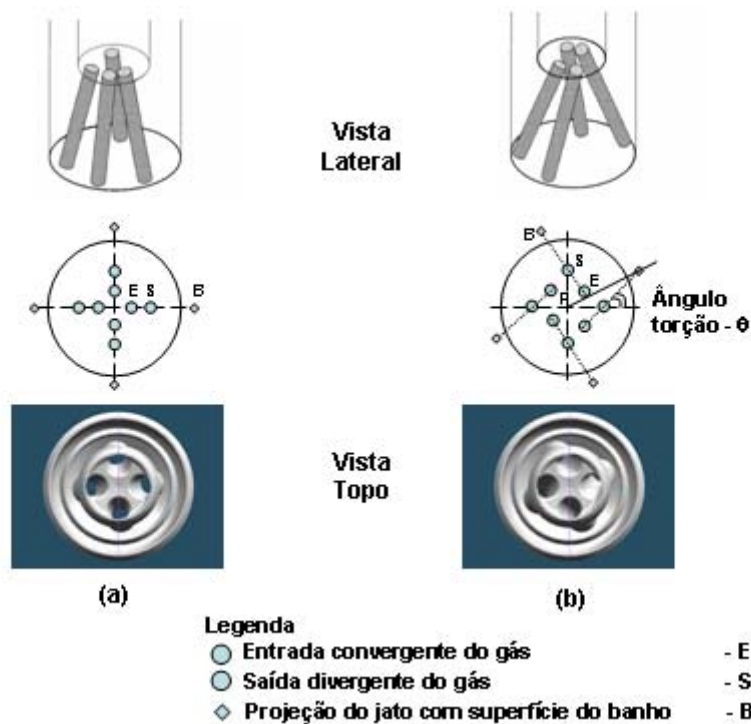


Figura 3: Comparação entre: (a) bico norma e (b) bico com torção proposto por Higuchi *et al*⁽³⁾.

2.3 Números Adimensionais

Em outros experimentos^(11,12) foi descrito que os números adimensionais que melhor correlacionam as forças envolvidas e a penetração de jato são: Froude modificado, Reynolds modificado e Weber modificado. Estes adimensionais, principalmente o número de Froude, foram usados para comparar o processo industrial e modelo a frio, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre o processo industrial e modelo a frio.

Descrição	Símbolo	Unidade	Industrial	Modelo a Frio
Banho			Aço	Água
Densidade	ρ	kg/m ³	7048	1000
Viscosidade	ν	kg/m.s	0,0055	0,001
Tensão Superficial	σ	N/m	1,6000	0,0728
Gás			Oxigênio	Ar
Densidade T _o , P _o	ρ_o	kg/m ³	19,04	11,24
Viscosidade	ν	kg/m.s	2,03E-05	1,78E-05
Pressão Absoluta	P _o	Pa	1,47E+06	9,61E+05
Temperatura	T _o	K	298	298
Vaso				
Diâmetro	D _{conv}	m	2,762	0,460
Altura	H ^{real}	m	4,456	0,743
Altura do banho	H _b	m	1,336	0,223
Lança-Banho	H	m	1,000	0,534
Pressão Adimensional	P _{SAÍDA} /P _o	#	0,0738	0,1252
Número de Mach	Ma	#	2,35	2,01
Vazão Normalizada	Q _{TOTAL SAÍDA}	Nm ³ /h	7645	189
Froude modificado	Fr*	#	0,031	0,032
Reynolds modificado	Re*	#	3,112E+05	1,162E+05
Weber modificado	We*	#	1,695E+03	1,550E+03

2.4 Experimentos

O arranjo de experimentos foi feito com três réplicas em ordem aleatória com as distâncias lança-banho de 0,117 m, 0,180 m, 0,250 m; vazões de 100 Nm³/h, 130 Nm³/h, 160 Nm³/h e bicos com ângulos de torção 0°, 10° e 20°. Os dados foram processados pelo software estatístico *MINITAB*.

2.5 Avaliação do Tempo de Mistura

A avaliação dos tempos de mistura foi feita utilizando um traçador de KCl adicionado à água. Na parede e no fundo do vaso acrílico foram instalados dois sensores de condutividade elétrica, construídos no próprio laboratório, utilizando placas de platina. As placas de platina foram escolhidas, devido a sua alta resistência à corrosão, alta condutividade elétrica e por apresentar uma resistência mecânica adequada às condições do experimento.

Um computador, equipado com placa de aquisição de dados e o *software* “*Daq View*” permitiu a coleta e o processamento dos dados em uma taxa de aquisição de 10Hz, através da variação da condutividade *versus* tempo, nos pontos de medição instalados. Um sensor de condutividade foi colocado a 180° do ponto de injeção do traçador no fundo do vaso. No experimento proposto, a forma de injeção do traçador seguiu a que foi adotada por Diaz-Cruz *et alli* (2002), conforme apresentado na Figura 4.

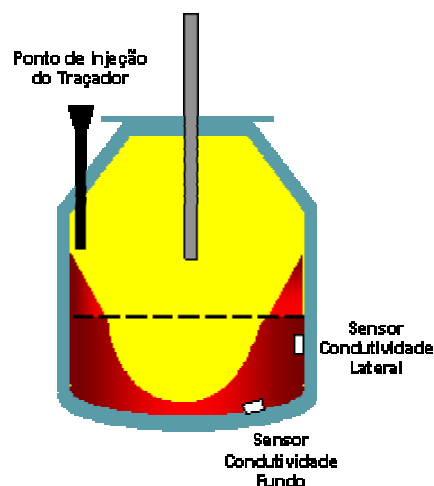


Figura 4 – Determinação do tempo de mistura posicionamento dos sensores de condutividade e ponto de injeção do traçador segundo Diaz-Cruz et al.⁽¹¹⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do *software* estatístico *MINITAB* foi possível, através da matriz de experimentos, analisar o conjunto de resultados apresentados como uma superfície de resposta, na qual são apresentadas regiões hachuradas de mesmo valor de tempo de mistura determinadas pela combinação dos parâmetros de entrada testados.

A Figura 5 apresenta a superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado no fundo do convertedor. As superfícies de contorno mostram que o menor tempo de mistura para o sensor de condutividade do fundo do convertedor é obtido com vazão de 160 Nm³/h e bico sem ângulo de torção e para altura de

lança de 0,117 m. Os níveis de significância foram alcançados para todos os termos, incluindo as interações e os termos quadráticos. O tempo de mistura é menor nas condições nas quais se aumenta a pressão de jato sobre o sensor de condutividade.

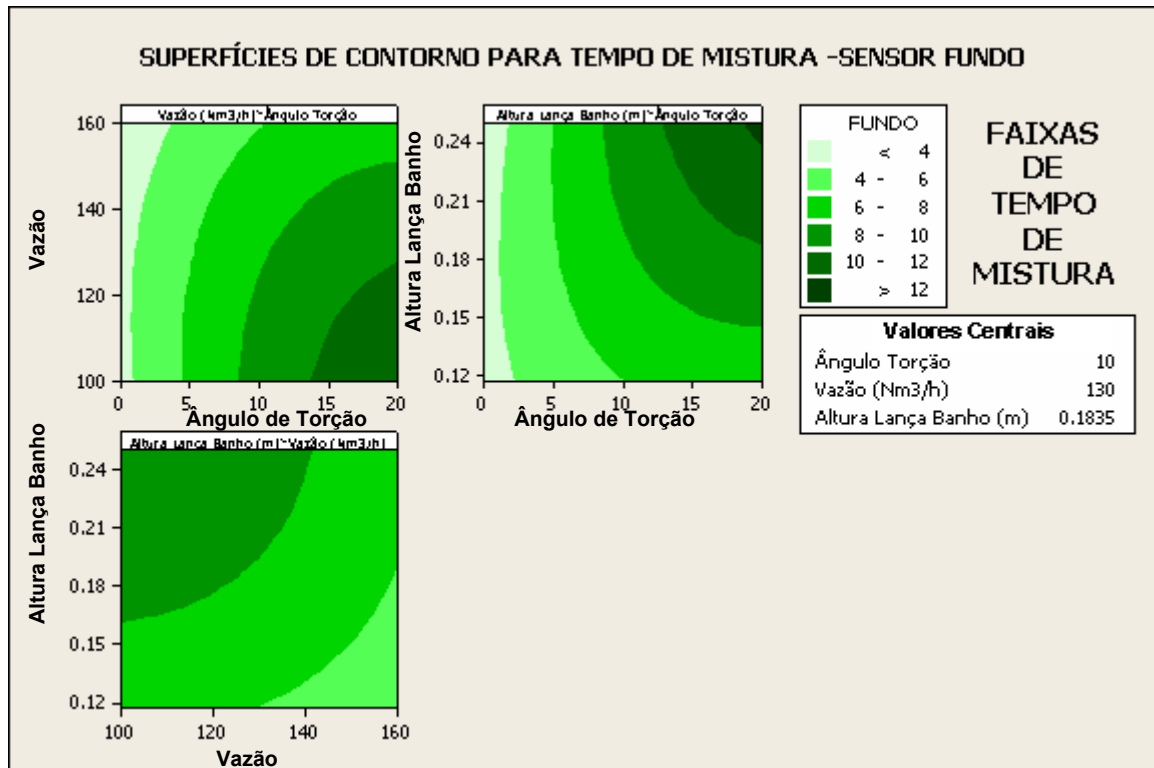


Figura 5: Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado no fundo do convertidor.

A Figura 6 apresenta a superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado na lateral do convertidor.

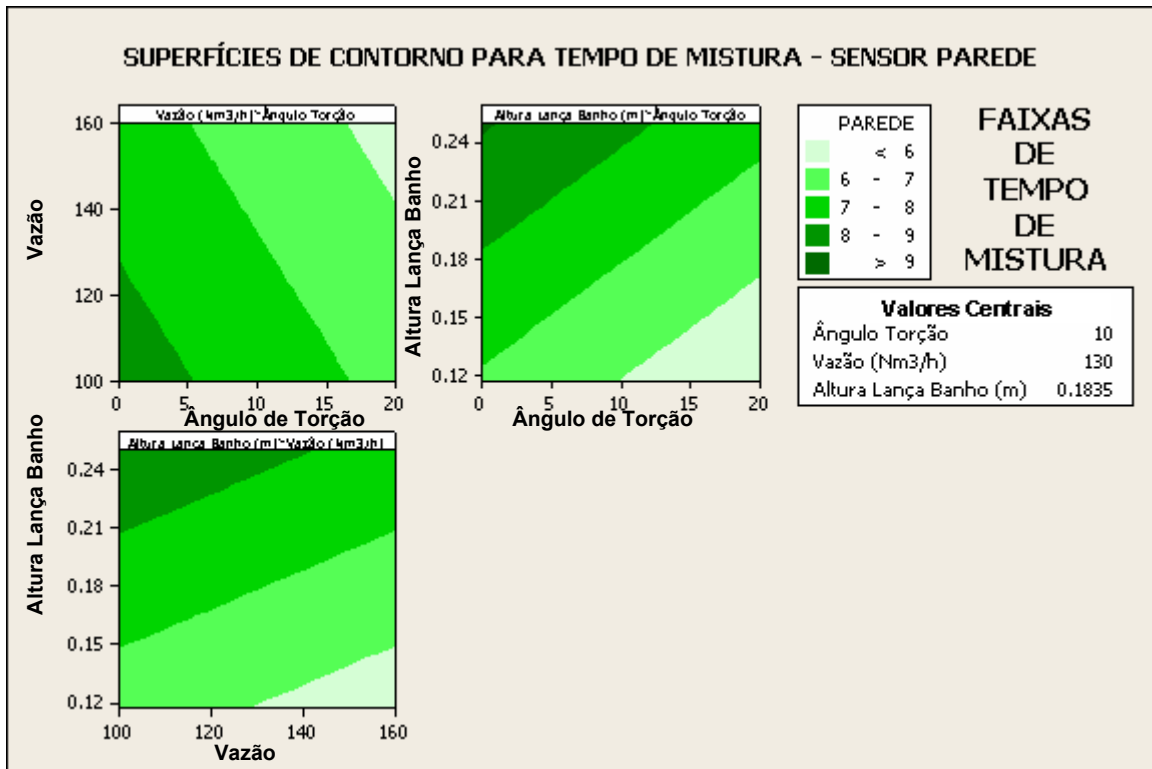


Figura 6: Superfície de contorno para os tempos de mistura para o sensor localizado na lateral do convertedor.

Para o sensor de condutividade localizado na parede do convertedor, foi atingido o nível de significância apenas para interação entre os fatores, denotado, através da linearidade das faixas de tempos de mistura. Desta forma, a condição para obter o menor tempo de mistura foi atingida com vazão de 160 Nm³/h, bico com ângulo de torção de 20° e altura de lança de 0,117 m. Novamente as condições de “sopro duro”, promovem um menor tempo de mistura. Quando comparado com o sensor de condutividade localizado no fundo do convertedor, a área da lateral é 4,8 vezes maior, significando uma maior capacidade de mistura para os bicos com torção. A maior área lateral significa uma maior capacidade de mistura do banho quando comparada com o fundo do convertedor.

Ainda utilizando o *software* estatístico *MINITAB*, é possível inserir no mesmo gráfico as superfícies de contorno para os sensores do fundo e da parede, com objetivo de determinar a condição que permite o menor tempo de mistura simultaneamente para os dois sensores de condutividade. A Figura 7 apresenta um gráfico de sobreposição de superfícies de contorno para altura de 0,117 m.

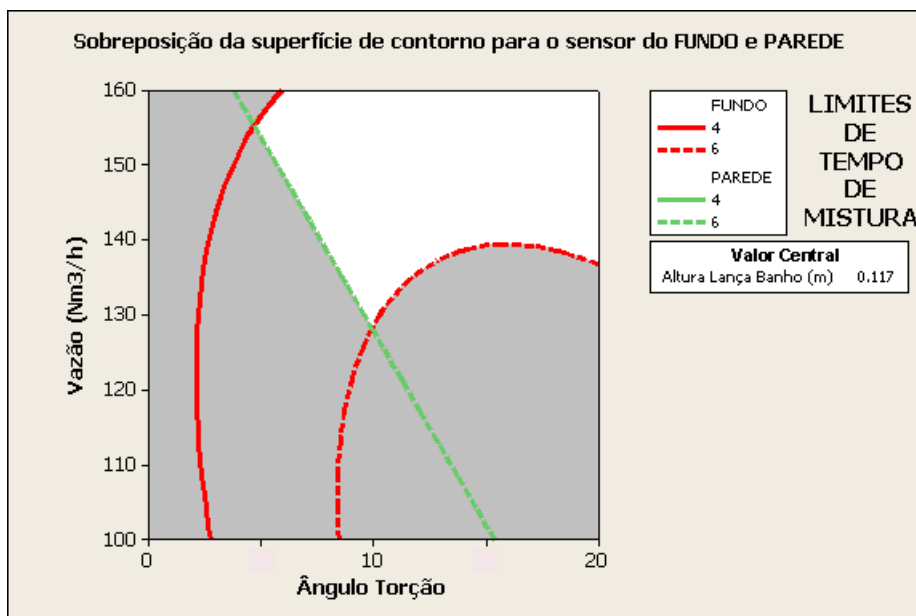


Figura 7 – Sobreposição da superfície de contorno para os tempos de mistura de 4 e 6s para altura da lança ao banho de 0,117m.

Na Figura 7, nota-se que a aproximação da lança ao banho proporciona baixos tempos de mistura nos dois sensores de condutividade entre as vazões de 130 Nm³/h e 160 Nm³/h, para ângulos de torção a partir de 10°. A área em branco na Figura 7 representa a região onde ocorrem os tempos de mistura entre 4s e 6s, tanto para o sensor localizado no fundo quanto na parede do convertedor, representando a condição de menor tempo de mistura.

Entretanto, não foi identificada uma área como esta para as distâncias de 0,180 e 0,250m, conforme apresentado nas Figuras 8 e 9 abaixo.

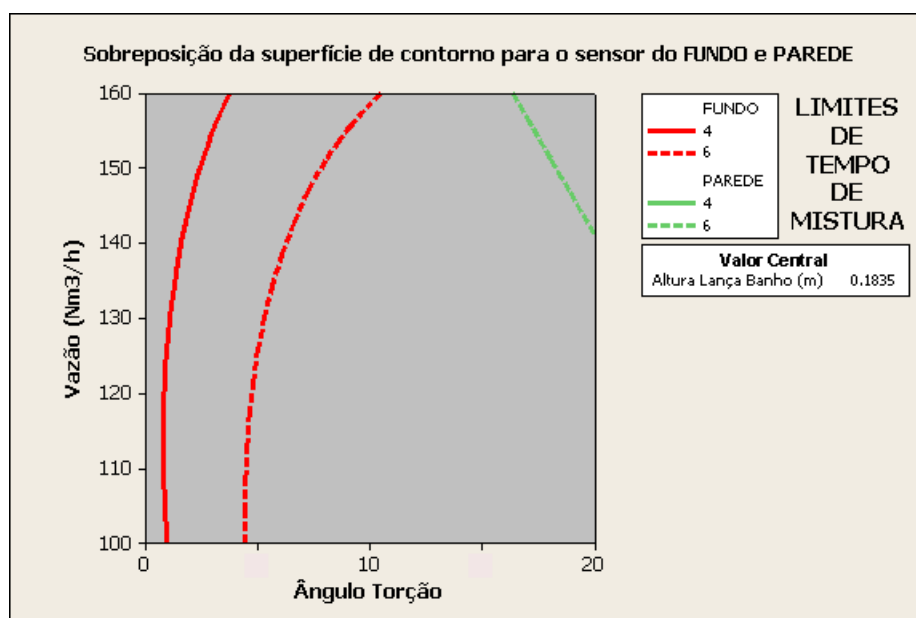


Figura 8 – Sobreposição da superfície de contorno para os tempos de mistura de 4 e 6s para altura da lança ao banho de 0,180 m.

Na Figura 8, nota-se que com o aumento da distância da lança ao banho, o ângulo de torção passa a determinar tempos de misturas distintos entre o sensor de fundo e parede. Bicos sem ângulo de torção, por direcionar o jato em direção ao fundo do convertedor, levam a baixos tempos de mistura independente das vazões testadas.

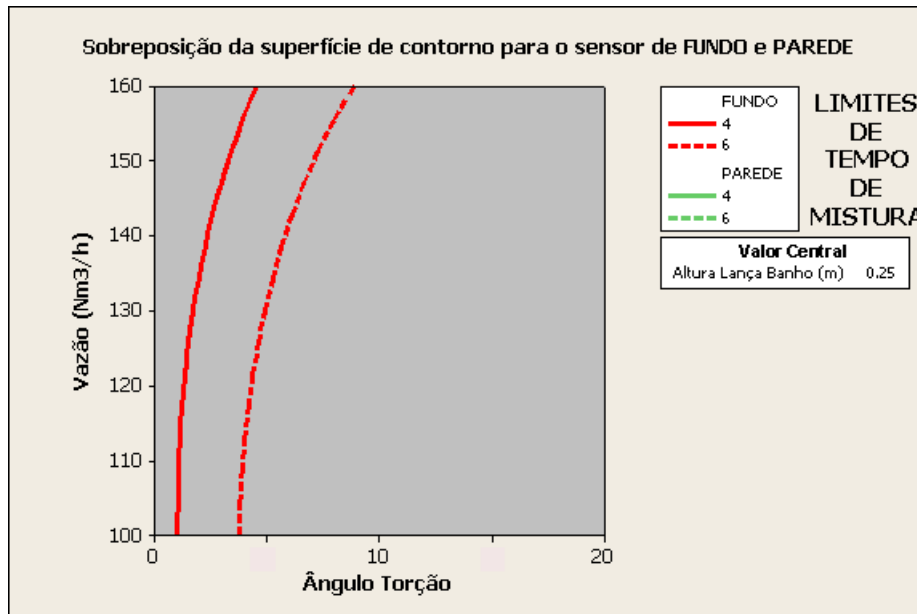


Figura 9 – Sobreposição da superfície de contorno para os tempos de mistura de 4 e 6s para altura da lança ao banho de 0,250m.

Na Figura 9, com aumento da distância lança-banho ocorre a perda da pressão de impacto do jato, elevando os tempos de mistura com o aumento do ângulo de torção.

4 CONCLUSÃO

Da análise dos tempos de mistura, determinados pelos sensores de fundo e parede do convertedor, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1. Para o sensor localizado no fundo do convertedor o bico normal apresentou o menor tempo de mistura;
2. Para o sensor localizado na lateral do convertedor os bicos Rotox 10 e 20 apresentaram o menor tempo de mistura;
3. O menor tempo de mistura, considerando a análise dos resultados para os dois sensores, no fundo e parede, é alcançado utilizando o bico Rotox 20, na distância lança-banho de 0,117 m, e vazões superiores a 130 Nm³/h.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos forneiros e sopradores da Gerdau Barão de Cocais pelo envolvimento com o trabalho durante os testes industriais para validação das conclusões retiradas deste trabalho e pela implantação dos novos bicos. Também agradece a Gerdau Barão de Cocais, representada pelo Engenheiro Metalurgista Sávio Cota Fonseca, pela oportunidade para o desenvolvimento contínuo do bolsista de graduação e colaboradores.

REFERÊNCIAS

- 1 NOGUEIRA, A. A. A., SILVA, J. G. A., DUARTE, M. S., ANDRADE, W. M. *Proposta de Lança Sem Aderência de Escória (SLAGLESS)*. Anais do XXXVIII Seminário de Aciaria Internacional; Porto Alegre, RS, 21 a 24 de maio de 2006.
- 2 KAWAKAMI, K, Kinetics of Blowing Reaction in a Basic Oxygen Furnace, *Journal of Metals*, p.836-845, jul.1966.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 HIGUCHI, Y, TAGO, Y, Efecto of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, *ISIJ Internacional*, v.43, n.9 p1410, set.2003.
- 8 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.
- 9 CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 10 DIAZ, M. C., IIDA, T., KOMAROV, S. V., SANO, M., Mixing Characteristics under Gas Injection through Rotary Lance Submerged in Liquid Bath, *ISIJ Internacional*, v.35, n.5, p464, 1995.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.