

EOF COLD MODEL – STUDY OF MIXING TIME¹

Ana Clara Petrucelli²
Breno Totti Maia³
Gustavo Abreu⁴
Rafael Kajimoto Imagawa⁵
Roberto Parreiras Tavares⁶

Resumo

O estudo do sopro de oxigênio no EOF é muito complexo e envolve diferentes fenômenos, incluindo o desenvolvimento do jato supersônico, a interação do jato com o ambiente ao seu redor e o banho metálico, onde ocorrem importantes reações. No presente trabalho, diferentes alternativas de desenho de lança e bicos e arranjos desses no interior do EOF são desenvolvidos a interação do jato supersônico com o ambiente do banho metálico foi caracterizada. Para o EOF, o objetivo foi determinar a melhor combinação de variação de injetores e vazões para alcançar o menor tempo de mistura, estabelecendo um novo padrão operacional. O injetores tiveram pouco relevância no tempo de mistura. Ventaneiras e lanças supersônicas apresentaram os menores tempos de mistura. A lanças supersônicas tem influência nos mecanismos de movimento do banho e projeção de material líquido no EOF, enquanto as ventaneiras afetam o movimento do banho.

Palavras-chaves: EOF, bocais, tempo mistura, penetração de jato, Froude

EOF COLD MODEL – STUDY OF MIXING TIME¹

Abstract

The study of oxygen blow into EOF is very complex and involves different phenomena, including the development of the supersonic jet, the interaction of the jet with the surrounding atmosphere and with the metallic bath, where the main reactions occur. In the present work, different alternatives for the design of the lance tip and arrangements of lances in the EOF were evaluated and the interaction of the supersonic jet with the metallic bath was characterized. For the EOF, the target was to determine the best variations in combination of injectors and flow rates to reach smaller mixing times, establishing new operational standards. The injectors have low relevance in reducing mixing time. Tuyères and supersonic lances presented the lowest values of mixing times. The supersonic lance influences the bath movement mechanism and projection of liquid material in EOF, whereas tuyères affect bath movement.

Key words: EOF, nozzle, mixing time, jet penetration, Froude

¹ Contribuição técnica a ser apresentado no 45º Seminário de Aciaria Internacional, Porto Alegre, Rio Grande do Sul de 25 a 28 de Maio de 2014,

² Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG,

³ Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador da LUMAR METALS;

⁴ Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG,

⁵ Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG,

⁶ Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista; Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.

1 INTRODUÇÃO

O EOF – “Energy Optimizing Furnace” utiliza um pré-aquecimento de sucata simples e eficiente através de gases produzidos no processo pela injeção de oxigênio no banho de ferro-gusa líquido juntamente com sucata. Com 32% de sucata pré-aquecida e 68% de ferro-gusa líquido, a carga possui energia suficiente proveniente das reações do oxigênio com carbono, silício, manganês, fósforo e ferro para processar a corrida sem o auxílio de outra fonte externa de energia. A sucata é suportada por garfos de modo que os gases quentes gerados na corrida em processamento a aquecem neste local chamado de “Pré-Aquecedor”, colocado imediatamente acima do forno. Este é único caminho para saída dos gases do forno, provocando um pré-aquecimento da sucata a valores próximos de 800°C. A sucata pré-aquecida em uma corrida é carregada na corrida posterior. O CO remanescente da pós-combustão é queimado no pré-aquecedor, gerando calor e contribuindo para o pré-aquecimento da sucata. O oxigênio necessário para o refino primário da corrida é injetado de três formas: ventaneiras, lanças supersônicas e injetores atmosféricos. Tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam a distribuição do oxigênio no EOF e sua principal influência no refino e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** vista em corte do primeiro EOF⁽¹⁾.

Tabela I – Distribuição dos pontos de injeção de gás.

Equipamento	Posição	Quantidade	%Oxigênio	Influencia
Ventaneira	Parede próxima a sola e canal de vazamento	2	15	Movimento banho e descarburação
Lança Atmosférica	Parte superior dos painéis	4	57	Formação scoria e pós-combustão
Lança Supersônica	Parte superiores dos painéis próximo porta escória	2	28	Descarburação

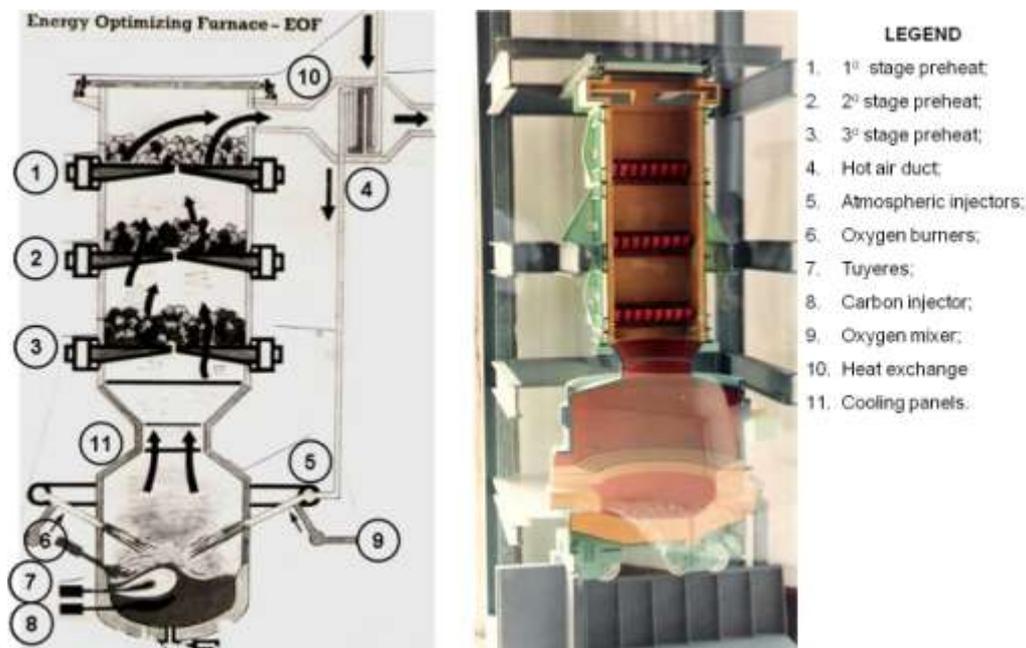


Figura 1 - Concepção do primeiro EOF: (a) Esquema e (b) Maquete (Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains, 1978)⁽²⁾.

Uma vez descida a sucata dos pré-aquecedores para a sola do forno, é carregado o ferro-gusa líquido e ao mesmo tempo é iniciado o sopro pelas ventaneiras e injetores. Durante o carregamento do ferro-gusa também é iniciada a adição de escorificantes (cal calcítica e cal dolomítica) para proteção do refratário. A necessidade de uma rápida adição do material escorificante reside no fato da escória aos 2 minutos começar a verter pela porta de escória, aumentando o arraste de ferro e não havendo tempo suficiente para dissolução da cal no banho. Com o completo enforamento do ferro-gusa, são acionadas as lanças supersônicas. As lanças supersônicas são os únicos equipamentos para injeção de oxigênio que possuem movimento de avanço e recuo. A principal forma de controle da vazão total de oxigênio no EOF é através de controle dos injetores atmosféricos. Devido às particularidades do EOF, a seqüência de operação do refino primário tem grande similaridade com um forno elétrico, muito embora todas as reações sejam determinadas pelo oxigênio injetado. Com o carregamento de ferro-gusa finalizado, inicia-se a fusão durando aproximadamente 10 minutos, podendo este tempo variar em função da composição química da carga metálica, da temperatura e da quantidade de ferro-gusa. Simultaneamente à fusão da sucata, também ocorrem reações de oxidação dos elementos do banho líquido e dissolução da cal, contribuindo para o gradativo aumento do volume de escória. O EOF possui um sistema de basculamento hidráulico que limita sua movimentação em 8° em relação a vertical, nos dois sentidos, permitindo o vazamento de aço em um sentido e o vazamento de escória no outro. Com a sucata completamente líquida, a próxima etapa é essencialmente de refino através da oxidação dos elementos do banho. Nesta etapa ocorre o vazamento contínuo de escória através da porta, tornando o EOF um bom equipamento desfosforante e com altas taxas de aquecimento do metal. A energia gerada na pós-combustão, principalmente pela reação do oxigênio com carbono, é parcialmente absorvida pelo banho e parcialmente usada para o pré-aquecimento da sucata. O calor sensível remanescente dos gases vai pré-aquecer a sucata que está no pré-aquecedor suportada por um sistema de garfos refrigerados à água.

2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados nas dependências do “Laboratório de Simulação de Processos” (LaSiP) do curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFMG. O modelo físico do EOF foi construído em resina acrílica na escala 1/6 em relação ao reator de 45 toneladas de aço vazado. A geometria do EOF é complexa, constituída por duas peças de resina acrílica, conforme visto na Figura 2.

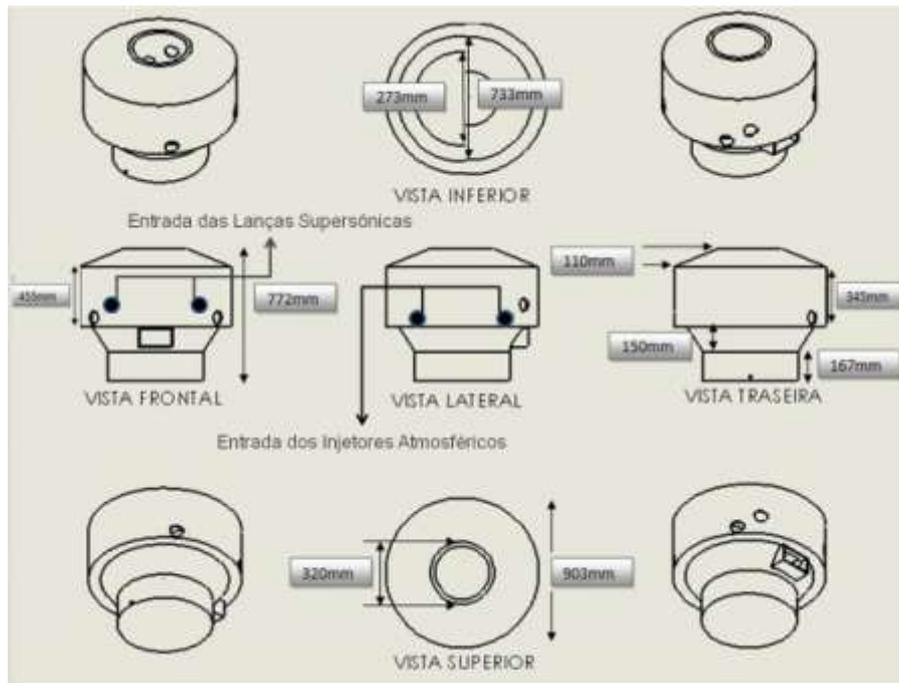


Figura 2 – Vistas e dimensões do modelo físico do forno EOF.

Na Figura 2, o cadinho é constituído de uma base cilíndrica e acima dele um tronco de cone invertido. A abóbada também é constituída de uma base cilíndrica e acima dela um tronco de cone. Na geometria do cadinho foi inserida a porta de escória ou “barrado” e o canal de vazamento de aço, enquanto que na abóbada foram incluídos os furos que representam os locais de injeção de oxigênio e exaustão dos gases. É possível notar que os furos estão localizados de forma assimétrica. Isto é necessário no processo industrial. Assim, para representar o processo, é apresentada na Figura 3 a disposição dos furos para inserção dos injetores de ar no modelo físico.

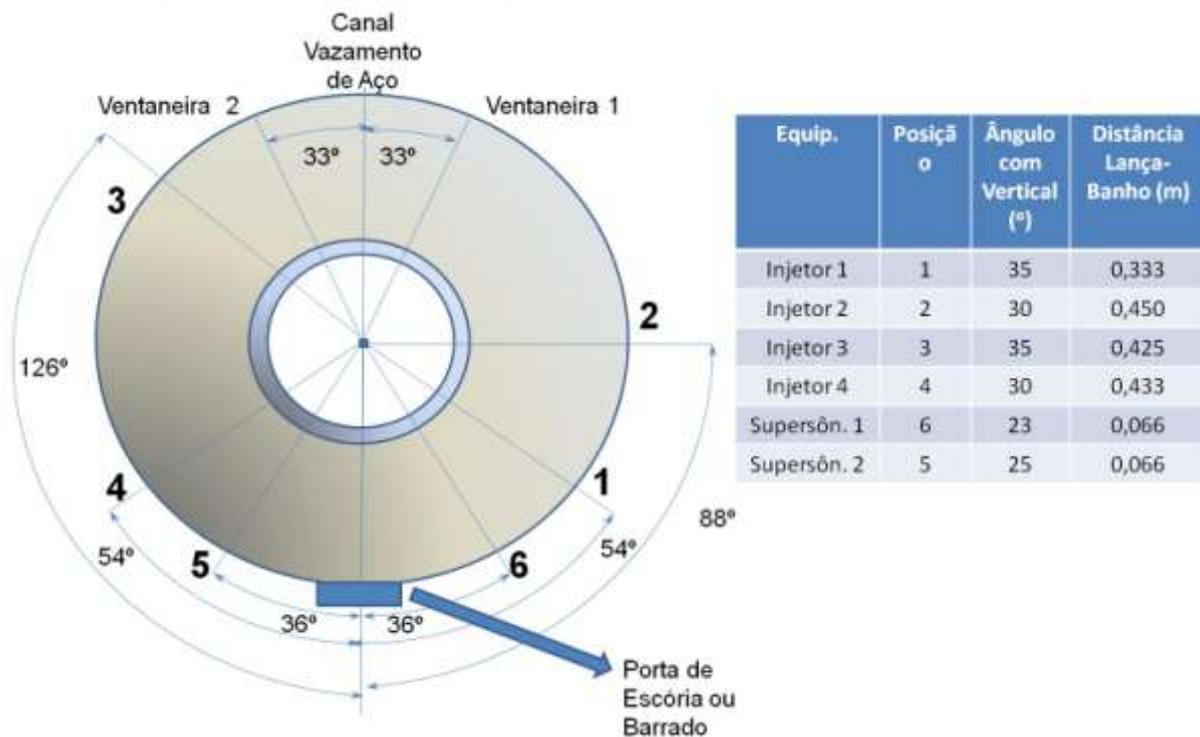


Figura 3 – Modelo a frio do EOF e posição injetores.

Na Figura 3, os pontos 1, 2, 3 e 4 são as posições dos injetores atmosféricos. Os injetores atmosféricos são equipamentos fixos e de baixa penetração no banho. Os pontos 5 e 6 são referentes às lanças supersônicas, que possuem movimento de avanço e recuo além de pressão suficiente para formar um cavidade no banho metálico ou bacia de descarburização. Uma foto do aparato montado é apresentada na Figura 4.

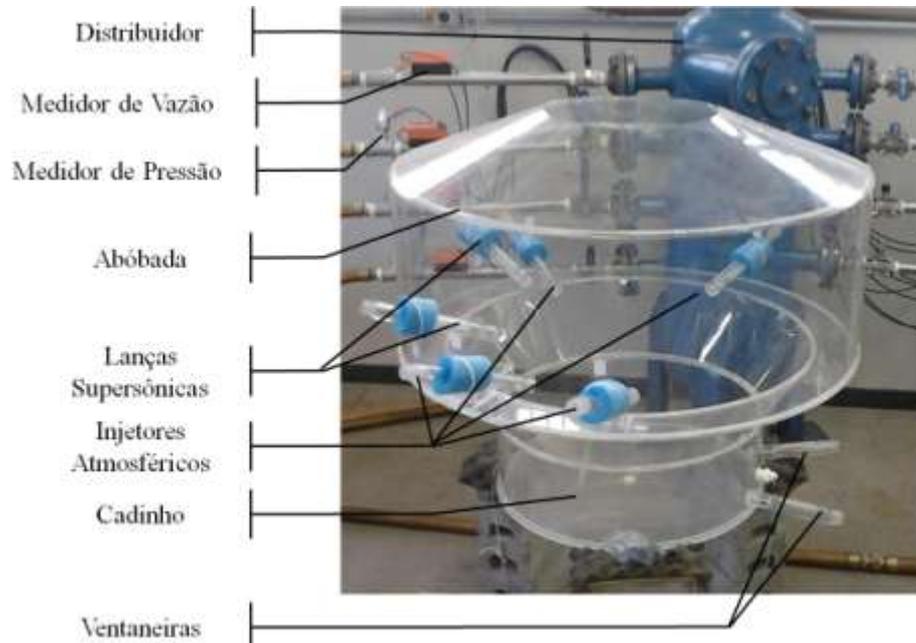


Figura 4 – Aparatos do modelo a frio do EOF.

Os números adimensionais considerados para garantir a similaridade do sistema são apresentados na Tabela e a matriz de teste na Tabela com base nos desenvolvimentos de Barbosa⁽³⁾ e Carneiro⁽⁴⁾.

Tabela I- Numeros adimensionais do modelo a frio do EOF.

		Supersonic Lances	Atmospheric Injectors	Tuyeres
INDUSTRIAL				
Fr*	#	0,11	9,511E-05	4,56
Re*	#	2,803E+05	1,825E+05	1,879E+05
We*	#	2,028E+03	3,727E+01	2,509E+03
COLD MODEL				
Fr*	#	0,11	7,064E-04	4,83
Re*	#	8,419E+04	4,810E+04	6,280E+04
We*	#	1,606E+03	5,116E+01	2,573E+03

Tabela II- Matriz de experimentos do EOF.

Supersonic Lances(#)			Atmospheric Injectors Position	Tuyeres (#)
0	1	2	1 - 4	0
				1
				2
			2 - 3	0
				1
				2
			1 - 2 - 3 - 4	0
				1
				2

Para determinação do tempo de mistura, durante os testes, a fenolftaleína foi adicionada no banho estático, em seguida os pontos de injeção de ar foram acionados. Com o perfil de movimentação alcançado, era adicionado 50ml da solução de soda cáustica 0,2g/ml. O tempo de mistura foi determinado quando todo o volume de água do reator passava de incolor a rosáceo, conforme **Figura 5**.

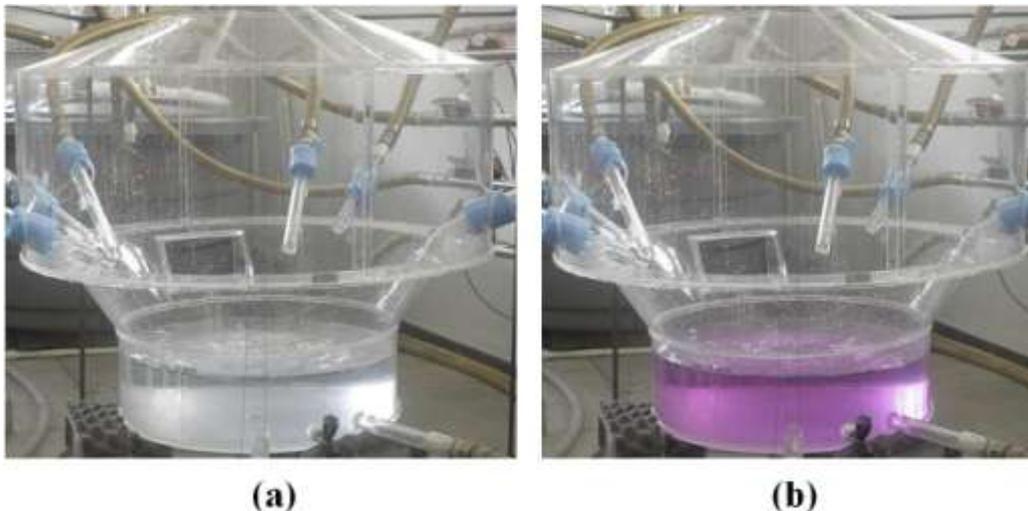


Figura 5 – Método colorimetria. a) água e fenolftaleína e b) água, fenolftaleína e soda cáustica.

Em todos os testes, foi considerado o tempo desde o acionamento do compressor, o alcance de estabilidade na capacidade de compressão; momento este ao qual era adicionada a solução de fenolftaleína, homogeneização do banho como um método alternativo ao utilizado por Maia⁽⁵⁾ e Diaz *et al*⁽⁶⁾ para caracterizar o tempo de mistura em meios turbulentos.

Os dados foram tratados no *software* estatístico “Minitab” através da execução da matriz de experimentos “DOE” e os valores analisados utilizando os recursos de “Superfície de Resposta”⁽⁹⁾.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **Figura 6** é possível verificar o comportamento a partir dos valores de referência dos equipamentos, no caso: Injetores 2 e 3, uma ventaneira e uma lança supersônica. Considerando apenas uma lança supersônica, no quadro superior direito é possível verificar que apenas uma ventaneira é a responsável pela redução do tempo de mistura. Este fato é caracterizado pela tendência das linhas de iso-tempo de mistura serem próximas da horizontal. Apenas com o uso dos quatros

injetores é observada uma leve tendência de queda, mostrando sua baixa influência no tempo de mistura do EOF.

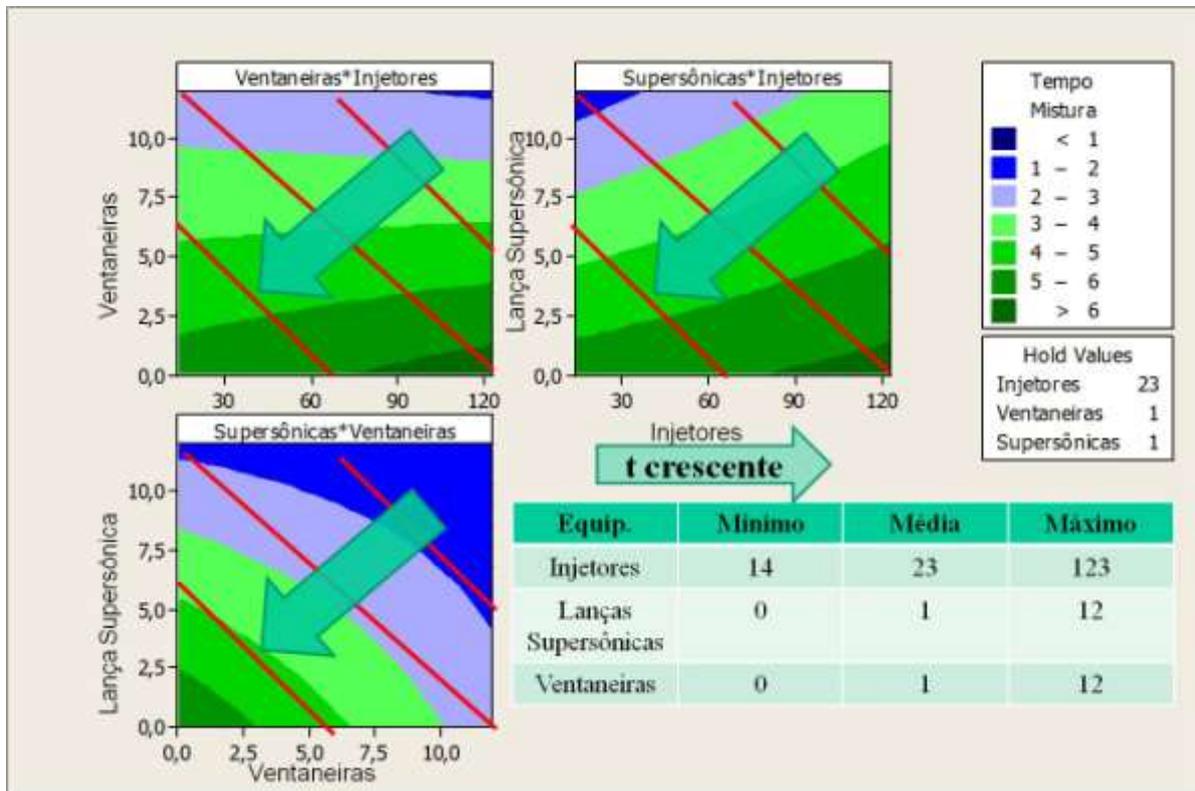


Figura 6 - Superfície de contorno para tempo de mistura no EOF – Valores de saída médios.

No quadro superior esquerdo, a superfície é gerada com base no funcionamento de apenas 01 ventaneira. Nesta condição o menor tempo foi obtido apenas pela operação das duas lanças supersônicas. As curvas também demonstram que a entrada de todos os injetores aumenta o tempo de mistura. A partir destas duas primeiras análises é possível verificar que os injetores não exercem grande influência sobre o tempo de mistura. No quadro inferior esquerdo a superfície de resposta foi gerada com base no funcionamento dos injetores 2 e 3, sendo o valor de tempo de mistura superior a 5 segundos, quando ventaneiras e lanças supersônicas estão desligados. Nesta condição, é possível notar que o menor tempo de mistura foi atingido com o uso das duas ventaneiras e dos dois injetores. Por outro lado, para a condição de máxima utilização dos equipamentos, os resultados são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

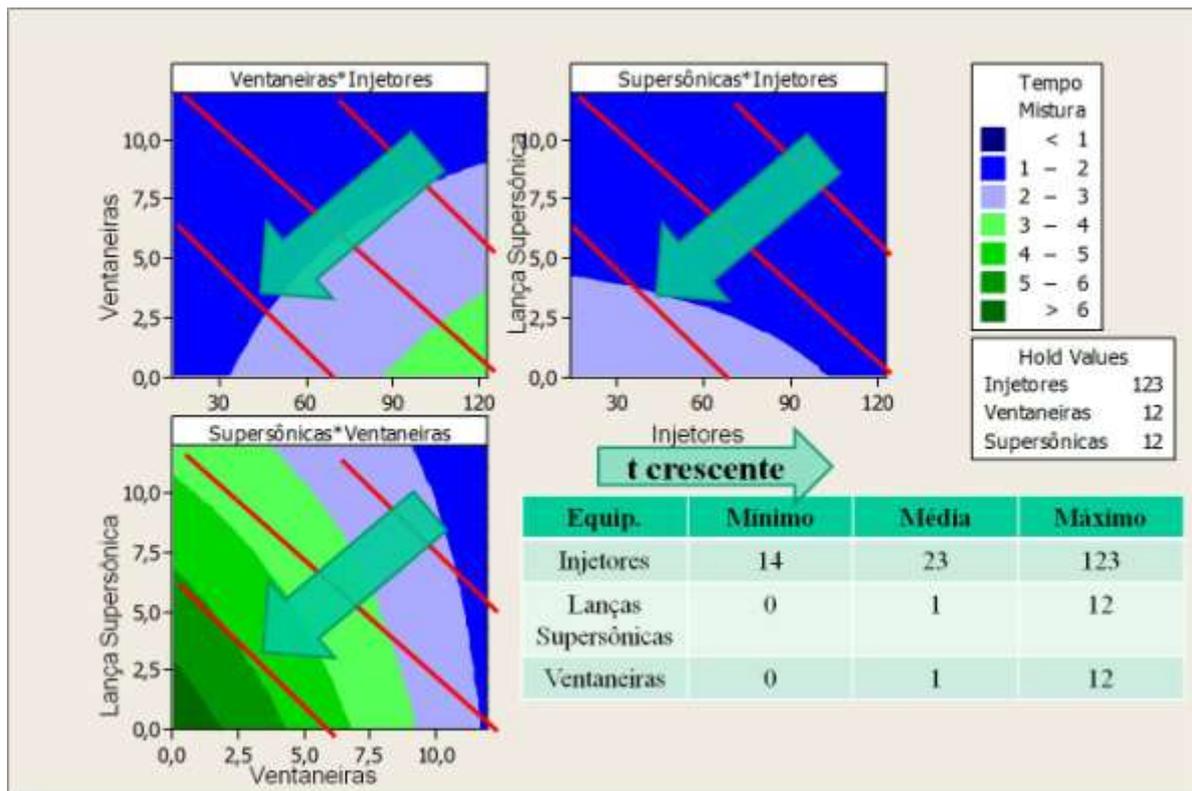


Figura 7 - Superfície de contorno para tempo de mistura no EOF – Valores de saída máximos.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o quadro superior esquerdo, compara o desempenho de injetores e ventaneiras considerando o funcionamento das duas lanças supersônicas. É possível notar uma grande área com tempos entre 1 e 2 segundos desde a origem dos eixos até o funcionamento com duas ventaneiras. Este resultado demonstra a influência das lanças supersônicas no tempo de mistura. Os injetores tem baixa penetração e portanto, baixo tempo de mistura do banho. No quadro superior direito, o valor fixado considera o funcionamento de todas as ventaneiras. Nesta configuração, a redução do tempo de mistura é determinada pelo número de lanças supersônicas em operação. Somente no campo de funcionamento dos quatro injetores, é possível notar a redução de 1segundo no tempo de mistura. Finalmente no quadro inferior esquerdo, é possível notar a baixa eficiência dos quatro injetores funcionando, com tempos de mistura superiores a 6 segundos. À medida que entram em operação ventaneiras e lanças supersônicas, os tempos de mistura são reduzidos. A partir da análise dos comportamentos dos equipamentos e suas variações de configurações, foi elaborado um gráfico demonstrando áreas sobrepostas por um tempo de mistura pré-definido, conforme apresentado na Figura 8.

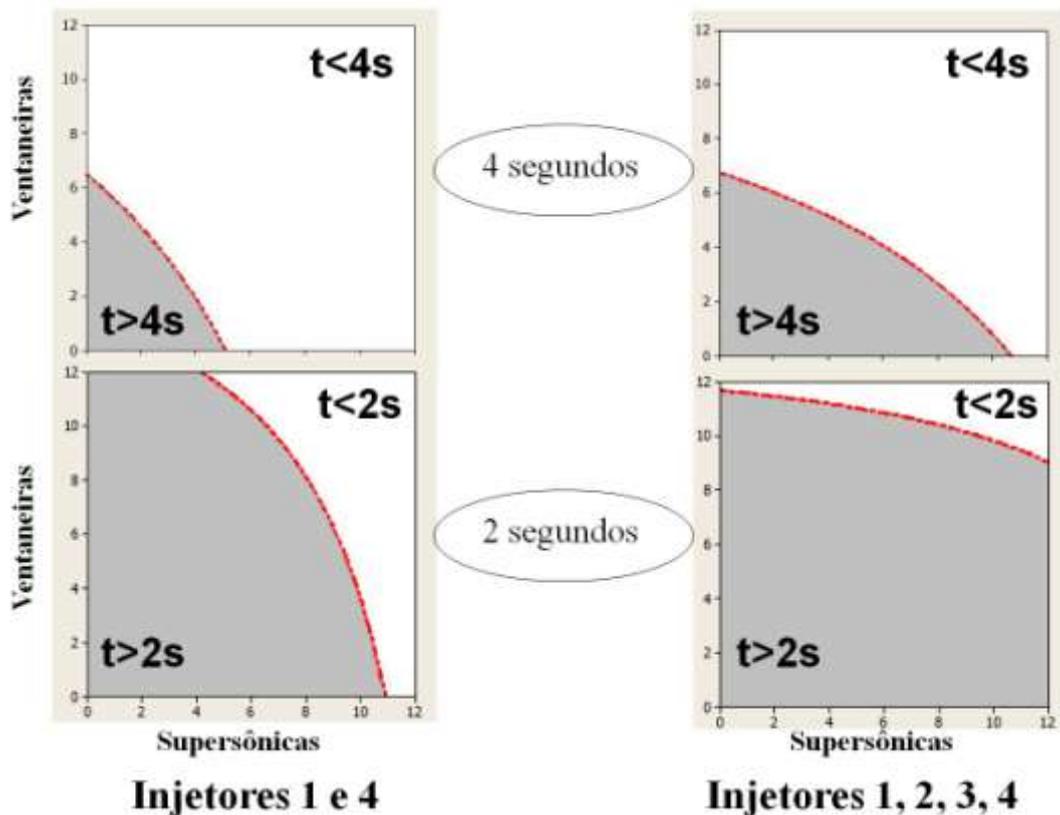


Figura 8 – Sobre posição das superfícies de contorno para tempos de 2 e 4s no modelo a frio do EOF.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que o tempo de mistura de 4 segundos é alcançado com metade dos equipamentos, mas demonstra um comportamento contrário ao esperado com relação aos injetores. O comportamento esperado era a redução do tempo de mistura com o aumento das fontes de agitação do banho. Neste caso, a redução de dois injetores propiciaram um maior campo de valores inferiores a 4 segundos. O mesmo comportamento pode ser detectado para o tempo de 2 segundos, restringindo drasticamente este campo. Isso reforça a indicação de que as lanças supersônicas e as ventaneiras são os principais agentes de movimentação do banho. Em razão das vazões, as lanças supersônicas têm papel predominante no processo produtivo por elevarem taxa de descarburção.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões retiradas das análises do tempo de mistura do EOF são:

1. EOF é um reator excelente para promover a mistura gás-banho;
2. Os injetores atmosféricos têm pouca influência sobre o tempo de mistura;
3. As lanças supersônicas e ventaneiras são responsáveis pelos menores tempos de mistura;
4. Ventaneiras promovem alteração na densidade do banho, promovendo circulação rotacional;
5. Lanças supersônicas tem momento suficiente para garantir uma boa penetração no banho.

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, a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa continuada e a FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido ao projeto PROCESSO Nº. : TEC - APQ-00373-11 - “MODELAMENTO FÍSICO E MATEMÁTICO DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM SISTEMAS METALÚRGICOS.

REFERÊNCIAS

- 1 KORTEC. **Training Manual for K.O.R.F.**, ed. Steelmaking Edition, Baarerstraße 21 Switzerland. Set.1986.
- 2 Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains. **Pains 25 anos: 10.10.53 – 10.10.78.**, 1978.
- 3 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).
- 4 CARNEIRO, F. L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1996. (1º Edição 1993).
- 5 MAIA, B. T., *Efeito da Configuração do Bico da Lança na Interação Jato-Banho Metálico em Convertedor LD*: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 6 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.
- 7 MINITAB Manual de Treinamento – Superfícies de Respostas. Release 13 Version 2.1. MINITAB, 2000.