



Tema: Aciaria Oxigênio

MODELO A FRIO DO EOF – ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO BANHO*

Ana Clara Petrucelli¹
 Breno Totti Maia²
 Gustavo Abreu³
 Rafael Kajimoto Imagawa⁴
 Roberto Parreiras Tavares⁵

Resumo

O reator EOF foi desenvolvido no Brasil nos anos 1980 com características únicas. O pré aquecedor de sucata e a distribuição dos pontos de injeção de gases oxidantes e combustíveis conferem estas características. O objetivo deste trabalho é reproduzir o comportamento do banho metálico de um EOF de 45 t comparando seus três pontos de injeção: lanças supersônicas, lanças atmosféricas e ventaneiras. A lanças supersônicas e ventaneiras promoveram uma grande agitação do banho quando comparado com os injetores atmosféricos uma grande oportunidade de melhoria.

Palavras-chaves: EOF; Lanças supersônicas; Injetor; Ventaneira; Modelo a frio.

EOF COLD MODEL – STUDY OF BATH BEHAVIOR

Abstract

The EOF reactor was developed in Brazil in the eighties with unique features. The preheating of scrap and distribution of injection points oxidizing gases and fuels make up these features. This papers aims to reproduce the behavior of the metal bath an EOF of 45t comparing their top three gas injection equipment: supersonic lances, atmospheric injectors and tuyeres. The lances and tuyeres promoted greater agitation of the bath with atmospheric injectors a great opportunity for improvement.

Keywords: EOF; Supersonic lances; Injector; Tuyere; Cold model.

¹ Aluno de Graduação, Curso de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Doutor Pesquisador, Lumar Metals, Sócio da ABM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Aluno de Graduação, Curso de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

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

⁵ Engenheiro Metalurgista, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Sócio da ABM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Segundo o Manual da Kortec [1], os tradicionais “Open Hearth Furnace”, dependendo exclusivamente de combustível para produzir energia de aquecimento, tinham seu limite prospectado. O processo então denominado “KORF – KORF Oxi-Refining Fuel” foi um sistema integrado envolvendo modificações nas estruturas dos Siemens-Martin (*Open Hearth*), mudanças no revestimento dos fornos e mudanças nos métodos e práticas de operação através de uma combinação dos processos regenerativos e pneumáticos. Um dos principais parâmetros foi o aumento da produtividade horária, aproximadamente o dobro, como consequência da redução do tempo de ciclo. Com a redução do tempo de *tap to tap*, a perda térmica foi reduzida, assim como a necessidade de combustível contribuindo para o aumento da competitividade do aço com a redução dos custos operacionais. Com os princípios fundamentais do KORF, novos desenvolvimentos foram realizados na planta da Pains resultando no EOF (“*Energy Optimizing Furnace*”), um forno com grande flexibilidade no processo. A Figura 1 apresenta um esquema da primeira concepção do EOF.

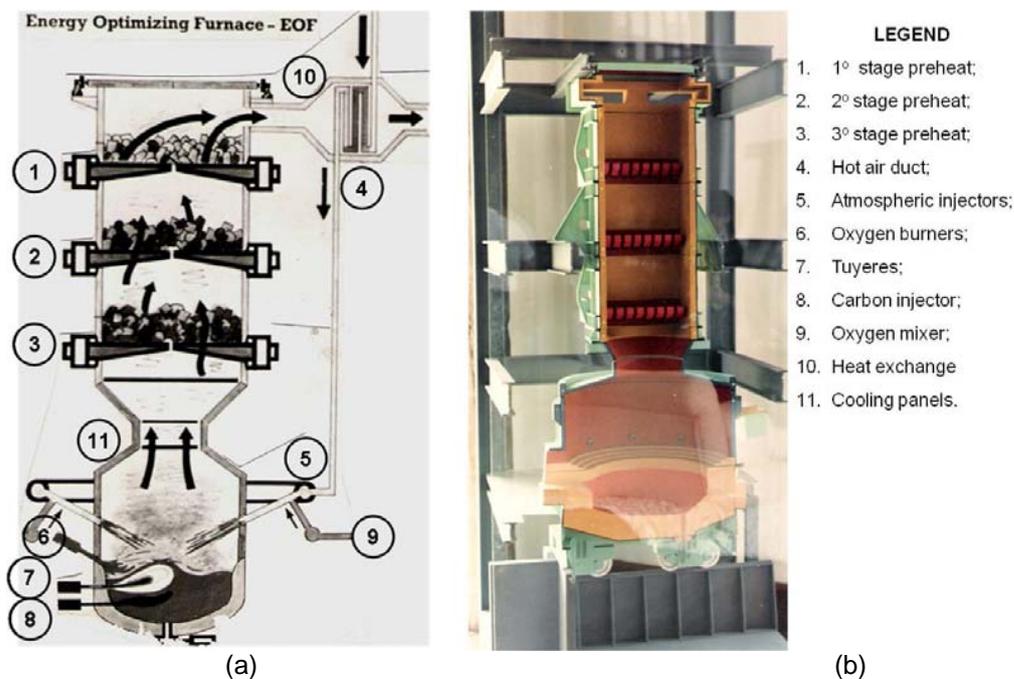


Figura 1. Concepção do primeiro EOF: (a) Esquema e (b) Maquete [2].

Na Figura 1, conforme Catálogo da Companhia Siderúrgica Pains [2], pode ser visto que o EOF originalmente era composto com estágios de pré-aquecimento de sucata indicados pelos números de 1 a 3. Cada etapa de pré-aquecimento representa uma corrida a ser processada no refino primário. Na concepção, o EOF dispunha de um sistema para pré-aquecer o ar (nº.10), auxiliando os injetores de pós-combustão (nº. 5) que podiam ainda, ter sopro enriquecido com oxigênio (nº. 9). Era possível recarburar o banho através de injeção de carbono (nº. 8), ou por outro lado, aumentar a descarbonização através de ventaneiras (nº. 7). Um dos grandes avanços do processo foi a inserção dos queimadores de oxigênio (nº. 6), que contribuiriam para acelerar as reações de oxidação do banho. Acima da linha dos refratários, todo o caminho do gás de combustão é contido por painéis refrigerados (nº. 11). Após o aproveitamento da energia para pré-aquecer a sucata, a energia remanescente

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



ainda é aproveitada no recuperador (nº. 10) para pré-aquecer também o ar para pós-combustão. Desta configuração original para a atual, muitas alterações foram feitas tanto com relação à funcionalidade dos equipamentos quanto principalmente aos conceitos utilizados face as reais possibilidades de ganho deste reator siderúrgico, como será explorado adiante. O EOF – “Energy Optimizing Furnace” atual utiliza somente um estágio pré-aquecimento de sucata simples e eficiente através de gases produzidos no processo através de 8 pontos injeção de oxigênio em 03 diferentes formas no gusa líquido juntamente com sucata [3].

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.

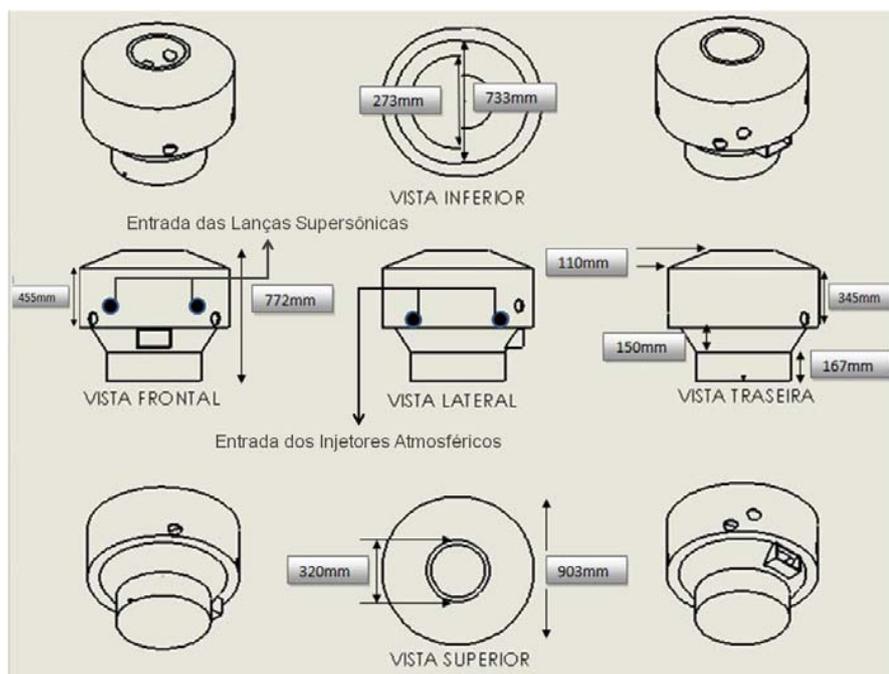


Figura 2. Vistas e dimensões do modelo físico do forno EOF.

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.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

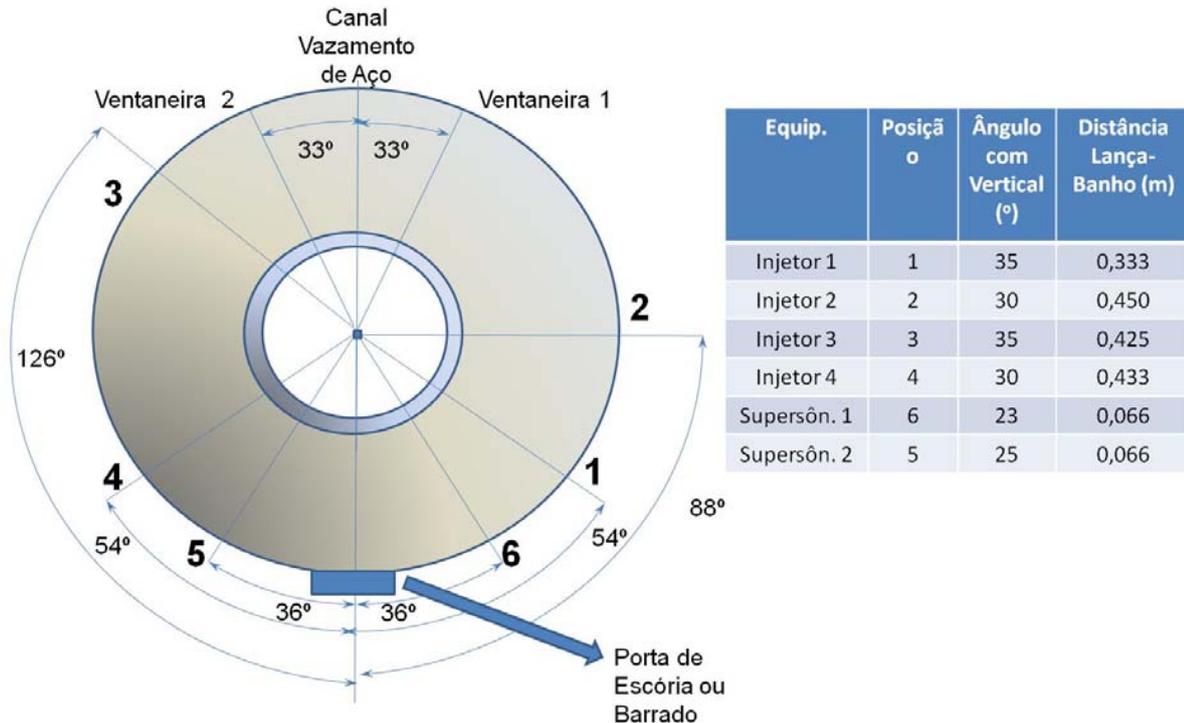


Figura 3. Modelo a frio do EOF e posição injetores.

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.

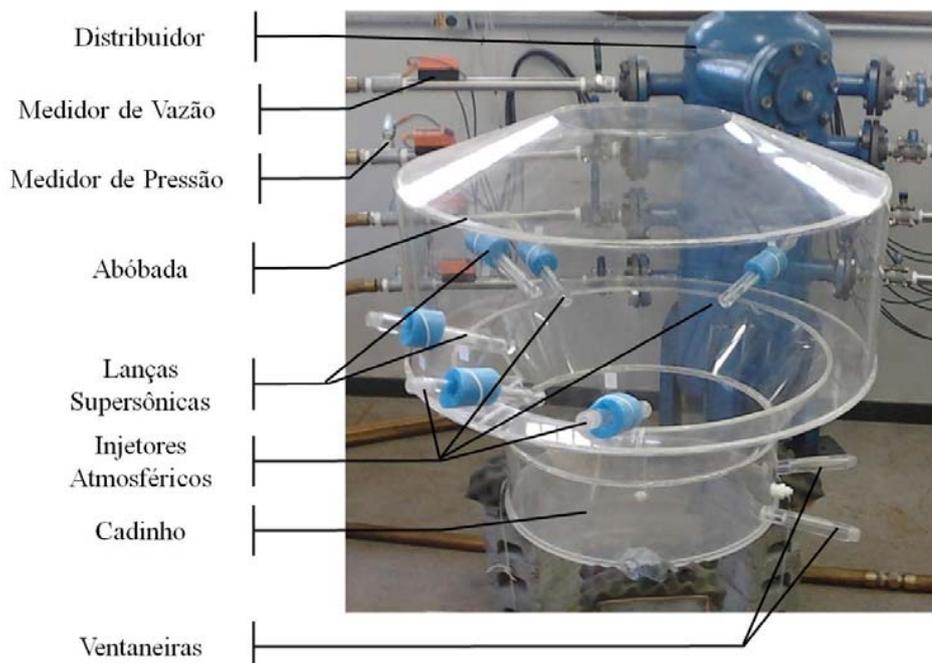


Figura 4. Aparatos do modelo a frio do EOF.



Os números adimensionais considerados para garantir a similaridade do sistema são apresentados na Tabela 1 e a matriz de teste na Tabela 2 com base nos desenvolvimentos de Barbosa [4] e Carneiro [5].

Tabela 1. Números 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 2. Matriz de experimentos do EOF

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

O perfil de movimentação foi realizado através de câmera de vídeo de acordo com a Tabela 2 e realizado filmagens isoladas de cada equipamento de injeção.

De acordo com a matriz de testes do EOF, foram realizadas coletas do líquido passante pela porta de escória. O volume de água, representando a perda metálica pela porta de escória foi quantificado em mililitros. O tempo de coleta foi um fator influenciado pelas configurações testadas, desta forma o volume encontrado foi dividido pelo tempo, gerando uma taxa média de perda de líquido.

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 [6] e Diaz *et al.* [7] para caracterizar o tempo de mistura em meios turbulentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O EOF, conforme descrito, foi concebido para que as reações de descarburização fossem realizadas através do mecanismo de difusão do carbono do banho líquido até a atmosfera oxidante acima da escória. O equipamento também possuía queimadores a oxigênio com objetivo de acelerar a fusão da sucata. Com os aprimoramentos, foram introduzidas lanças supersônicas que propiciaram uma redução na distância lança-banho através de sua movimentação para o interior do reator, mas também devido ao considerável aumento da velocidade do oxigênio.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

A Figura 5 apresenta um quadro de imagens, sendo da esquerda para direita ensaios com o aumento da utilização de lanças supersônicas e da posição superior para inferior o aumento da utilização de ventaneiras. Abaixo de cada quatro são apresentados os injetores que estavam em operação.

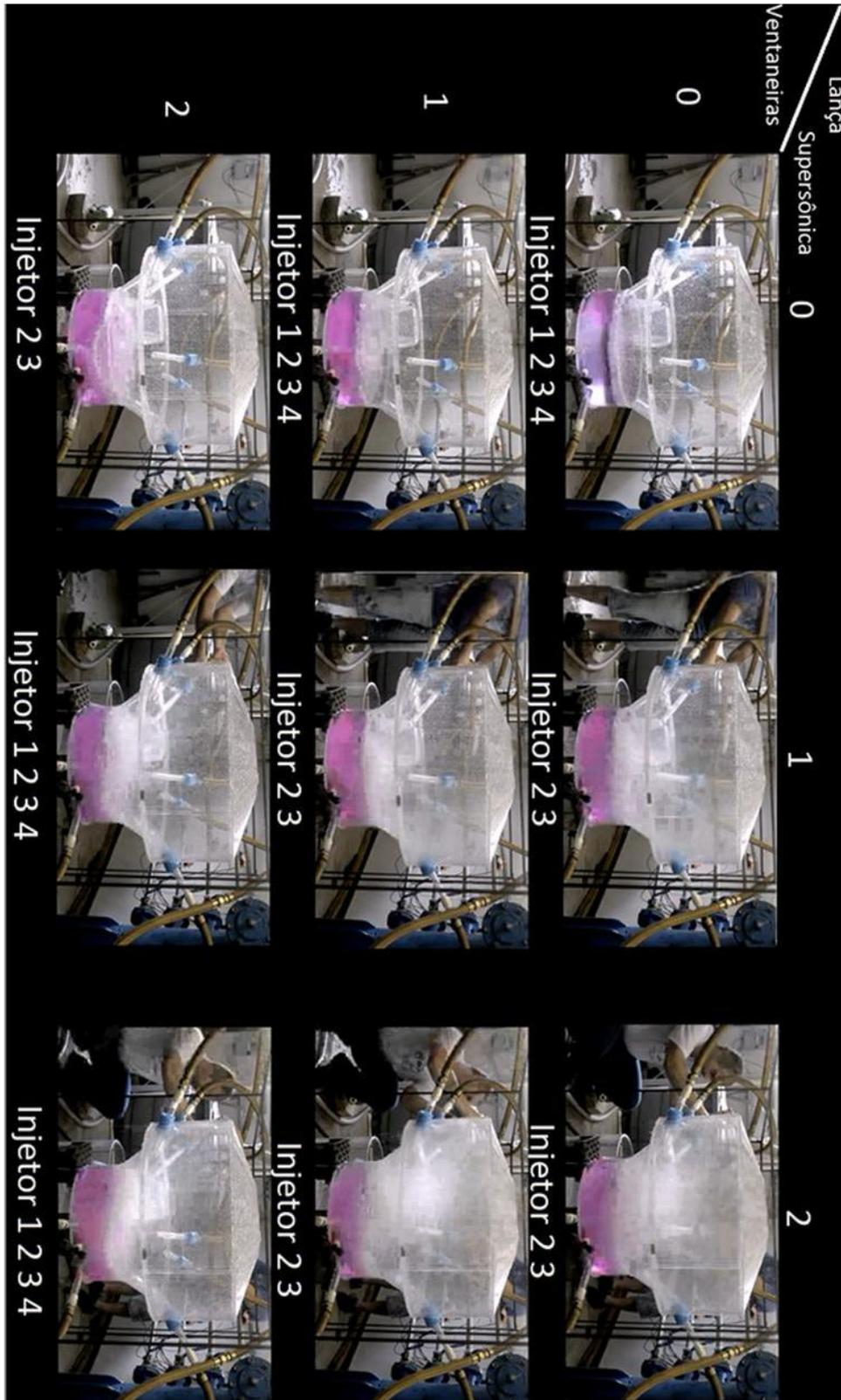


Figura 5. Perfil de movimentação do EOF com a utilização dos todos os pontos de injeção.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



Atualmente, o EOF dispõe de oito pontos de injeção de oxigênio sendo dois pontos submersos no banho líquido através das ventaneiras, quatro pontos através dos injetores atmosféricos que possui baixa penetração no banho devido ao caráter de pós-combustão e dois pontos com velocidades supersônicas e grande proximidade do banho através das lanças com movimento de avanço.

Porém a discussão está na quantidade de oxigênio, em torno de 70%, aplicada nos quatro injetores atmosféricos para obtenção de energia durante a pós-combustão, diante da necessidade de incremento na taxa de descarburização do banho.

Após aproximadamente três décadas desde sua posta em marcha, acredita-se ser este um estudo inédito para descrever o comportamento do banho líquido nesse reator.

Em função da matriz de teste, as análises foram realizadas em duas condições. A primeira analisando a presença de todos os injetores em operação e a segunda apenas aos pares.

Durante a execução da matriz de teste apresentada na Figura 5, foi constatado um padrão comum de movimentação do banho caracterizado por uma rotação em sentido anti-horário. O banho líquido, nesta condição, apresenta leve ondulação com rotação no sentido anti-horário, sem a formação de covas (*dimpling*), conforme apresentado na Figura 6. Os comportamentos foram descritos por Lee *et al.* [8].

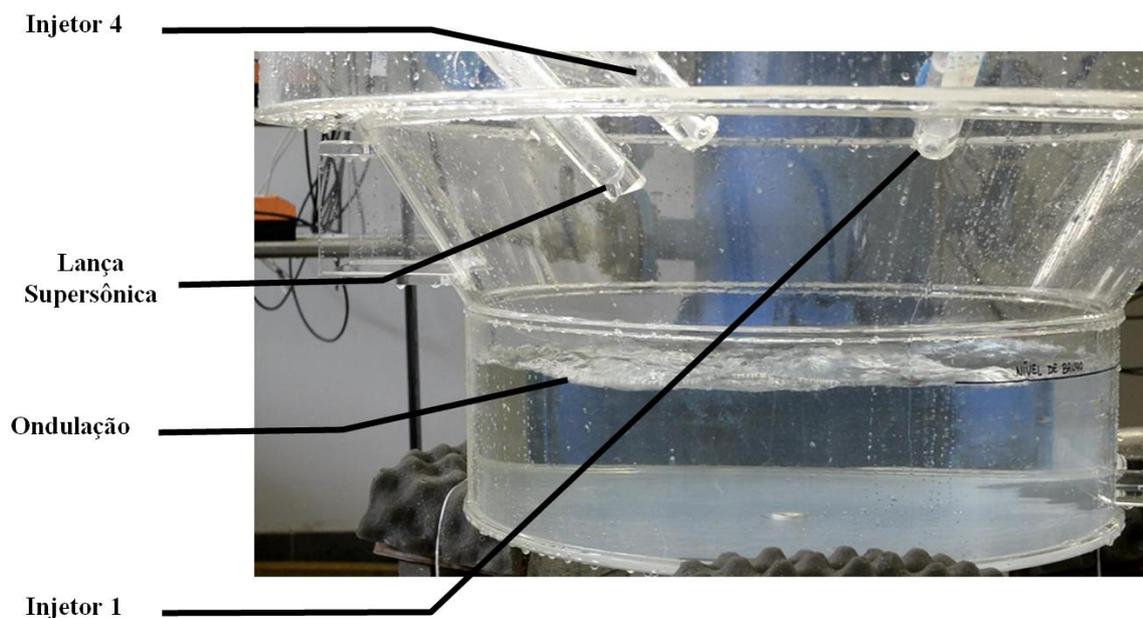


Figura 6. Comportamento da interação injetores com o banho metálico no EOF.

A Figura 7 apresenta o comportamento da interação das ventaneiras com o banho metálico. Com a entrada de apenas uma das ventaneiras é possível notar borbulhamento próximo do centro do forno e a incidência de esguichos (*gush*). As ventaneiras intensificam a velocidade de rotação do banho. O ar injetado pelas ventaneiras causa a redução da densidade aparente da água nesta região. O líquido ao lado, com densidade aparente maior, força a direção do escoamento do mais denso para o menos denso no sentido anti-horário.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

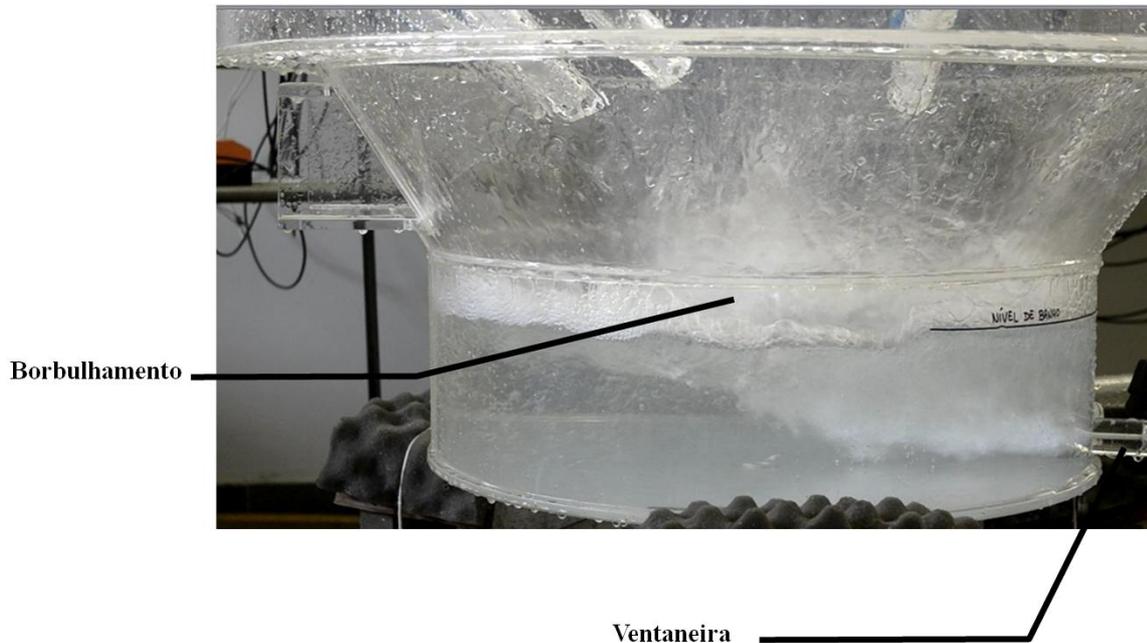


Figura 7. Comportamento da interação das ventaneiras com o banho metálico no EOF.

Na Figura 8, com a entrada de apenas uma lança supersônica é possível notar a penetração do jato no banho líquido e a formação de uma cova inicial profunda, formada pela penetração do jato. O mergulho (*plunge*) da massa deslocada com a onda formada com a cova é em direção ao centro do forno.

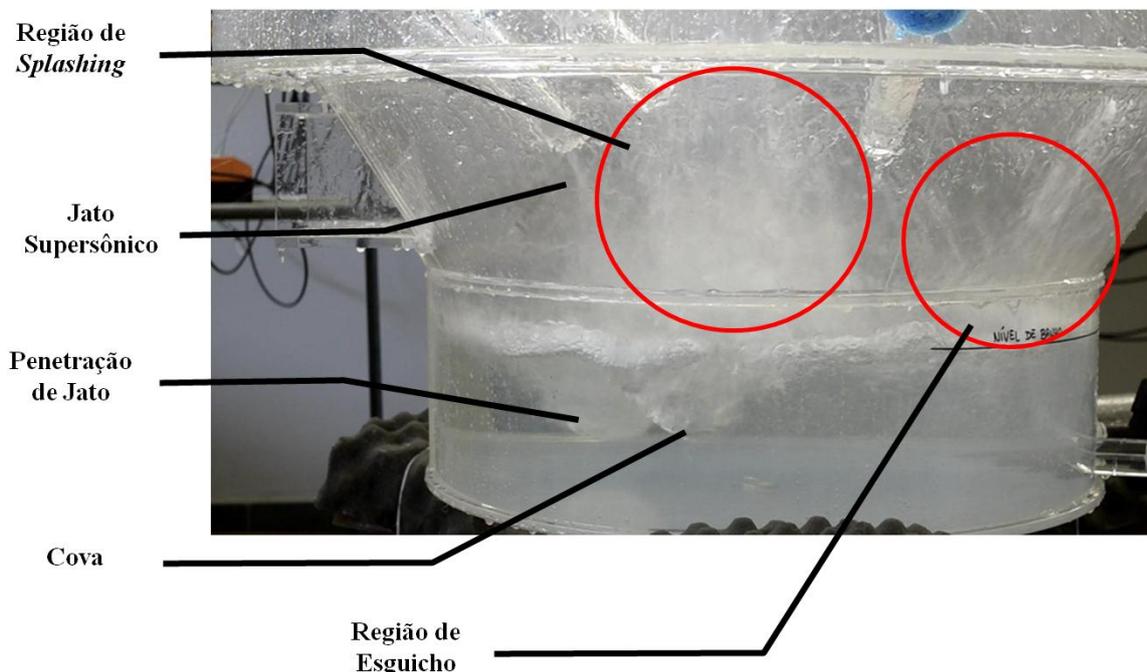


Figura 8. Comportamento da interação jato supersônico banho metálico no EOF.

O deslocamento da cova é responsável por *splashing* formando um esguicho, em geral na vertical e sobre a parede oposta à posição da lança supersônica. Uma dificuldade encontrada durante a execução dos experimentos foi garantir a direção ortogonal entre o jato supersônico e a superfície do banho. A fixação elaborada não foi suficiente para conter as elevadas velocidades aplicadas no ponto. Esta variação teve reflexos no comportamento do banho. Com o aumento de ventaneiras e lanças

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

supersônicas, o movimento do banho é intensificado, reduzindo o tempo de mistura. Foi realizada uma matriz considerando apenas os pares de injetores, apresentados na Figura 9.



Figura 9. Perfil de movimentação do EOF com a utilização de pares de injetores.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



Na Figura 9, o comportamento do banho foi similar aquele com a utilização de todos os injetores e mostrando novamente a preponderância de lanças supersônicas e ventaneiras no movimento do banho e, como visto anteriormente no tempo de mistura.

Durante a execução da matriz de teste para determinação do tempo de mistura no EOF pelo método da colorimetria, foi preparado um dispositivo para coleta do banho que passava pela porta de escória. O volume coletado foi dividido pelo tempo de ensaio, gerando uma taxa média de perda. Os resultados desta avaliação são apresentados na Figura 10.

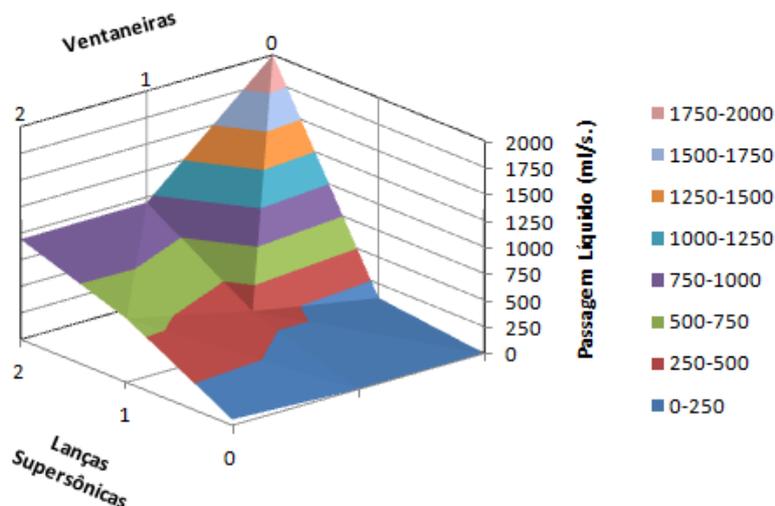


Figura 1. Taxa de perda de banho passante pela porta de escória do EOF.

A Figura 10 mostra que a maior perda ocorre com a utilização das duas lanças supersônicas. O comportamento esperado era que a taxa fosse maior com as duas ventaneiras em funcionamento. Os testes foram realizados apenas com o EOF na posição 0° , ou seja, sem nenhum basculamento. A observação das imagens permite descrever o comportamento. As ventaneiras promovem a redução da densidade do meio e a rotação no sentido anti-horário. Isto faz com que o banho, ao passar na região das lanças supersônicas, seja atomizado, gerando uma fração de névoa. Quando o sopro consiste apenas no uso das lanças supersônicas, a banho líquido está com sua densidade aparente próxima da real, aumentando à resistência a penetração do jato e a incidência de respingos e esguichos. Como o jato da lança supersônica está posicionado perpendicular ao banho líquido e próximo a porta de escória, aumenta o volume de líquido passante por esta abertura.

Os injetores atmosféricos presentes em todas as matrizes não afetaram a taxa de perda, podendo ser notado na Figura 10 para a condição onde não estava em operação ventaneiras e lanças supersônicas. Baseado nestes resultados, uma sugestão para o aperfeiçoamento do processo o EOF, é a redistribuição das lanças supersônicas, principalmente para região do vazamento de aço, posição ao qual o EOF permanece basculado para $+8^\circ$ em substituição aos injetores atmosféricos.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões retiradas das análises do perfil de movimentação EOF são:

1. O banho apresenta movimento rotacional no sentido anti-horário para todas as configurações testadas;

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



2. A utilização apenas dos injetores atmosféricos formam pequenas covas na superfície do banho com penetração insignificante;
3. A utilização de ventaneiras causa borbulhamentos na superfície do banho com a formação de esguichos;
4. A injeção de gás pela ventaneira causa a redução da densidade efetiva do líquido, contribuindo para a movimentação do banho;
5. As lanças supersônicas penetram no banho, formando uma cova profunda que se desloca no sentido do canal de vazamento;
6. As lanças supersônicas formam região de espalhamento à frente da cova inicial e respingos em todas as direções;
7. Os injetores atmosféricos, devido à baixa movimentação do banho, não provocaram perdas significativas de banho líquido pela porta de escória;
8. As lanças supersônicas provocaram a maior perda devido à proximidade da porta de escória;
9. As lanças supersônicas, quando associadas com as ventaneiras, apresentam uma perda pela porta de escória inferior à utilização de somente lanças supersônicas;

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 N^o.: 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 Grupo Gerdau. Chama Empreendedora - A história e a cultura do Gerdau 1901-2001. São Paulo: Prêmio Editorial Ltda.; 2001.
- 4 Barbosa FA. Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas [dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2002. p.188.
- 5 Carneiro FL. Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ; 1996.
- 6 Maia BT. Efeito da configuração do bico da lança na interação jato-banho metálico em convertedor LD [dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2007.
- 7 Diaz-Cruz M, Morales RD, Olivares O, Elias A. Physical and mathematical models of gás-liquid dynamics in BOF converters. In: Steelmaking Conference Proceedings; 2002. p.737-748.
- 8 Lee MS, O'Rourke SL, Molloy NA. Fluid flow and surface waves in the BOF. ISS Transactions. 2002:56-65.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.