

INFLUÊNCIA DO SOPRO DE VENTANEIRAS SOBRE AS REAÇÕES DE REFINO NO BOF DA TERNIUM BRASIL*

Débora C.O. Silveira¹
Mariana A. Ribeiro¹
Raissa S. Salgado¹
Roberto P. Tavares²
Breno T. Maia³
Daniel A. G. de Carvalho⁴

Resumo

No processo de sopro combinado, a injeção de gás inerte pelo fundo promove maior agitação do banho metálico, favorecendo as reações de refino dependentes da transferência de massa entre metal e escória. Este processo é fundamental para remoção de componentes do aço, como fósforo e enxofre. O presente trabalho avalia a homogeneização do banho e a transferência de massa através de experimentos realizados em um modelo a frio do convertedor LD da Ternium Brasil. Levando em conta critérios de similaridade, os resultados laboratoriais podem ser transpostos à indústria. Foi avaliada a influência da vazão e configuração de ventaneiras sobre a eficiência de processos de refino que envolvem transferência de massa entre metal e escória, obtendo-se desta forma a configuração de ventaneiras que mais favorece a transferência de massa diante dos parâmetros analisados.

Palavras-chave: BOF; Simulação à frio; Transferência de massa; Desfosforação.

BOTTOM BLOWING INFLUENCE OVER MASS TRANSFER REACTIONS AT TERNIUM BRASIL'S BOF

Abstract

The bottom blow in the BOF provides higher metal bath agitation, improving the refining reactions. Steel-slag mass transfer is a key step in the removal of different steel components, such as phosphorous and sulphur. In the present work, experiments were carried out in a cold model of Ternium Brasil converter aiming at evaluating bath homogenization and mass transfer. Based on similarity criteria, it is possible to transpose the laboratory results to the industry. It was evaluated the influence of tuyères flow rate and configuration on processes that involve mass transfer between metal and slag..

Keywords: BOF; Cold Simulation; Mass Transfer; Dephosphorization

¹ *Estudante de Graduação em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, Brasil.*

² *Professor-Titular - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.*

³ *Diretor Técnico e Industrial - Lumar Metals. Santana do Paraíso, Brasil.*

⁴ *Engenheiro de Processos - Ternium Brasil. Rio de Janeiro, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Diante de um mercado de grandes desafios e com grande nível de competitividade, a indústria siderúrgica busca melhorias em seus processos, visando a produção de aços de elevada qualidade, aliada a baixos custos de produção.

Diversos parâmetros estão envolvidos no processo de refino primário no BOF. O aperfeiçoamento de estudos sobre a vazão da lança, o número e ângulo de bocais, DBL (distância banho-lança), a disposição das ventaneiras e vazão de gás individual, é necessário para a prática industrial pois sua influência está diretamente associada à qualidade, produtividade e custo de produção de aço.

A injeção de gás inerte pelo fundo do convertedor combinada com sopro pela lança promove maior agitação do banho metálico, favorecendo as reações de refino baseadas na transferência de massa, como descarburização, desfosforação, dessulfuração e oxidação do manganês. Além disso, o sopro combinado permite reduzir as zonas de estagnação química e o teor de ferro na escória.

Os custos associados a experimentos em plantas industriais são muito elevados e interferem na rotina operacional. Por essa razão, técnicas de simulação física podem ser empregadas para o estudo dos processos industriais. A transposição dos resultados laboratoriais para a indústria pode ser realizada respeitando critérios de similaridades, expressos através da igualdade de certos números adimensionais.

Diante destes fatores, este trabalho avalia a influência da vazão de gás injetado nas ventaneiras sobre as reações de refino controladas pela transferência de massa, associado a um estudo cinético. Objetiva-se analisar a influência de condições operacionais, como a vazão individual e total de ventaneiras, bem como sua distribuição geométrica na sola do convertedor na eficiência das reações controladas pela transferência de massa aço-escória.

Foi possível também a realização de testes em escala industrial, na aciaria da Ternium Brasil, localizada no Rio de Janeiro. A usina conta com dois convertedores LD com 330t de capacidade, onde as ventaneiras também possuem controle individual de vazão.

2. METODOLOGIA

2.1. Testes laboratoriais

O estudo foi desenvolvido em um modelo de acrílico, em escala de 1/10, de um convertedor de 330t da Ternium Brasil, disponível no Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG). A Figura 1 apresenta o modelo em acrílico do BOF, assim como a representação esquemática da configuração de ventaneiras.

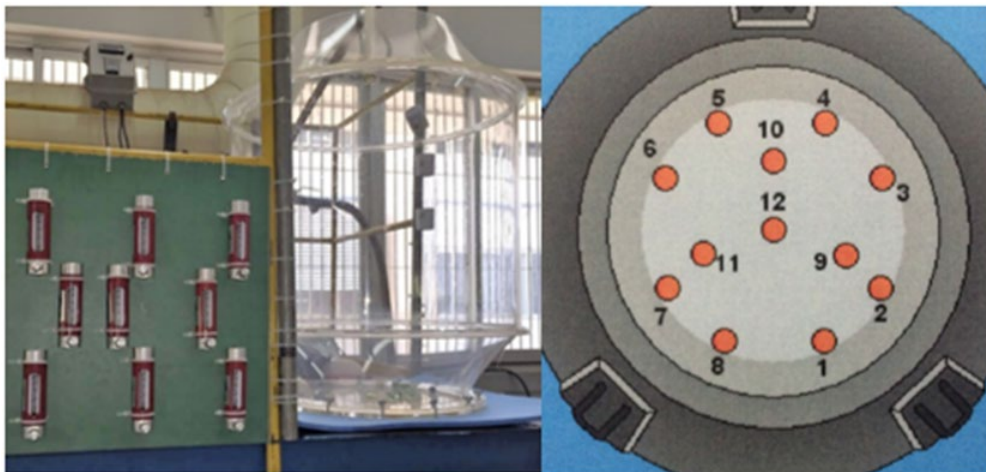


Figura 1: modelo físico e ventaneiras

O sistema dispõe de um vaso de acrílico, doze pontos de injeção localizados no fundo do conversor, que possuem controle individual de vazão por meio de rotâmetros. Além disso, o modelo conta com uma lança supersônica alimentada por um compressor de vazão nominal de $160\text{Nm}^3/\text{minuto}$ a 1 MPa.

Os testes laboratoriais consistiram em simulações a frio, em que foi realizado apenas o sopro pelo fundo, com o objetivo de replicar e avaliar as reações regidas por transferência de massa no convertedor LD, bem como analisar a homogeneização do banho.

Os experimentos tiveram como princípio o processo de extração por solventes. Uma solução aquosa foi colocada em contato uma fase orgânica, neste caso, óleo de soja. Foi adicionado ácido benzoico de concentração conhecida na fase aquosa e foi monitorada a variação de sua concentração em função do tempo, à medida que ele era transferido para a fase orgânica. Com base na similaridade dinâmica, a solução aquosa e o óleo representaram o aço e a escória, respectivamente.

Alíquotas da solução aquosa foram amostradas, em intervalos de tempo constantes, com auxílio de bomba peristáltica MasterFlex® L/S e um tubo de aço inoxidável, na mesma posição de amostragem, conectado à ponta oposta da mangueira conectada à bomba peristáltica, desde o acionamento das ventaneiras até o final do sopro. Os testes tiveram duração de cerca de 30 minutos.

A determinação da concentração instantânea de ácido das amostras foi feita por meio de titulação com NaOH ($C = 0,0247 \text{ mol/L}$). A partir dos valores de concentração obtidos e pelo valor de partição calculado em testes de bancada, pôde-se determinar o coeficiente de transferência de massa, através da equação de Kim e Fruehan (1987) modificada:

$$\frac{\ln\left[\frac{(1-hV_w/V_o)C_w/C_w^o - hV_w/V_o}{1+hV_w/V_o}\right]}{1+hV_w/V_o} = \frac{k_w A}{V_w} t \quad \text{Equação (1)}$$

Onde C_w^o e C_w = concentração inicial da solução aquosa e instantânea da solução, respectivamente (mol/L); k_w = coeficiente de transferência de massa; V_w e V_o = volume da fase aquosa e da orgânica, respectivamente (litros); h = relação de partição, t = tempo decorrido do experimento (seg). Sendo $h = C_w' / C_o$, em que C_w' e C_o = concentração na interface e na fase orgânica, respectivamente (mol/L).

Com base no modelo acima, foram construídos gráficos em que a inclinação representava o coeficiente de transferência de massa. O comportamento do gráfico é ilustrado na Figura 2.

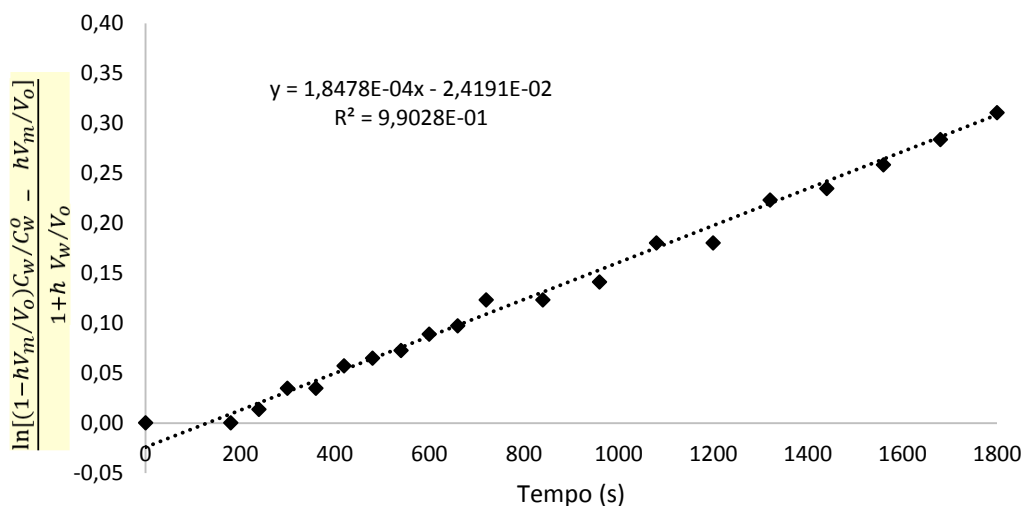


Figura 2: Gráfico para determinação de K

Este trabalho teve como objetivo analisar e comparar os coeficientes de transferência de massa para diversas configurações e vazões de ventaneiras, bem

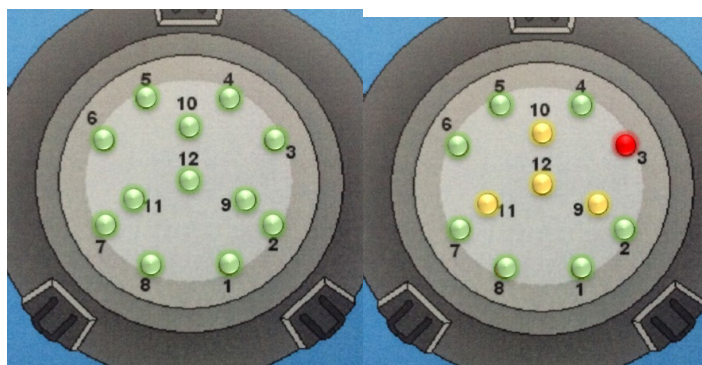
como reproduzir este tipo de experimento na prática industrial. Primeiramente, visou-se testar a influência da vazão total sobre a transferência de massa. Para isso, as ventaneiras foram acionadas com a mesma vazão individual e com a vazão total do sistema variando entre 12 e 60 NI/min, em intervalos de 12NI/min..

Em um segundo momento, a vazão total foi mantida constante (aproximadamente 33NI/min), objetivando determinar a relação entre configuração de ventaneiras e transferência de massa. Quatro configurações de sopro pelo fundo foram adotadas. A última configuração escolhida foi a chamada “Vortex”, onde a vazão individual das ventaneiras variou de maneira gradual. A distribuição da vazão foi feita objetivando induzir uma componente angular das velocidades e com isso maior área de mistura e tempo de residência do gás no banho. A Tabela 1 mostra a vazão individual das ventaneiras em cada experimento desta segunda etapa.

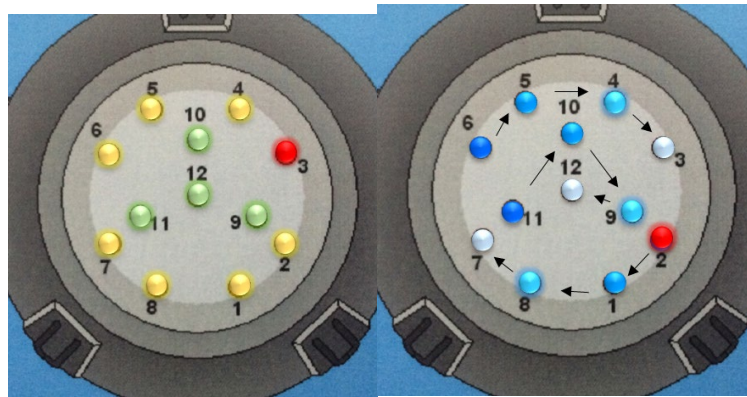
Tabela 1: Valores de vazão e as respectivas posições de cada ventaneira.

Teste	Ventaneiras e vazões individuais				Total (NI/min.)
	Internas e Central (NI/min.)		Externas (NI/min.)		
LaSiP 1	4 x 2,8		8 x 2,8		33,6
LaSiP 2	4 x 1,6		8 x 3,3		32,8
LaSP 3	4 x 5,0		8 x 1,6		32,8
Vortex	2,6 e 11	1, 5 e 10	4,8 e 9	3, 7 e 12	33,3
	3,6	3,0	2,5	2,0	

A Figura 3 esquematiza as configurações de ventaneiras utilizadas, em que 1, 2, 3,4 5, 6, 7 e 8 representam o raio externo e 9, 10, 11 e 12 o raio interno.



a) LaSiP 1 b) LaSiP 2



c) LaSiP 3 d) Vortex

Figura 3: a) LaSiP 1 b) LaSiP 2 c) LaSiP 3 d) Vortex

O coeficiente de transferência de massa foi determinado para todas as configurações de ventaneiras testadas. Vale ressaltar que os testes foram feitos em duplicata, a média e desvio padrão foram calculados e os experimentos tiveram um intervalo de confiança de 85% e tolerância de 15%.

Foram realizadas filmagens para todos os testes com o objetivo de caracterizar o comportamento do banho. As imagens foram feitas por duas câmeras, uma CANON 60D, que registrou as imagens frontais, e uma GoPro Hero+, que registrou a vista superior do experimento.

2.2. Testes industriais

Algumas alterações foram necessárias para que os testes pudessem ser replicados na empresa. Anteriormente, no padrão de sopro pelo fundo, a vazão total sofria variação ao longo do processo, entretanto, durante a realização do projeto uma vazão constante de $10\text{Nm}^3/\text{min}$. foi definida para todas as fases do sopro. A figura 4 mostra o padrão de sopro normalmente usado e o proposto.

Padrão de sopro pelo fundo

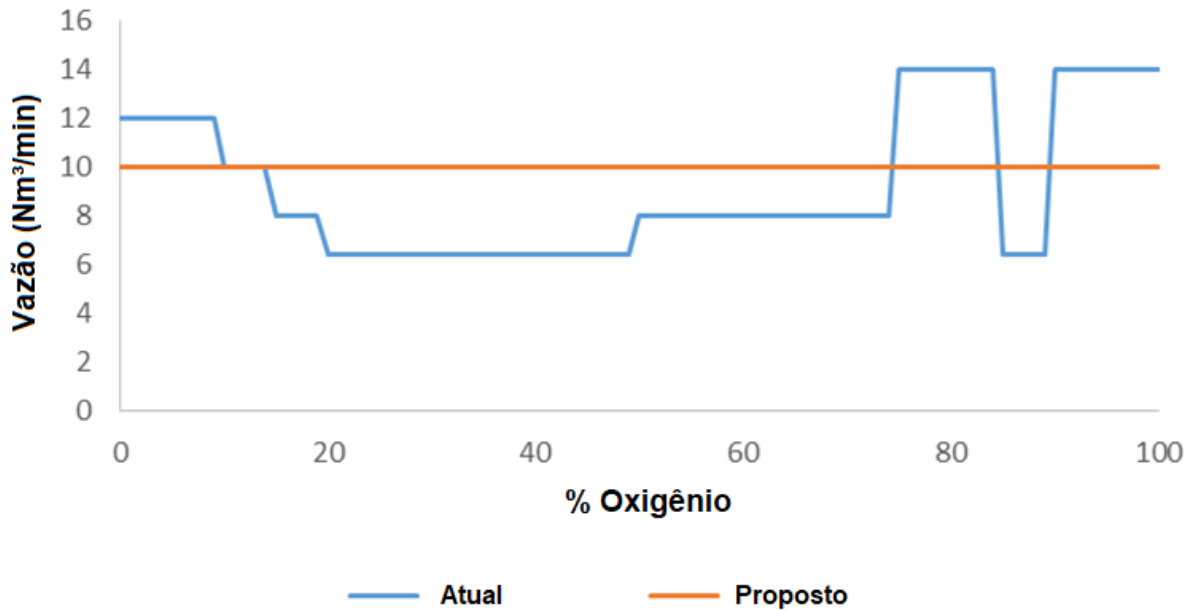


Figura 4: Padrão de sopro pelo fundo.

Escolheu-se realizar os testes no conversor 2, reator que apresentava menor tempo de campanha no período de execução dos testes.

As configurações testadas no modelo a frio foram replicadas na Ternium Brasil. A Figura 5 mostra um desenho esquemático das configurações replicadas nos testes.

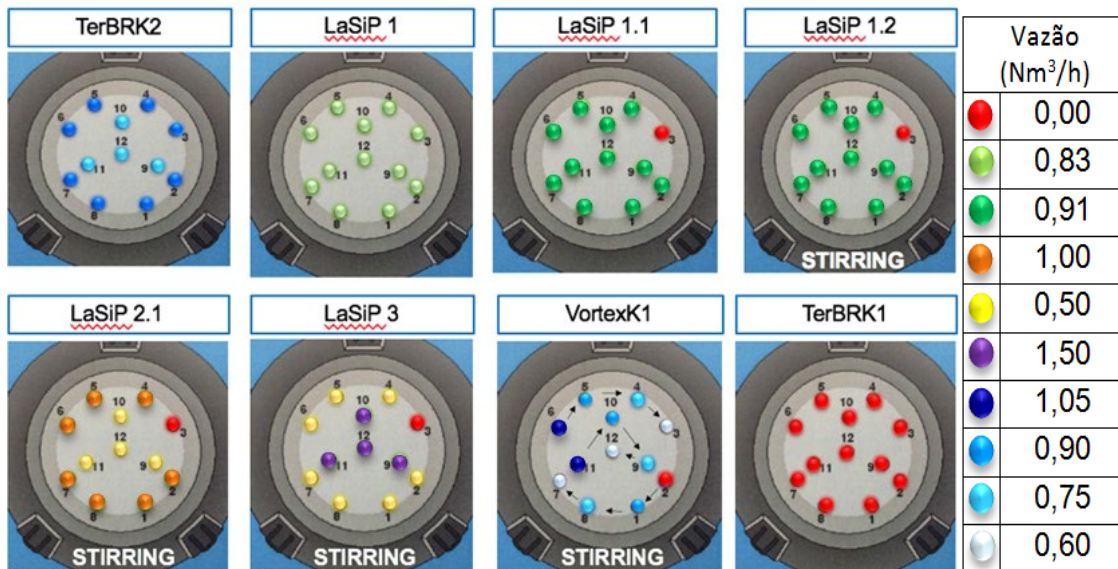


Figura 5: a) TerBRK2 b) LaSiP 1 c) LaSiP 1.1 d) LaSiP 1.2 e) LaSiP 2.1 f) LaSiP 3 g) VortexK1

Devido às limitações e inesperadas adversidades industriais, alguns testes sofreram alterações e ajustes foram necessários. Durante os testes, ocorreu a obstrução de

uma das ventaneiras (a partir de LaSiP 1.1) e a mudança do padrão de sopro também para etapa de *stirring* (também conhecido como *catch carbon*), que consiste na última etapa antes do vazamento em que apenas o sopro por baixo é utilizado e visa a retirada de gases do banho e melhor segregação entre o banho metálico e a escória (a partir de LaSiP 1.2). A configuração normalmente utilizada na empresa também foi analisada e chamada de TerBRK2. Nesta configuração, 20% da vazão das ventaneiras internas é transferida para a coroa externa. Dados do conversor 1, que estava no fim de campanha foram coletados juntamente. Denominada de TerBRK1, nesta configuração todas as ventaneiras estavam obstruídas.

Após a definição das configurações a serem testadas, delimitou-se as variáveis a serem analisadas. Foram elas, o grau de desfosforação (η_P) e oxidação de manganês (η_{Mn}), relação CxO e FeO na escória (FeT). Os valores de η_P e η_{Mn} são definidos utilizando dados de entrada e saída de fósforo e manganês de acordo com as equações (2) e (3):

$$\eta_P = \frac{P_{entrada} - P_{saída}}{P_{entrada}} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\eta_{Mn} = \frac{Mn_{entrada} - Mn_{saída}}{Mn_{entrada}} \quad \text{Equação (3)}$$

Por estas equações, vê-se que o valor máximo que pode ser obtido é 1, equivalente a uma remoção de 100%. Assim objetiva-se uma maior desfosforação significa valores próximos a 0 e recuperação de manganês próximos a 1. (não seria o contrário??)

Os comportamentos de fósforo e manganês são próximos ao longo do sopro, portanto, buscou-se uma configuração que possibilitasse o aumento da desfosforação e maior recuperação de manganês.

Durante o sopro na Ternium Brasil, duas amostras foram coletadas. A amostra chamada “200” é retirada em 87% do sopro e a “210” após o término da etapa do *stirring*#. As informações a respeito da análise química das amostras foram coletadas e utilizadas para posterior análise estatística.

É importante ressaltar que, na indústria, o processo utiliza sopro combinado, diferentemente das simulações a frio. Além disso, por se tratar de uma planta

industrial há vários parâmetros e inúmeros ruídos que podem influenciar no equipamento em estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Testes Laboratoriais

3.1.1 Vazão total variada

A primeira sequência de testes teve como objetivo analisar a influência da vazão total sobre o processo. Foi construído o gráfico da figura 6 de transferência de massa em função da vazão total de ventaneiras.

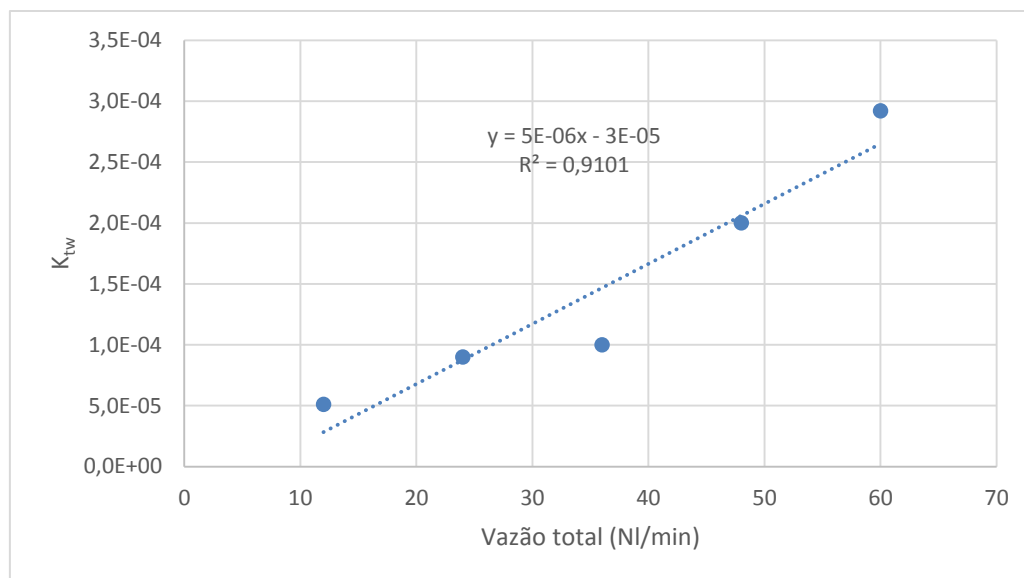


Figura 6: Coeficientes de transferência de massa em função da vazão total.

Diante desse resultado e com base no elevado coeficiente de relação linear obtido, é possível afirmar que o coeficiente de transferência e a vazão total apresentam uma relação linear. À medida que a vazão das ventaneiras aumenta, o coeficiente cresce. A relação entre essas grandezas é explicada pelo fato de que uma maior vazão possibilita uma maior movimentação do banho. A maior agitação promove uma maior interação entre a solução aquosa e o óleo, acelerando a transferência do ácido benzoico. Quanto maior a agitação provocada pelas ventaneiras, mais rápida será a transferência do ácido benzoico da água para o óleo, aumentando o coeficiente de transferência de massa.

Dessa forma, a utilização do padrão em que a vazão total é máxima favorece que as reações de refino ocorram em menor tempo. Particularmente, o teste em que a

vazão total foi igual a 48NI/min. apresentou um coeficiente de transferência razoavelmente satisfatório para os processos em análise. Portanto, uma boa eficiência de processo pode ser obtida aliada à economia de gás inerte.

3.1.2 Vazão total constante

A segunda sequência de testes visou avaliar a influência da configuração de ventaneiras sobre o coeficiente de transferência de massa. Os coeficientes de transferência de massa obtidos são listados na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes de transferência em função da configuração.

Configuração	Vazão (NI/min)			Coeficiente de Transferência	Desvio padrão amostral
	Internas	Externas	Total		
LaSiP 1	11.2	22.22	33.4	0.000163	1.558E-05
LaSiP 2	6.4	26.4	32.8	0.000157	4.036E-07
LaSiP 3	20	12.8	32.8	0.000108	1.676E-05
Vortex	11	22	33	0.000152	1.158E-05

Como pode ser observado na Tabela 2, a configuração em que a vazão individual de ventaneiras é igual (LaSiP 1) possui o maior coeficiente de transferência. A configuração LaSiP 3 foi a menos eficiente dentre as configurações analisadas.

Por meio de análise de vídeo foi possível observar o perfil da interface entre as fases aquosa e orgânica e o nível de agitação de cada teste. A Figura 7 esquematiza o padrão de agitação provocada em cada configuração.

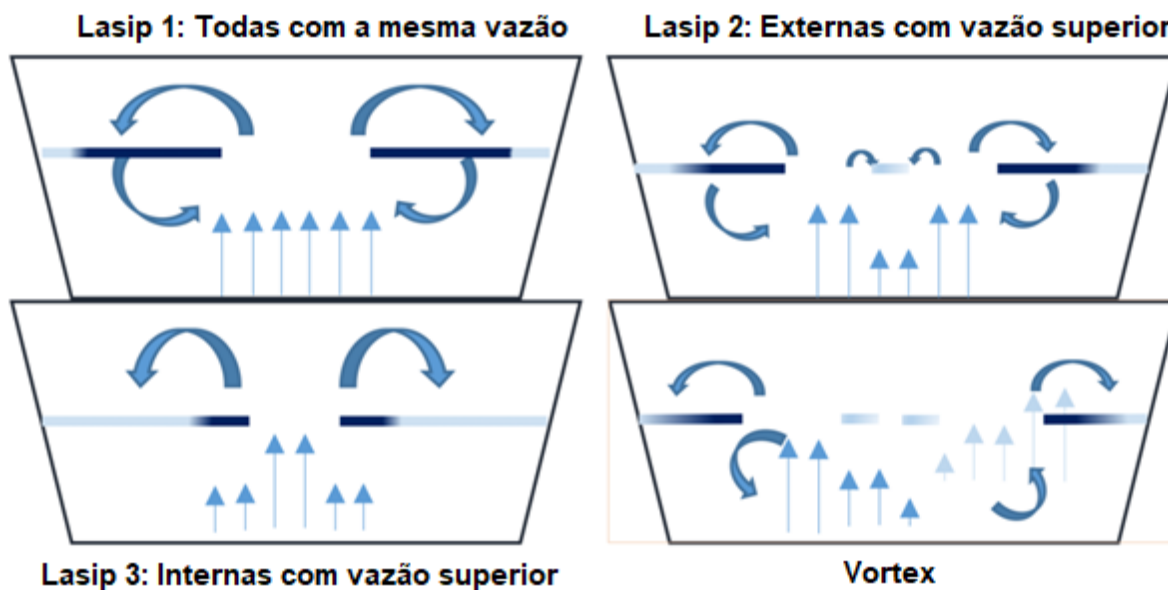


Figura 7: Desenho esquemático dos diferentes comportamentos da interface solução/óleo em cada configuração de ventaneiras.

Por meio da análise do comportamento da interface, percebeu-se que em LaSiP 1 ocorreu grande perturbação no banho e uma menor área estagnada, representada na Figura 7 pela tonalidade clara. Em LaSiP 2, a redução na vazão das ventaneiras internas causou diminuição na perturbação do banho. Os vídeos mostraram o aparecimento de uma zona estagnada localizada na região central do conversor. Na configuração LaSiP 3 houve intensa agitação próximo às ventaneiras centrais, em contrapartida, uma maior zona estagnada foi observada próxima ao raio externo, devido à baixa vazão das ventaneiras externas. Para a configuração Vortex notou-se a presença de um escoamento com rotação do banho metálico, onde o fluxo é iniciado nas ventaneiras de maior vazão. Esta configuração teve interface semelhante à LaSiP 2.

Após análise dos resultados concluiu-se que, nas configurações com maiores vazões e com distribuição mais uniforme do gás nas ventaneiras, ocorreu maior interação entre o óleo e a solução aquosa, promovendo transferência de massa mais rápida. É possível observar que as configurações de maiores coeficientes de transferência de massa possuem menos zonas estagnadas durante o processo de sopro por baixo. Apesar da semelhança entre LaSiP 2 e Vortex, nesta última, o fluxo gerado movimentava o banho horizontalmente e tem menor influência na agitação da interface óleo/líquido, e conseqüentemente, menor transferência de massa. Os resultados para LaSiP 1 e LaSiP 2 foram bastante próximos. Sendo assim, uma

escolha pertinente seria a implementação da configuração LaSiP 2, uma vez que nesta haveria menor desgaste refratário das ventaneiras internas, para uma boa capacidade de agitação do banho.

Outro ponto relevante foi observado em relação à influência das ventaneiras de raio externo sobre o processo. Comparando-se os resultados dos testes, pode-se observar que as configurações nas quais as ventaneiras do raio externo foram acionadas com maior vazão, apresentaram maior coeficiente de transferência de massa. Concluiu-se que estas ventaneiras têm influência direta na redução das zonas estagnadas.

3.2 Testes industriais

Os resultados industriais foram obtidos por meio da análise de determinadas variáveis de processo, que estão relacionadas com a transferência de massa entre o aço e a escória e também com a descarburização..

A Tabela 3 mostra os resultados encontrados para o grau de desfosforação (nP), oxidação do manganês (nMn), ferro total na escória (Fe_{total}) e relação CxO .

Tabela 3: Graus de desfosforação e oxidação de manganês nas amostras 200 e 210.

Configuração	nP (200)	nP (210)	nMn (200)	nMn (210)	Fe_{total} (%)	CxO
TerBRK2	0,56±0,16	0,87±0,04	0,28±0,01	0,68±0,07	18,20±2,11	15,80±4,47
LaSiP 1	0,65±0,16	0,87±0,04	0,43±0,02	0,72±0,06	19,06±1,99	17,51±6,25
LaSiP 1.1	0,60±0,16	0,86±0,04	0,34±0,02	0,69±0,06	17,84±1,99	19,26±3,70
LaSiP 1.2	0,67±0,14	0,87±0,04	0,44±0,02	0,73±0,07	18,09±2,40	17,97±5,20
LaSiP 2	0,59±0,14	0,82±0,05	0,32±0,04	0,66±0,05	18,52±1,54	19,77±5,40
LaSiP 3	0,71±0,14	0,87±0,04	0,40±0,02	0,71±0,08	18,66±2,38	20,81±4,83
Vortex	0,59±0,11	0,88±0,04	0,17±0,01	0,63±0,10	18,13±2,27	15,56±4,49

De acordo com a equação (2), o grau de desfosforação corresponde à retirada de fósforo no aço, quanto maior o valor de nP mais eficiente é a remoção. De maneira contrária, visa-se a manutenção do manganês no banho metálico. Conforme apresentado na equação (3), menores valores de nMn correspondem à maior recuperação de Mn.

Observou-se que a configuração LaSiP 3 teve grau de desfosforação mais elevado que as demais, enquanto que a configuração Vortex mostrou maior recuperação de manganês. A desfosforação e a recuperação do manganês são inversamente proporcionais, portanto, uma configuração adequada é aquela em que valores satisfatórios para os dois fatores são obtidos. Assim sendo, a configuração que se mostrou mais eficiente foi Vortex, considerando o desempenho em relação à amostra 210.

Para o ferro total os valores para as médias foram próximos, portanto seja qual for a configuração adotada os resultados serão satisfatórios. A configuração Vortex apresentou melhores resultados para o produto CxO, para a desfosforação e recuperação de manganês.

4. CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados obtidos, foi possível concluir que:

Testes Laboratoriais

- ✓ O coeficiente de transferência de massa é diretamente proporcional à vazão total das ventaneiras;
- ✓ Entretanto, visando a economia de gás inerte, não é necessária a utilização da vazão máxima, já que resultados similares podem ser obtidos com vazões inferiores.
- ✓ Considerando as diferentes configurações de ventaneiras que a configuração com melhor resultado foi LaSiP 1. Este fato pode ser justificado pela menor presença de regiões estagnadas e maior movimentação na interface;
- ✓ De maneira contrária, a configuração LaSiP 3 mostrou maiores regiões de estagnação do banho, obtendo assim um coeficiente de transferência de massa menor que as demais.

Testes industriais

- ✓ Para os resultados industriais, vê-se que a configuração Vortex é mais indicada para desfosforação, recuperação de manganês e descarburização. Esta configuração é recomendada por ter apresentado resultados satisfatórios

para essas três variáveis. O rendimento metálico é similar para todos os casos testados e em todos eles o resultado pode ser considerado satisfatório.

Geral

Ao comparar os resultados laboratoriais e industriais conclui-se que os resultados do Vortex foram mais expressivos na planta industrial. O sopro combinado pode ser apontado como a principal causa desse comportamento, além de fatores de processo que não foram analisados.

Agradecimentos

O presente trabalho teve apoio financeiro e prático da Ternium Brasil. Faz-se necessário agradecer aos idealizadores deste projeto, especialmente aos engenheiros da aciaria e da Ternium Brasil. Agradecemos também à Universidade Federal de Minas Gerais e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela utilização da estrutura do Laboratório de Simulação de Processos e à Lumar Metals pelo suporte técnico oferecido.

REFERÊNCIAS

1. KAWABE, Y., UDDIN, A., KATO, Y., SEOK, M. O., & LEE, S. B. (2017). Correlation between liquid/liquid and gas/liquid mass transfers in a top/bottom blowing converter, *57(2)*, 296–303. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-196>
2. KIM, S. H., & FRUEHAN, R. J. (1987). Physical modeling of liquid/liquid mass transfer in gas stirred ladles. *Metallurgical Transactions B*, *18(2)*, 381–390. <http://doi.org/10.1007/BF02656157>
3. MAIA, B. T. *Modelamento Físico e Matemático do Escoamento de Fluidos no interior de convertedores básicos a oxigênio e no processo EOF- Avaliação de diferentes configurações de lanças para injeção de oxigênio*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).
4. MARTÍN, M., RENDUELES, M., & DÍAZ, M. (2005). Steel-Slag Mass Transfer in Steel Converter, Bottom and Top/Bottom Combined Blowing Through Cold Model Experiments. *Chemical Engineering Research and Design*, *83(9)*, 1076–1084. <http://doi.org/10.1205/cherd.02156>
5. SINGH, V., LENKA, S. N., AJMANI, S. K., BHANU, C., & PATHAK, S. (2009). A Novel Bottom Stirring Scheme to Improve BOF Performance. *ISIJ*

International, 49(12), 1889–1894.
<http://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1889>

6. WU W, YANG L B, ZHENG C J, LIU L. **Cold Simulation of Oxygen Transfer Rate in BOF**, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL, 2010, 17(9): 7