



## MODELAMENTO FÍSICO DO SOPRO COMBINADO NO BOF<sup>1</sup>

*Haysler Apolinário Amoroso Lima<sup>2</sup>  
Bruno de Assis Mourão<sup>3</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>4</sup>*

### Resumo

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo físico na escala de 1:8 de um convertedor de 220 t, o qual foi simulado dois tipos de configurações de ventaneiras utilizado nas siderúrgicas atuais (zig-zag e circular). Avaliou-se o tempo de mistura e a taxa de desgaste das ventaneiras. O tempo de mistura foi avaliado com a adição de Cloreto de Potássio (KCl) durante a injeção de ar comprimido e através da medição da corrente elétrica, foi possível identificar que a configuração circular foi melhor que a zig-zag. Outro estudo foi obter a curva ideal entre vazão das ventaneiras e o tempo de mistura, com o propósito de reduzir a taxa de desgaste. Para simular as ventaneiras, utilizou-se uma mistura de ácido bórico e resina acrílica. Através da diferença de massa foi possível quantificar a taxa de desgaste. Durante os experimentos em laboratório constatou a redução do tempo de mistura com o aumento da vazão do sopro combinado, entretanto o desgaste do refratário aumentou. O ponto ótimo de trabalho foi obtido pela análise da curva de vazão. Com o aumento da campanha das ventaneiras, será possível garantir uma melhor qualidade do aço, reduzindo perdas e aumentando o seu valor agregado.

**Palavras-chave:** Modelamento físico; Sopro combinado; Desgaste de ventaneiras.

### PHYSICAL MODELING OF BOF COMBINATION BLOW

#### Abstract

In the present work, a physical model of a 220 t LD converter was built in a 1:8 scale and used to investigate different configuration of nozzles (present and proposed). Items such as mixing time and tuyeres wear rate have been evaluated. The mixture time was evaluated with the addition of potassium chloride (KCl) during the compressed air injection through the tuyeres, and though the electric current measurement it was possible to identify that the proposed configuration was better than the present one. Another study was to obtain the ideal chart between the tuyeres flow rate and the mixing time, intending to reduce the tuyere wearing rate. Acrylic resin and boric acid were used to simulate the tuyeres. Through the mass difference it was possible to quantify the wear rate. During the experiments and practical tests carried out at the converter, it was possible to reduce the tuyeres flow rate to the point of not affecting the steel quality and increase the campaign. Due to the increase of tuyeres life, it was possible to guarantee the steel chemical balance, reducing losses and increasing the aggregate value.

**Key words:** Physical modeling; Combined blow; Tuyere wearing rate.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

<sup>2</sup> Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Engenharia Metalúrgica na UFMG.

<sup>3</sup> Estudante de Engenharia Metalúrgica – UFMG.

<sup>4</sup> Sócio da ABM, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.



## 1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação do aço em convertedores LD inicia com o carregamento de gusa líquido, sucata de aço, cal e fundentes. Por meio do sopro de oxigênio, elementos como o carbono, silício, manganês e o próprio ferro, transformam-se em óxidos que vão para a escória ou se incorporam ao gás (CO e CO<sub>2</sub>). Este processo também chamado de refino primário é o pulmão das aciarias modernas.

Existem três métodos de operação no convertedor LD, sendo:

1. Sopro pelo topo através de uma lança refrigerada, o oxigênio a alta pressão e velocidade penetra no banho metálico promovendo a retirada do carbono, fósforo e outros elementos;
2. Sopro pelo fundo através de ventaneiras submersas no banho metálico, o oxigênio e gás inerte são penetram no banho. Em algumas práticas são também injetados cal, carvão e hidrocarbonetos (óleo e/ou gás natural);
3. Sopro combinado, caracterizado pelo sopro de oxigênio pelo topo e injeção de gás inerte pelo fundo, através das ventaneiras.

Sopro somente pelo topo promove uma agitação suave e a mistura do metal com a escória não é intensa. Em consequência são obtidas altas taxas de oxidação do ferro, menor teor de manganês e elevados teores de oxigênio e nitrogênio no fim de sopro, em comparação com o sopro combinado.

O sopro combinado teve como grande diferencial trazer as reações entre escória e metal próximo do equilíbrio termodinâmico, garantindo também uma melhor homogeneização térmica e química do banho.

A injeção do argônio pelo fundo promove uma agitação adicional favorecendo a desfosforação, aumentando o teor de manganês e reduzindo o teor de ferro na escória. Com a melhoria das condições do refino, tem-se um aumento do rendimento metálico, redução do consumo de fundentes e aumento da vida do refratário.

A vida útil de uma ventaneira geralmente não acompanha a vida de um convertedor, necessitando o seu fechamento para evitar o desgaste do restante do convertedor.

Os mecanismos ligados ao desgaste das ventaneiras estão associados às condições de trabalho, entre eles o choque térmico devido à passagem do gás inerte pelas ventaneiras. De acordo com um estudo do sobre mecanismos de desgaste,<sup>(1)</sup> o *back attack* é o fenômeno relacionado ao impacto do gás na ventaneira ao retornar após expansão/rompimento, este processo cíclico desencadeia o desgaste do refratário. Outros fatores estão ligados ao forno, entre eles temperatura do aço, qualidade da escória e abrasão pelo metal líquido.

O modelo atual deste estudo é composto por seis ventaneiras, dispostas em zig-zag na linha do munhão. Este tipo de configuração tem a característica de desgastar mais as ventaneiras da extremidade. Através desta observação, constatou-se que as mesmas trabalhavam sem a proteção da escória *slag coating*. Isto se deve ao fato que o fundo do convertedor ser côncavo, ou seja, as ventaneiras centrais precisam de pouca escória para proteção e as extremas estavam num nível mais alto. Estas diferenças são explicadas pela diferença entre alturas das mesmas.

O aumento da vazão específica da ventaneira aumenta o desgaste do refratário e aumenta a homogeneização do banho,<sup>(1)</sup> conforme mostrado na Figura 1. A vazão está ligada à cinética das reações, ou seja, maior vazão melhor eficiência do sopro. Neste caso não se pode reduzir diretamente a vazão para aumentar a vida da ventaneira, é preciso encontrar o equilíbrio entre desgaste e eficiência do sopro



combinado. A eficiência do sopro combinado está ligada ao aumento da homogeneização do banho e conseqüentemente um menor tempo de mistura.

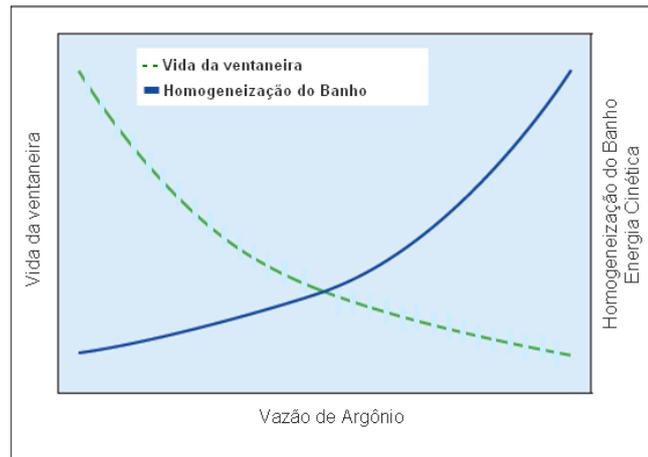


Figura 1. Efeito da injeção do argônio pelas ventaneiras.<sup>(1)</sup>

Singh et al.<sup>(2)</sup> simularam um convertedor de 160 ton feito em acrílico com escala de 1:6. Foram feitas alterações da posição das ventaneiras e avaliados os tempos de mistura. Para isso utilizou como traçador o cloreto de potássio (KCl).

Através destes estudos foi possível modificar o projeto original o qual foi testado na prática industrial com resultados similares ao modelo. Para efeito comparativo, eles usaram a relação entre o diâmetro do anel onde ficam as ventaneiras em relação ao diâmetro do fundo do convertedor.

Su, Chou e Liu<sup>(3)</sup> realizaram estudos para avaliar os mecanismos de desgaste das ventaneiras. Foram usados materiais consumíveis (ácido bórico) entre os bicos de injeção e com isso foi possível estabelecer as condições ideais para evitar o desgaste prematuro das ventaneiras.

Deste modo foi realizada uma modelagem física do convertedor LD de 220 t, com o objetivo de simular as condições operacionais do sopro combinado. Foram investigados dois tipos de configurações de ventaneira (zig-zag e circular), conforme Figura 2.

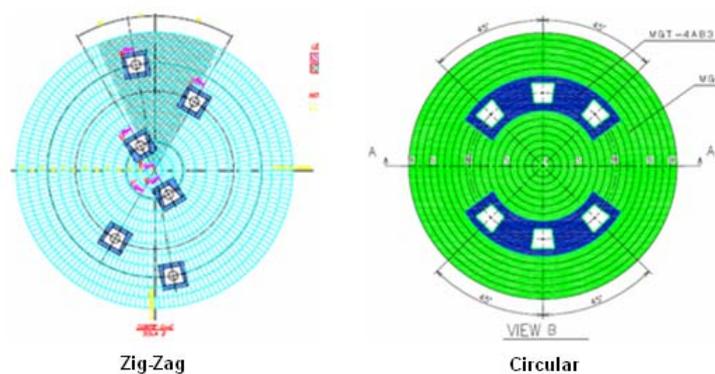


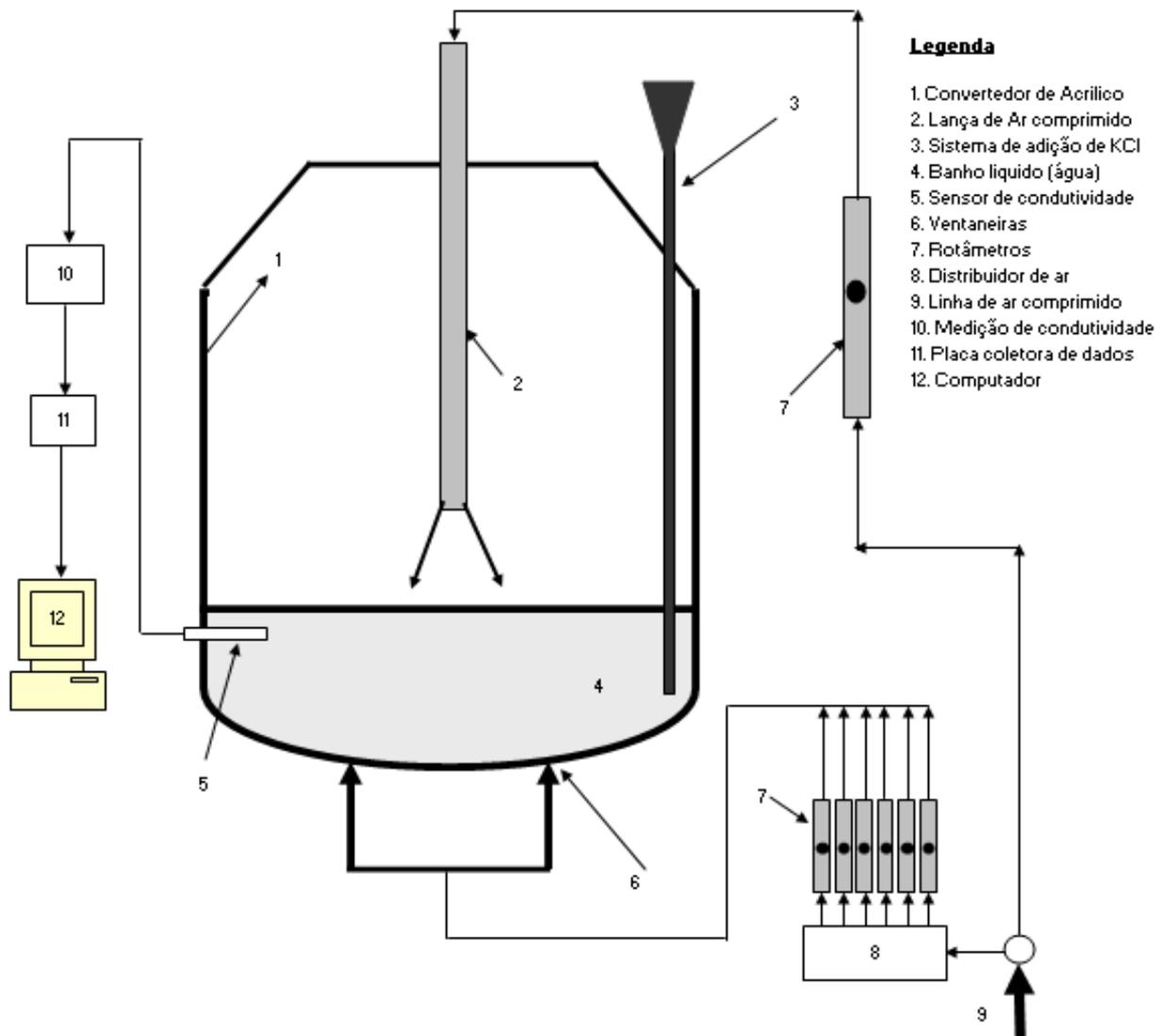
Figura 2. Configurações das ventaneiras (Zig-Zag e Circular).

Pretende-se com este estudo estabelecer as melhores condições de trabalho, garantindo um menor tempo de mistura e um aumento da vida das ventaneiras. Este estudo proporcionará uma série de ganhos, tais como aumento do rendimento metálico, melhor homogeneização química, redução do consumo de cal e redução do consumo específico de refratários.



## 2 METODOLOGIA

Para simular as condições operacionais do sopro de argônio pelo fundo do convertedor LD, foi construído um modelo físico em acrílico, cuja escala foi de 1:8. O método consiste em estabelecer critérios de similaridade geométrica, dinâmica e cinemática. Para isso será usado o projeto de um convertedor de 220 t como modelo. A Tabela 1 mostra as dimensões do convertedor. Para estabelecer as condições de operação do sopro combinado será utilizado, como critério de similaridade dinâmica, o número adimensional de Froude.<sup>(4)</sup> Foi utilizada a água como fluido de simulação, pois a viscosidade cinemática e as linhas de fluxo são similares às do aço líquido. O argônio foi substituído pelo ar comprimido. A Figura 3 mostra o esquema de montagem do modelo físico.



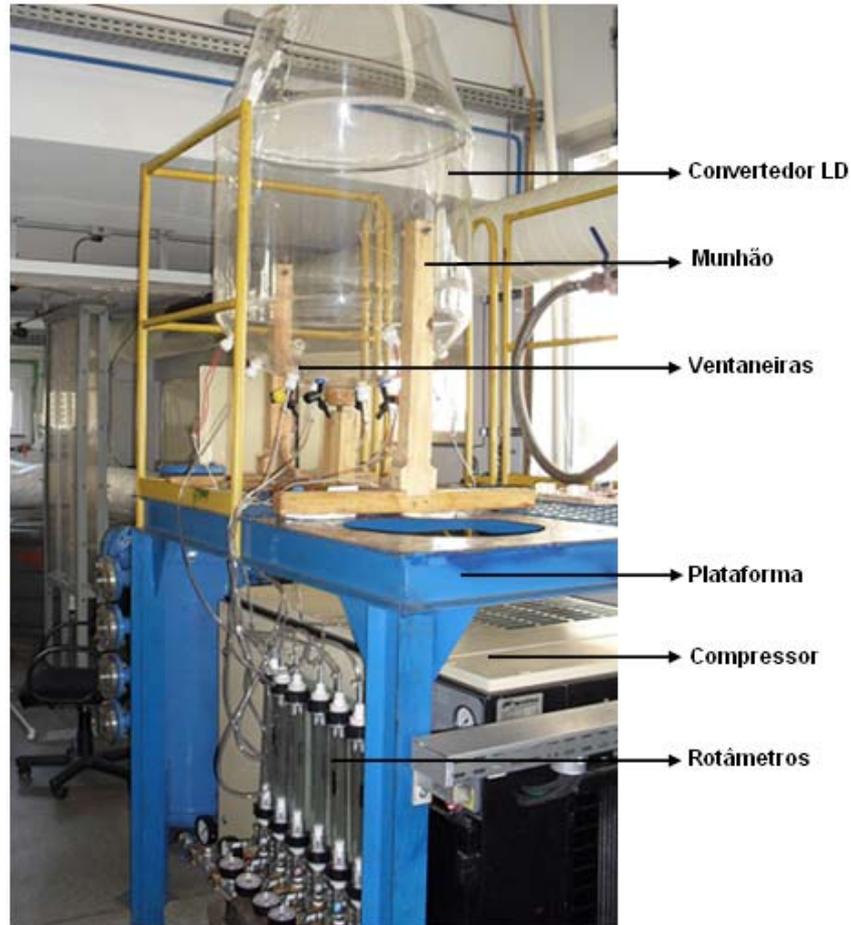
**Figura 3.** Esquema da montagem do modelo físico do sopro combinado.

A Figura 4 mostra a montagem do convertedor em acrílico e a Figura 5 mostra a montagem das ventaneiras (Zig-zag e Circular).

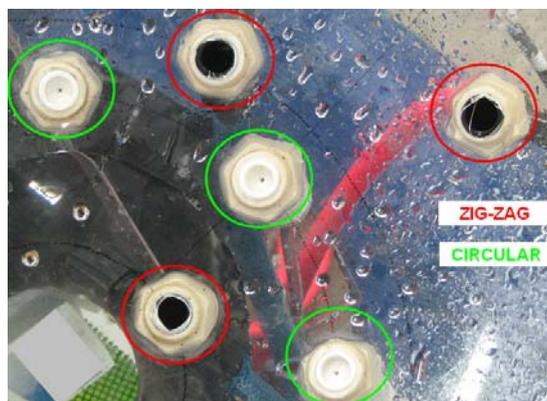


**Tabela 1.** Dimensões do convertedor real e modelo

Parâmetros	Unidade	Industrial	Modelo
Altura do LD	m	8241	996
Diâmetro do LD	m	5716	688
Nível do Banho	m	1800	216
Peso da Carga Líquida	kg	224000	60
Líquido Simulado	-	Aço	Água
Gás injetado	-	Argônio	Ar
Pressão de injeção	kgf/cm <sup>2</sup>	20	5,0
Vazão de injeção	Nm <sup>3</sup> /h	150	3,0



**Figura 4.** Visão geral do modelo físico.



**Figura 5.** Montagem do fundo do convertedor (Zig-Zag e Circular).



## 2.1 Número Adimensional de Vazão Mássica

Usando um modelo em acrílico Lee e Evans<sup>(5)</sup> obtiveram um número adimensional o qual se chamou de Adimensional de Velocidade Mássica (AVM). Dependendo do valor tinha-se um maior ou menor desgaste nos bicos de injeção.

$N_G = \frac{\rho \cdot v}{\rho^* \cdot v^*}$ , onde ( $\rho$ : densidade do gás na Temperatura e Pressão de trabalho,  $v$ :

velocidade do gás;  $\rho^*$ : densidade do argônio na CNTP,  $v^*$ : velocidade do som)

- $N_G < 1,0$  – regime de borbulhamento (Alto desgaste)
- $N_G = 1 \sim 2$  – transição (Baixo desgaste)
- $N_G > 2,0$  – jato desenvolvido (Alto Desgaste)

Uma forma de ajustar o número adimensional ( $N_G$ ) é alterando a vazão ou o diâmetro interno da ventaneira. Com o aumento do diâmetro interno temos a queda da velocidade de passagem do gás.

## 2.2 Cálculos para Determinar a vazão do Modelo

A similaridade dinâmica foi estabelecida em função do número de Froude.<sup>(4)</sup>

$N_{FR} = \frac{V^2}{gD}$ , ( $V$ : velocidade;  $g$ : aceleração da gravidade e  $D$ : comprimento

característico).

Igualando para o modelo e o industrial. E considerando o fator de expansão dos gases a temperatura ambiente no aço a 1.600°C. Obtêm-se a relação de similaridade para a vazão:

$$Q_{\text{Modelo}} = 0,0356 \cdot Q_{\text{Industrial}}$$

## 2.3 Experimentos

### 2.3.1 Avaliação da taxa de desgaste das ventaneiras

Para simulação do desgaste utilizou-se uma mistura à base de ácido bórico e resina acrílica, o qual foi preenchido em “nipples” de PVC que serão acoplados nas posições estabelecidas das ventaneiras. A taxa de desgaste (g/min) foi medida após a injeção de ar pelo fundo.

O principal teste foi para o diâmetro de 3,5 mm que é similar ao utilizado no industrial. Através do aumento da vazão, pretende-se estabelecer a taxa de desgaste para cada vazão específica. Outro teste pretende-se comparar a influência do diâmetro do orifício das ventaneiras no desgaste da mistura com ácido bórico. Para isso utilizou para os cálculos do número Adimensional de vazão mássica ( $N_G$ ).

### 2.3.2 Avaliação do tempo de mistura

Para avaliar o tempo de mistura em diversas condições, foi confeccionado um sensor de condutividade elétrica, feito de platina. O mesmo tem a função de registrar correntes elétricas que passam pela solução aquosa com cloreto de potássio (KCl). Ao adicionar o KCl, o mesmo se homogeneiza na medida que a agitação é promovida pela injeção de ar comprimido pelas ventaneiras. Com isso a condutividade elétrica da solução se altera, atingindo um valor constante no instante em que o KCl se encontra uniformemente distribuído. Maia<sup>(6)</sup> utilizou o mesmo



procedimento para avaliar o tempo de mistura em um modelo físico do convertedor LD estudando as diferentes configurações do bico de lança.

Para medição de vazão de ar injetado, utilizou-se rotômetros calibrados interligados a rede de alimentação de ar comprimido.

Para a montagem das ventaneiras, utilizou-se borbulhadores porosos utilizados para aeração de soluções aquosas. Estes borbulhadores foram acoplados internamente em tubos de PVC com rosca, facilitando o seu acoplamento no fundo do convertedor de acrílico. Estas ventaneiras serão acopladas a rede de alimentação de ar comprimido. Cada ventaneira teve um rotômetro acoplado, com válvula reguladora, com isso tem-se o controle individual das ventaneiras.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à taxa de desgaste em relação ao diâmetro do orifício das ventaneiras podem ser visto na Figura 6. A taxa de desgaste cai com o aumento do diâmetro do orifício. Isto é coerente já que o número adimensional ( $N_g$ ) tende a mudar com o diâmetro de saída (mudança da velocidade do gás).

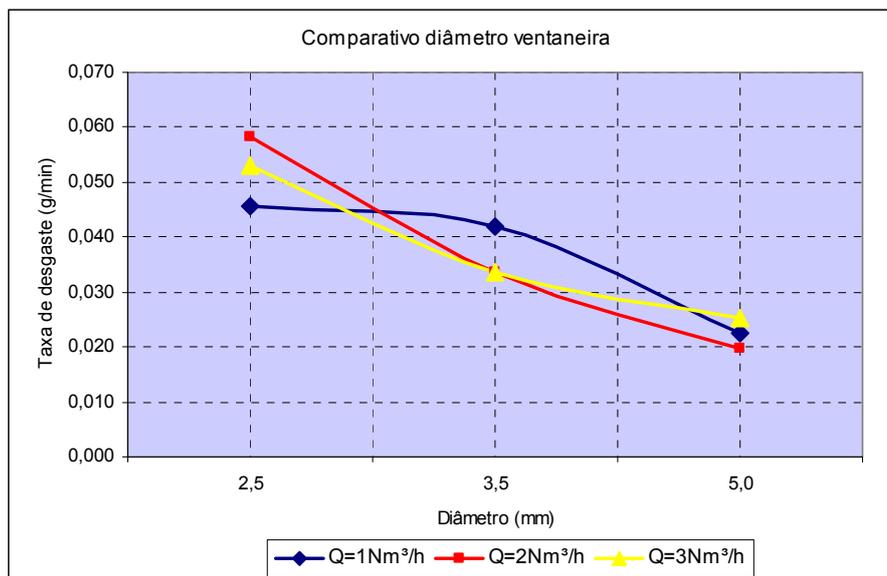


Figura 6. Influência do diâmetro das ventaneiras no desgaste.

De acordo com a Figura 6, a taxa de desgaste menor foi obtida para o diâmetro de ventaneira igual a 5 mm. Entretanto observa-se que o aumento do diâmetro ocasiona infiltração de água durante a injeção de ar. Ou seja, existe um equilíbrio entre a pressão de injeção de ar e o diâmetro do orifício da ventaneira. As ventaneiras industriais trabalham entre 2 mm a 3 mm de diâmetro para uma pressão de 18 kgf/cm<sup>2</sup>.<sup>(7)</sup>

A figura 7 apresenta os resultados do tempo de mistura e taxa de desgaste para as duas configurações. Onde se verifica que o tempo de mistura cai bruscamente com o aumento da vazão e tende a se estabilizar. A taxa de desgaste ideal foi para a vazão de 2,5 Nm<sup>3</sup>/h para a configuração circular e a medida que a vazão aumenta a taxa de desgaste subiu de 0,033 g/min para 0,050 g/min). Conforme se observa a configuração em estudo (circular) apresentou o melhor resultado de tempo de mistura em todas as vazões simuladas em relação ao modelo de comparação (zig-zag).

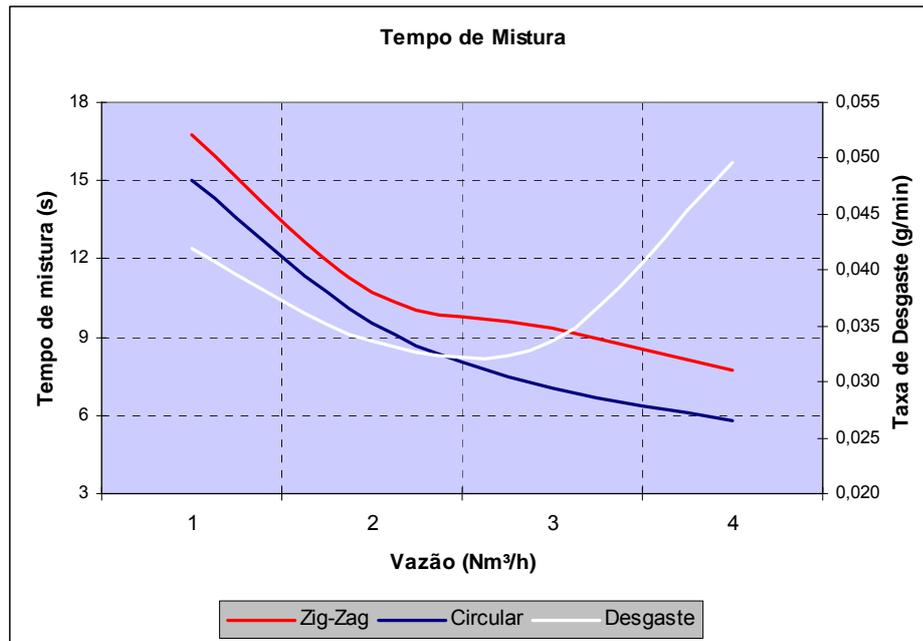


Figura 7. Resultado de desgaste e tempo de mistura.

De acordo com o gráfico acima, o ponto ótimo de trabalho para o caso do modelo físico foi obtido para a vazão de 2 Nm<sup>3</sup>/h a 3 Nm<sup>3</sup>/h, acima deste valor o desgaste tende a ser muito agressivo tornando inviável sua operação. Esta vazão do modelo equivale a uma vazão de 140 Nm<sup>3</sup>/h na escala industrial.

Para a vazão de 2,5 Nm<sup>3</sup>/h o tempo de mistura para a configuração circular foi de 8 segundos, ou seja, 2 segundos a menos que a configuração zig-zag. Estas diferenças tendem a aumentar para vazões maiores. Na média a configuração circular apresentou um tempo de mistura 18% menor que a configuração zig-zag.

Na Figura 8 tem-se o resultado visual do desgaste das ventaneiras, sendo uma original e outra após ensaios com ar comprimido, ambas com diâmetro interno inicial de 3,5 mm.



Figura 8. Ensaio de desgaste das ventaneiras (antes a após ensaio).



## 4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos para o tempo de mistura e taxa de desgaste das ventaneiras, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1. O tempo de mistura para a configuração circular apresentou o menor tempo em relação à configuração zig-zag;
2. A taxa de desgaste teve como função o número adimensional de vazão mássica ( $N_G$ ), sendo que a menor taxa foi para a vazão de 2,5 Nm<sup>3</sup>/h para o modelo que equivale a 140 Nm<sup>3</sup>/h para o industrial;
3. A menor taxa de desgaste é obtida para o diâmetro de ventaneira de 5 mm, ou seja, maior diâmetro menor desgaste.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) por ter disponibilizado o laboratório de Simulação Física (LasiP) para realização dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- 1 RICCI, M., WATERFALL, S., SUN, S. *Optimization of Bottom Stirring in the 165-tonne Electric Arc Furnace at Arcelor Mittal Dofasco*. Austria: RHI Bulletin, 2008.
- 2 SINGH, V. et al. *Otimisation of the Bottom Tuyeres Configuration for the BOF Vessel Using Physical and Mathematical Modelling*. Isij International, v. 47, n.11, p1605, 2007.
- 3 SU, C. J., CHOU, J. M., LIU, S. H. *A Study on the Effect of Bottom Blowing Conditions on Refractory Erosion in the Ironmaking Smelter by Water Modeling*. Taiwan: Kaohsiung, 1999.
- 4 NEVES, L. *Avaliação dos Efeitos da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo do Modelo Físico de um Desgaseificador RH*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. (Dissertação de Mestrado).
- 5 LEE, M. S., EVANS, T., J. *Control of Refractory Back Attack and Tuyere Metal Penetration During Bottom Gas Injection in the BOF*. Iron & Steelmaker, 2003.
- 6 MAIA, B. T., *Efeito da Configuração do Bico de Lança na Interação Jato-Banho Metálico em Convertedor LD*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. (Dissertação de Mestrado)
- 7 ASSIS FILHO, R. C., FARIA, M. A. A., LOPES, H. L. P., BARBOSA, U. X., SOARES, C. *Implantação do Sopro Combinado nos Convertedores da Gerdau Açominas – Processo NK-CB*. Curitiba/PR, XXXIX Seminário de Aciaria (ABM), 2008.