

# SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL EM ÁGUA DA REMOÇÃO DE INCLUSÃO NO DISTRIBUIDOR ATRAVÉS DE BORBULHAMENTO DE ARGÔNIO <sup>1</sup>

Henrique Silva Furtado<sup>2</sup>  
Carlos Antonio da Silva<sup>3</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>3</sup>  
Ronaldo Paulino do Nascimento<sup>4</sup>  
Zelber Dettogne do Nascimento<sup>5</sup>  
Rodrigo Nazareth Borges<sup>6</sup>

## Resumo

Com o objetivo de atender ao mercado de aço de elevada qualidade interna as empresas vem desenvolvendo práticas especiais de fabricação, condicionamento e seleção do aço, as quais tem levado a restrições de produtividade e aumento de desclassificações e sucateamentos principalmente de materiais oriundos de períodos transientes do lingotamento contínuo. No esforço de reduzir estas perdas e inspirado na prática de injeção de argônio, extensivamente adotada na metalurgia da panela, o presente trabalho avalia o desempenho do uso desta prática no distribuidor, através de simulação experimental em água em um modelo na escala 1:3. Os resultados mostram uma melhoria significativa na remoção de inclusões no lado do modelo do distribuidor com injeção de argônio, cuja eficiência é afetada pela dimensão da peça porosa, pela sua proximidade à válvula longa e pelo tipo de material utilizado na confecção do elemento poroso.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Argônio; Distribuidor; Simulação.

## WATER PHYSICAL SIMULATION OF INCLUSIONS REMOVAL THROUGH TUNDISH ARGON BUBBLING

### Abstract

Focusing on the market of very clean steel, companies around the world have been developing special steelmaking and casting practices, improving conditioning and downgrade criteria, which in general lead to an increase in cost of production and a decrease of plant productivity. On the effort to minimize those losses and inspired on ladle argon injection, which has a known strong effect on inclusion removal in the ladle, the present work present an evaluation of the performance of this practice when used in tundish, through isothermal water simulation using a reduced tundish model (scale 1:3). Results reporting a significant improvement on inclusion level removal using air bubbling in tundish model are shown. The efficiency of this practice increases with the use of larger porous element and also with the position of this element closer to the tundish inlet. Also the basic porous element, with a more uniform porous diameter, which supplied a more uniform air plume, reproduced a higher efficiency on particle removal.

**Key words:** Continuous casting; Tundish; Bubbling; Argon; Simulation.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Especialista de Lingotamento Contínuo da Arcelor Mittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Professor Associado, Depto. Metalurgia, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.*

<sup>4</sup> *Técnico Metalúrgico, Bacharel em ciências Econômicas, Pós-graduado em Engenharia de materiais, Técnico especializado em Lingotamento Contínuo da Arcelor Mittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro de Materiais, Coordenador Técnico de Projetos da Magnesita S.A., Vitória, ES, Brasil.*

<sup>6</sup> *Engenheiro Mecânico, Gerente do Departamento de Simulação Numérica e Mecanismos da Magnesita S.A., Contagem, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Com a demanda crescente por aços de elevada limpidez interna as empresas vem desenvolvendo praticas especiais de fabricação, condicionamento e de seleção dos materiais mais apropriados para cada tipo de aplicação. Em geral estas práticas agregam custos adicionais significativos assim como impõem perdas de produtividade no processo, conforme ilustrado na Tabela 1.

No lingotamento contínuo, os desenvolvimentos focando a produção de aço de elevada limpidez objetivam a eliminação completa da re-oxidação pelo ar, a otimização do escoamento do aço líquido no molde e a remoção adicional de inclusões no interior do distribuidor.

Ao longo dos anos o problema de maximizar a remoção das inclusões no distribuidor foi tratado com foco na otimização da configuração interna de barragens, diques e inibidores de turbulência, como forma de se obter um escoamento com uma maior fração de fluxo pistonado, considerado ideal para este propósito.

Por outro lado, apesar dos resultados promissores,<sup>(1-8)</sup> a prática de injeção de argônio no distribuidor não foi adotada pelas empresas. A razão não é clara, porém pode ter sido em decorrência das dificuldades na sua operacionalização e/ou na avaliação do seu benefício. Entretanto, com as constantes melhorias nos materiais porosos e a novas técnicas de medição de limpidez do aço, esta prática pode ser uma alternativa para expandir o limite atual de obtenção de aço com elevada limpidez.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a eficiência da injeção de argônio no distribuidor, através de simulação experimental em um modelo em escala 1:3, utilizando água como fluído simulador, como forma de balizar futuros testes industriais.

**Tabela 1:** Estimativa das perdas potenciais envolvidas no processo produtivo de aços de elevada limpidez interna

	Potencial (US\$)/ano
1- Perda por desclassificação devido à esfoliação com origem em inclusões de alumina nos aços	905.080,00
2- Perdas devido à ocorrência de obstrução por alumina: -subutilização de válvulas e distribuidores -perda de produtividade e parada de máquina -perdas por condicionamento	1.976.000,00
3- Perda de produção em função do maior tempo de tratamento do aço na panela (+3 minutos/corrída) (~41.000t/ano; base 2006)	4.100.000,00

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Em modelagem física é necessário a definição das variáveis operacionais no modelo, as quais devem representar de forma aproximada condições operacionais realísticas na planta industrial. Isto é realizado impondo-se a igualdade de números adimensionais, os quais representam as relações de forças que agem no sistema em estudo.

O escoamento do aço líquido e inclusões no distribuidor é bastante complexo, como ilustra os diferentes números adimensionais que podem ser definido para este sistema,

apresentados na Tabela 2. Portanto, para a sua simulação experimental em modelo reduzido diversas hipóteses simplificadoras são necessárias, as quais foram resumidas no Quadro 1.

Além das hipóteses apresentadas, considera-se que as trajetórias das inclusões sejam semelhantes no modelo e na máquina industrial, se a resultante das velocidades de ascensão ( $V_{asc}$ ) e de arraste pelo fluxo de aço líquido ( $V_{aço}$ ) apresentarem a mesma direção, conforme ilustrado na Figura 1

Neste caso, admite-se que na direção vertical a inclusão move-se devido ao empuxo, enquanto na direção horizontal a mesma é arrastada pelo fluxo de aço líquido. Deste modo a similaridade cinemática foi representada pela seguinte equação:

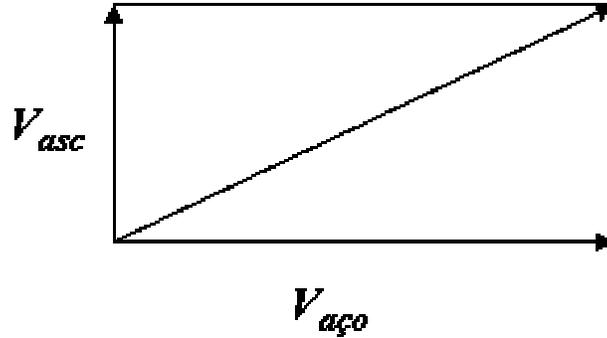
$$\left( \frac{V_{asc}}{V_{aço}} \right)_{industrial} = \left( \frac{V_{asc}}{V_{água}} \right)_{modelo} \quad (1).$$

**Tabela 2:** Números adimensionais definidos para o escoamento aço líquido, gás e inclusões no distribuidor

Grupo		Definição	Aplicação
Reynolds	Re	$\rho L v / \mu$	Fluxo fluido
Froude	Fr	$v^2 / gL$	Vazamento em jato
Fr. Modificado	Fr <sub>m</sub>	$\rho_g v^2 / [(\rho_l - \rho_g)gL]$	Comportamento do sistema líquido/gás
Peclet	Pe	$Lv / \alpha, Lv / \bar{D}$	Convecção forçada ou transferência de massa
Weber	We	$\rho L v^2 / \sigma_s$	Formação de bolha, atomização de jatos
Morton	Mo	$g \mu L^4 / \rho L \sigma_s^3$	Velocidade de bolhas em líquidos
Schimidt	Sc	$\mu / \rho \cdot \bar{D}$	Transferência de massa
Prandtl	Pr	$\mu C_p / k$	Convecção livre ou forçada
Grashof	Gr	$\rho^2 \beta g \Delta T L^3 / \mu^2$	Convecção livre ou térmica

**Quadro 1:** Hipóteses simplificadoras na simulação experimental em modelo reduzido utilizando água

<ol style="list-style-type: none"> <li>1- Forças de origem viscosas não são significativas, ou seja: a diferença no n° de Reynolds entre o modelo e o caso industrial não é relevante;</li> <li>2- O caso a ser simulado não envolve mistura de diferentes composições químicas no distribuidor, ou seja, não há transferência de massa. Portanto, os números de Peclet e de Schmidt não necessitam ser igual no modelo e no caso industrial</li> <li>3- As forças de tensão interfacial não são relevantes, portanto não há necessidade da igualdade dos números de Weber e de Norton.</li> <li>4- O sistema opera aproximadamente em regime isotérmico. Portanto, não se considera a igualdade dos números de Prandtl e de Grashof.</li> <li>5- As forças relevantes são as inerciais. Portanto são impostas as igualdades dos números de Froude e de Froude Modificado do modelo e do caso industrial.</li> </ol>
--



**Figura 1:** representação esquemática da decomposição de movimentos da inclusão

No presente trabalho considerou-se que a velocidade de ascensão é definida unicamente pela diferença de densidade entre a inclusão e o aço líquido, dada pela equação de Stokes, ou seja:

$$V_{asc} = \frac{2}{9\eta} R^2 g (\rho - \rho_{inc}) \quad (2),$$

onde  $\eta$  é a viscosidade do líquido.  $R$  é o raio da partícula (inclusão),  $g$  a aceleração da gravidade,  $\rho$  a densidade do aço e  $\rho_{inc}$  a densidade da partícula (inclusão).

Aplicando o critério de similaridade de Froude, pode-se determinar a relação entre a velocidade do aço líquido e a da água ( $V_{água}$ ), e conseqüentemente a vazão de água a ser alimentada no modelo, conforme equações abaixo:

$$V_{água} = V_{aço} \lambda^{0,5} \quad (3),$$

$$\frac{Q_M}{Q_P} = \lambda^{5/2} \quad (4),$$

onde  $\lambda$  representa o fator de escala dimensional entre o modelo e o distribuidor industrial, que é igual a 1/3;  $Q_M$  a vazão de água a ser alimentada no modelo e  $Q_P$  a vazão de aço que entra no distribuidor industrial.

Substituindo as equações 2 e 3 na relação 1 pode-se obter uma estimativa do raio da partícula a ser utilizada nas simulações, ou seja:

$$R_m = \sqrt{\frac{\Delta\rho_i}{\Delta\rho_m} \frac{\eta_m}{\eta_i} R_i^2 \lambda^{0,5}} \quad (4),$$

onde o índice “*i*” representa industrial enquanto índice “*m*” representa “modelo”.

A relação entre a vazão de gás do modelo (ar) e do caso industrial (argônio) é determinada a partir da igualdade do número adimensional de Froude modificado, ou seja:

$$\left[Fr' = \frac{\rho_g u_g^2}{\rho_L g H}\right]_{modelo} = \left[Fr' = \frac{\rho_g u_g^2}{\rho_L g H}\right]_{industrial} \quad (5),$$

onde  $u_s$  é a velocidade do gás;  $\rho_s$  e  $\rho_L$  são as densidades do gás e do líquido, respectivamente;  $H$  é altura da coluna de fluido. Neste caso, considera-se que a

velocidade superficial do gás na saída de cada orifício de injeção de argônio possa ser escrita como:

$$u_g = \frac{4 Q_g}{\pi d_o^2 A \dot{N}_o} \quad (6),$$

onde  $Q_g$  é a vazão total de gás;  $d_o$  é o diâmetro de cada orifício do elemento poroso;  $A$  é a área superficial do elemento poroso e  $\dot{N}_o$  é o número de orifícios do elemento poroso por unidade de área superficial.

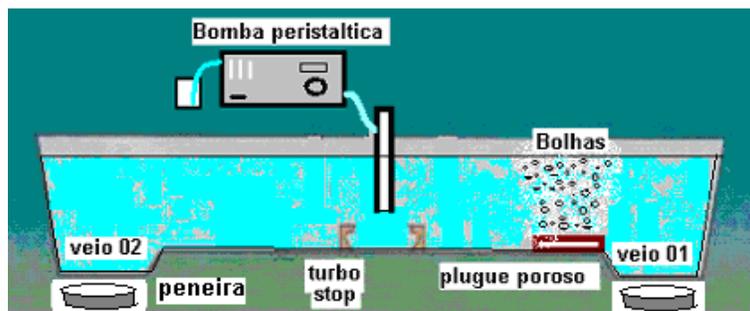
Substituindo a equação 6 na formulação 5, e considerando  $d_o$  e  $\dot{N}_o$  iguais nos modelo e no caso industrial, ou seja, o mesmo elemento poroso sendo utilizado nos dois casos, obtém-se:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_i}\right)^2 = \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)_i \left(\frac{\rho_L}{\rho_g}\right)_m \lambda^5 \quad (7).$$

Os testes de simulação foram conduzidos no modelo físico em escala reduzida 1:3, do distribuidor da Máquina de Lingotamento contínuo 2 da Arcelor Mittal Tubarão. Este, construído em acrílico, conta com uma bomba peristáltica para a injeção de fluidos, instalada no tubo longo de entrada do distribuído, assim como com peneiras metálicas (tipo a de análise granulométrica) adaptadas nos veios de saída do mesmo, com a finalidade de coletar as partículas sólidas para posterior pesagem (Figura 2).

Para a simulação da injeção de gás inerte pelo fundo do distribuidor, foi montado em um dos lados internos do modelo (identificado como veio 1), um sistema de injeção de ar comprimido, com medidor de vazão, acoplado a uma peça porosa retangular de material cerâmico.

Os testes foram realizados com o modelo operando em regime permanente, ou seja: mantendo a água no nível máximo e como vazão de água e de ar pré-estabelecidos. Neste caso, uma polpa de partículas é injetada na vazão média de 26g/minuto durante o período de 5 minutos. Outros 5 minutos são observados, sem a adição de material para que o teste seja então finalizado. O material passante pelos dois veios do distribuidor, e o material suspenso na superfície da água foram coletados para secagem em estufa a 50°C e posterior pesagem em balança de precisão. As propriedades utilizadas assim como as condições experimentais são apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.



**Figura 2** – Esquema da montagem do modelo do distribuidor com a bomba peristáltica, sistema de injeção de ar comprimido e posicionamento das peneiras.

**Tabela 3:** Propriedades físicas do fluido e das partículas sólidas utilizadas no modelo e na planta industrial

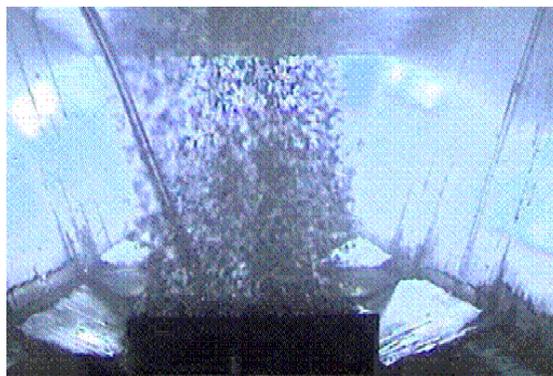
	Industrial	Modelo
Densidade do líquido (kg/m <sup>3</sup> )	7000	1000
Viscosidade do líquido (Pa.s)	7x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>
Densidade da partícula (kg/m <sup>3</sup> )	3000	960
Densidade do gás (Kg/m <sup>3</sup> )	1,784 (argônio)	1.20 (Ar comprimido)

**Tabela 4:** Parâmetros do modelo e do distribuidor industrial

Parâmetros testados	Modelo	Industrial
Dimensões da peça porosa Comprimento x largura (cm)	6x12; 12x12; 19x12	18x36; 36x36; 57x36
Material da peça porosa	Aluminoso; básico	Aluminoso; básico
Vazão de injeção de gás (NL/min)	5; 10; 15	169,1; 338,2; 507,4
Posição da peça porosa (m) (*) Peça de tamanho 6x12 Peça de tamanho 12x12 Peça de tamanho 19.12 (*) medido da válvula longa ao meio da peça.	0,71; 0,48 0,68; 0,45 0,65; 0,42	2,13; 1,44 2,02; 1,35 1,95; 1,26
Vazão de entrada de líquido pela válvula longa (m <sup>3</sup> /min)	0,096	1,5
Tamanho das partículas (µm)	105 a 297 50 a 100	36,6 a 103 17,4 a 34,8

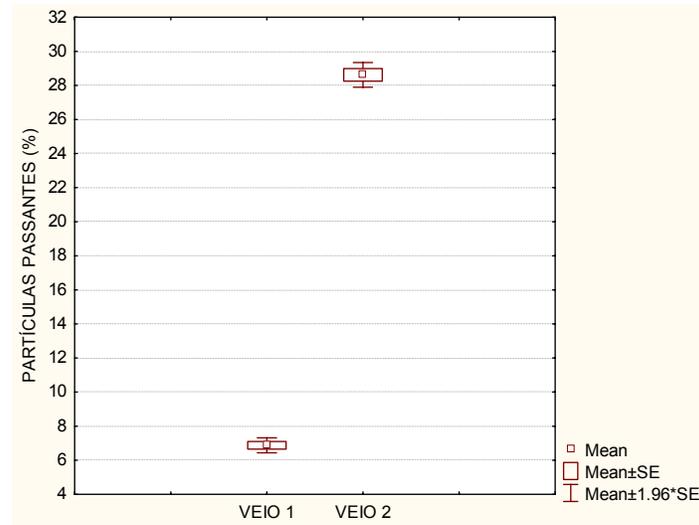
### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

Na Figura 3 é apresentada uma vista transversal do modelo do distribuidor, com uma pluma típica de ar, que foi formada durante os ensaios. Como pode ser observada, a cortina de gás não abrange toda a largura do distribuidor, em decorrência do formato da peça porosa.



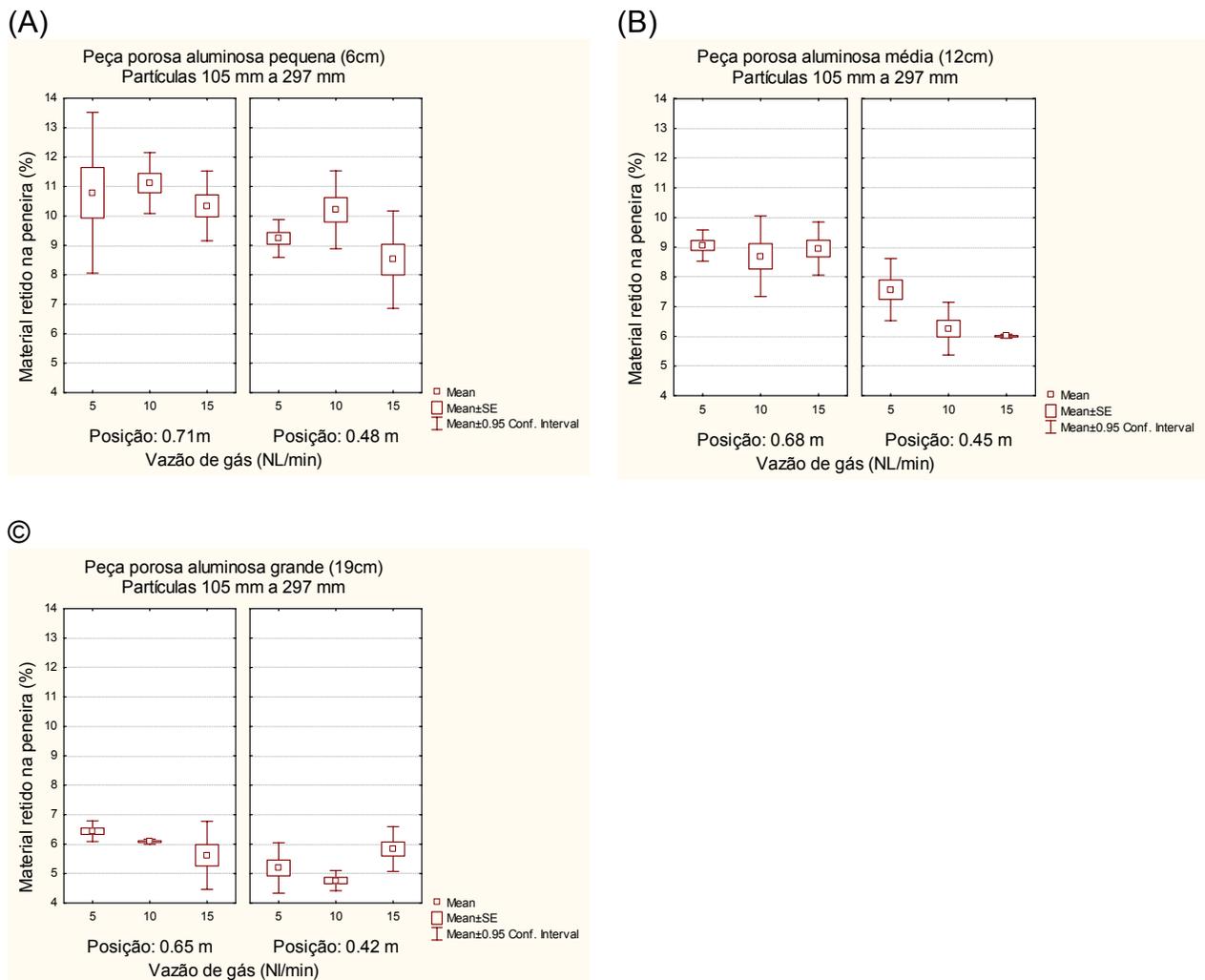
**Figura 3:** Pluma de ar típica observada durante os testes com o modelo do distribuidor

Apesar do exposto, os resultados de remoção das partículas são significativos, como ilustra a Figura 4. De fato, o veio do lado do modelo com injeção de bolhas de ar apresentou uma redução acentuada de partículas passantes em relação ao veio do lado oposto do mesmo (sem o ar).



**Figura 4:** Resultado comparativo dos percentuais de partículas passantes (todos os ensaios), relativo ao total injetado, entre os veios 1 ( com injeção de ar) e 2 ( sem injeção de ar)

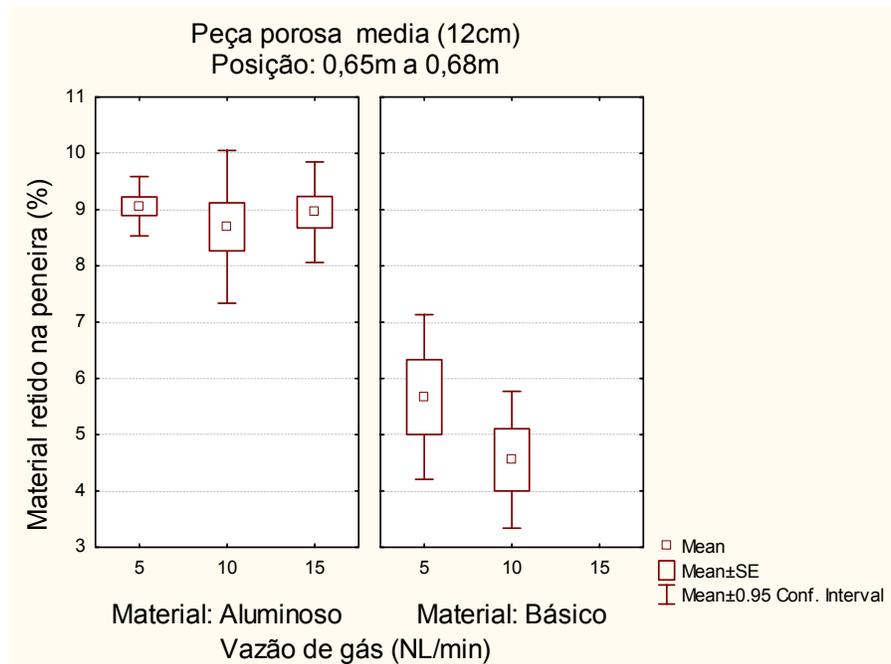
Na Figura 5 são resumidos os efeitos do tamanho da peça porosa, da sua localização em relação à válvula longa e da vazão de ar injetado. De fato, pode-se observar que quanto maior esta peça, menor é o percentual de partículas passantes para qualquer dos valores testados de posição e de vazão de ar. Outro efeito significativo é o de que a maior proximidade da peça porosa à válvula longa também reduz o percentual de partículas passantes; entretanto este efeito é menor no caso dos testes com a peça porosa grande. Estes resultados podem ser decorrentes da própria cortina de ar que se constitui em um filtro para as partículas, assim como do efeito da mesma na geração de um fluxo ascendente, o qual é mais eficiente quanto induzido mais próximo da entrada do distribuidor. Neste caso, a peça maior poderia estar formando um fluxo ascendente mais intenso, mitigando o efeito da sua posição.



**Figura 5:** Resultado dos efeitos do tamanho da peça porosa de alumina, da posição do centro da mesma em relação à válvula longa e da vazão de ar injetado na percentagem de partículas passantes.

Em todos os casos, pode-se verificar pela análise da Figura 5 que a vazão de ar apresentou um efeito pouco significativo nos resultados. Isto pode ser devido aos níveis de vazão utilizados, os quais foram necessários para a formação da pluma em elementos com dimensões de poros de escala industrial. Neste caso, para melhor avaliar o efeito desta variável seria necessário elementos porosos que viabilizassem a formação da pluma em vazões ainda menores que as testadas. No entanto, este resultado sugere a existência de um patamar máximo de vazão a partir do qual esta variável não mais influenciaria a remoção das partículas sólidas.

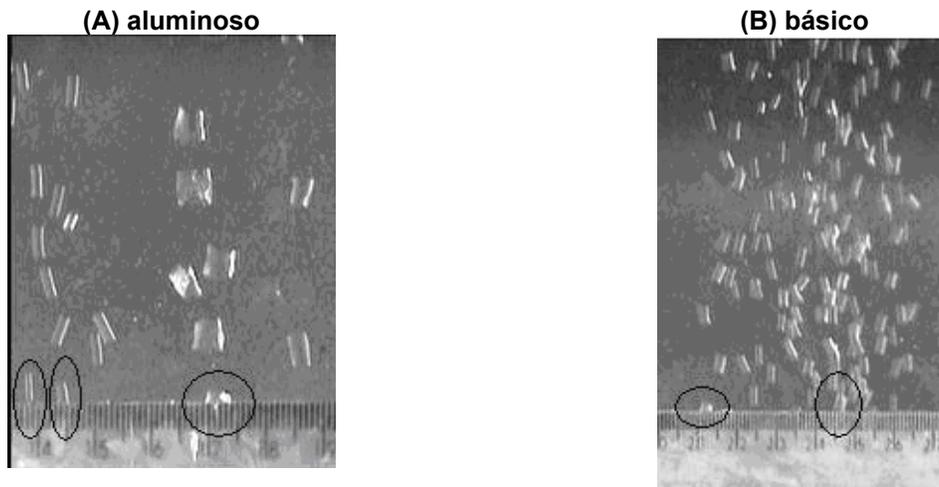
O efeito do material do elemento poroso nos resultados pode ser observado na figura 6. De fato, o material básico apresentou um desempenho superior ao do material aluminoso. Isto pode ser devido a sua maior homogeneidade de poros, o que provoca a formação da pluma de bolha mais uniforme, conforme ilustrado na Figura 7.



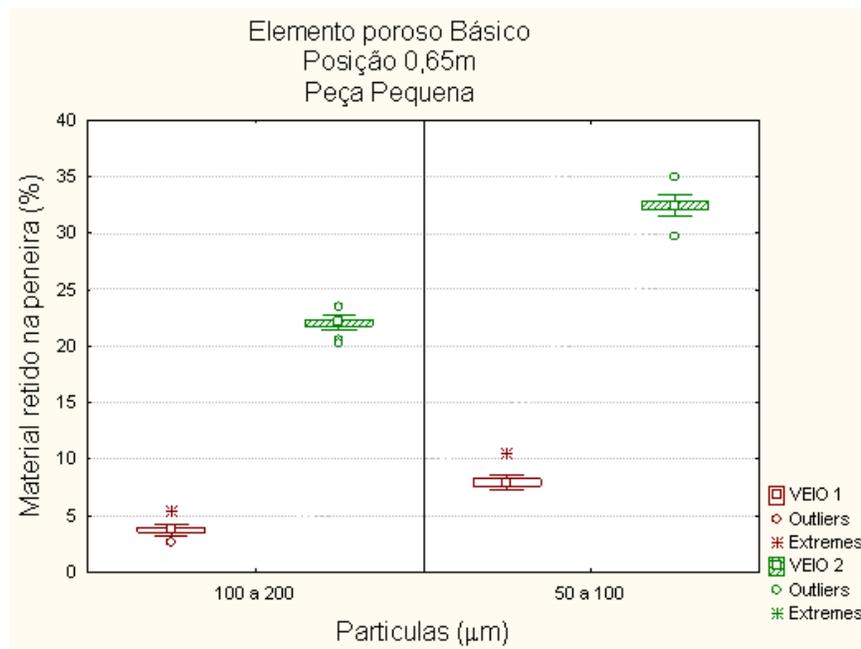
**Figura 6** : Resultado do efeito do material do elemento poroso no percentual de partículas passantes no veio do lado com borbulhamento de ar.

Comparando-se os resultados com e sem ar apresentados na figura 8 pode-se observar também que esta técnica propicia uma maior eficiência de remoção no caso das partículas menores, as quais apresentam uma maior propensão de serem arrastadas para o veio de lingotamento na ausência da pluma de gás.

De fato, pelo exposto, as simulações reportaram resultados promissores de remoção de partículas utilizando a injeção de bolhas de ar; entretanto no distribuidor industrial existem mecanismos que não podem ser reproduzidos pelo modelo em água, tais como gradientes de temperatura, presença de escória, coalescência e expansão de bolhas entre outros. Além do exposto, a quantidade de partículas por unidade de volume que entra no distribuidor deve ser inferior ao adotado no presente modelo. Portanto, a realização de testes industriais é fundamental para a uma precisa avaliação desta técnica. Não obstante, os resultados presente trabalho podem servir como base para o estabelecimento das condições iniciais de tais testes.



**Figura 7:** Efeito do tipo de material do elemento poroso no tamanho e na uniformidade das bolhas.



**Figura 8:** Resultados dos testes utilizando tamanhos diferentes de partículas: veio 1: com ar; veio 2: sem ar

#### 4 CONCLUSÕES

As simulações utilizando um modelo em escala reduzido do distribuidor da máquina 2 da Arcelor Mittal Tubarão evidenciaram uma elevada eficiência da injeção de bolhas de ar no distribuidor na remoção de partículas sólidas.

Com o uso de peças porosas industriais não foi possível gerar uma pluma de bolhas que abrangesse toda a largura do distribuidor.

Os testes reproduziram resultados de aumento na remoção das partículas com o incremento na dimensão da peça porosa, com a sua aproximação à válvula longa e com o uso de material básico na sua confecção.

Por outro lado, não se verificou um efeito significativo da vazão de ar injetado. Isto provavelmente devido ao fato que os níveis de vazão de gás utilizados para formar a pluma já poderiam estar suficientemente elevados. Isto sugere a existência de um limite máximo de vazão acima da qual a eficiência de remoção não se altera.

O aumento da remoção de inclusões com o borbulhamento de ar é atribuído à presença da pluma de gás, que atua como um filtro, assim como ao movimento ascendente que esta provoca no escoamento da fase líquida.

A maior eficiência da peça porosa básica pode ser devida a sua maior homogeneidade de poros, que proporciona uma pluma de bolhas menores e mais uniforme.

A remoção de partículas através da injeção de bolhas de ar é mais eficiente para a remoção de partículas menores, as quais apresentam uma maior propensão de serem arrastadas para o veio na ausência desta pluma.

Apesar dos excelentes resultados do uso da injeção de bolhas de ar na remoção das partículas no modelo em água do distribuidor, existem mecanismos no equipamento industrial que não considerados pelo modelo, os quais podem afetar estes resultados, tais como gradientes de temperatura, presença de escória e coalescência e expansão de bolhas entre outros. Portanto, testes industriais são fundamentais para a precisa avaliação desta técnica.

## REFERÊNCIAS

- 1 WANG, L; LEE, H-G & HAYES, P. –Prediction of optimum Bubble Size for Inclusion removal from Molten Steel by Flotation. ISIJ International, vol, 36, 1996, No. 1, p.1-16
- 2 ZHANG, L & CAI, K. – Experimental and Theoretical Study on the Cleanliness of Steel. Steelmaking Conference Proceedings, 2001, p. 275-291
- 3 L. Zhang, B.G. Thomas, et al. Inclusion Investigation during Clean Steel Production at Baosteel ISS Tech 2003 (Conf. Proc.), Indianapolis, IN, USA, April.27-30, 2003, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2003, pp. 141-156.
- 4 ROGLER, J. P; HEASLIP, L. J & MEHRVAR, M - Inclusion Removal in a Tundish by Gas Bubbling. Canadian Metallurgical Quarterly. Vol. 43, No. 3, 2004, p. 407-416
- 5 YAMAURA, H; UESHINA, Y; MIZUKAMI, Y; TAKASE, K; AMDA, K & UEHARA, A – Development of Technology for Blowing Fine Bubbles into Tundish Through Porous Plug Using Molten Steel Flow. ISSTech 2003 Conference Proceedings, p. 19-30
- 6 MORALES, R.D, RAMOS-BANDERAS, A, SANCHEZ-PEREZ,R. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow With Gas Bubbling in Trough Type Tundishes - AISTech Proceedings, 2005, p. 867-877
- 7 MARIQUE, C, DONY, A, NISSEN,P , The bubbling of inert gas in the tundish, a means to improve the steel cleanliness, 1990 Steelmaking proceedings, 461-467.
- 8 MOREVEC, R, STANCIK,M, ADOLF, Z , Steel refining in tundish of a CCM, 2001 Steelmaking Proceedings, 139-146.