



DISTRIBUIÇÃO DE GÁS INERTE DENTRO DO SISTEMA DE REFRAATÁRIO DURANTE O LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS: MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO¹

Paulo Luiz Santos Junior²

Carlos Antônio da Silva³

Michel Vieira Santos⁴

Clenice Moreira Galinari⁵

Bruno Augusto Batista Ribeiro⁶

Alessandro Prenazzi⁶

Itavahn Alves da Silva⁷

Resumo

Gás inerte é frequentemente injetado no sistema refratário durante o lingotamento contínuo de placas. Embora, o objetivo principal seja evitar a deposição de inclusões existem algumas consequências indesejáveis. Gás em excesso desestabiliza a interface metal-escória no molde, incrementando o aprisionamento de inclusões. Para uma determinada geometria os efeitos gerais são definidos pela vazão de gás, pontos de injeção, vazão de aço e características dos refratários. Neste estudo a distribuição de gás dentro da válvula submersa (SEN) e no molde é analisada utilizando modelamento matemático (*computational fluid dynamics* - CFD) e modelo físico. Foi construído um molde em tamanho real, com uma réplica em acrílico da SEN e utilizado dois tipos de válvula superior para injeção do gás. As consequências da distribuição do gás no campo de fluxo e os efeitos metalúrgicos são discutidos.

Palavras-chave: Modelo físico; Simulação numérica; Lingotamento contínuo.

INERT GAS DISTRIBUTION INSIDE THE CASTING SYSTEM DURING SLAB CONTINUOUS CASTING: MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELLING

Abstract

Inert gas is usually injected in the nozzles during continuous casting of slabs. Although, the main objective is to avoid deposition of inclusions on the ceramic parts there are some unavoidable consequences. Too much gas disturbs the metal-slag interface improving slag entrapment. For a given geometry the net effects are defined by gas flow rate, injection points, metal throughput and refractories characteristics. In this study gas distribution inside the Submerged Entry Nozzle (SEN) and inside the mold is analyzed using mathematical modeling (*computational fluid dynamics* - CFD) and physical modeling. The late was done in an actual size mold, with an acrylic replica of the SEN and two upper nozzles for gas injection. The consequences of gas distribution in the flow field and metallurgical aspects are discussed.

Key words: Physical modeling; Mathematical modeling; Continuous casting.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Mestrando em Engenharia de Materiais, Escola de Minas, UFOP, pluizjunior@uol.com.br.

³ MSc, PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP, casilva@em.ufop.br.

⁴ Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP michelvieira.ufop@gmail.com.

⁵ MSc, Engenheira da Magnesita, Contagem, MG, clenicem@magnesita.com.

⁶ Engenheiro Magnesita, Contagem, MG, brunoa@magnesita.com. prenazzi@magnesita.com.

⁷ MSc, DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - itavahnufop@yahoo.com.br.



1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a indústria automobilística tem constantemente demandado novos aços para produção automóveis, em especial os aços ultra-baixo carbono. Estes aços além da sua característica principal relacionado à ausência de carbono na sua micro-estrutura demandam uma elevada limpidez, visto que durante sua laminação, estampagem e pintura os defeitos provenientes da Aciaria podem se tornar evidentes, o que acarreta na redução de rendimento do processo e/ou desvio de produtos para qualidades inferiores.

Por sua vez esta demanda crescente da indústria automobilística por aços ultra-baixo carbono com elevada limpidez e custos competitivos tem levado as usinas siderúrgicas produtoras de placas e os fornecedores de refratários ao desenvolvimento contínuo de tecnologias de novos materiais, projetos e processos para produção de aço.

Conforme Yuan⁽¹⁾ durante a produção dos aços baixo e ultra-baixo carbono acalmados ao alumínio um dos fenômenos que prejudicam em muito a produtividade e a qualidade deste produto é a deposição de inclusões de alto ponto de fusão, tais como: alumina e alguns tipos de aluminatos de cálcio, o que acarreta em obstrução parcial ou total das válvulas e dos sistemas de controle de fluxo. Este tipo de obstrução representa um problema associado à produção de aço acalmado ao Al. A obstrução por alumina (Al_2O_3) implica num processo de lingotamento instável, numa elevação dos custos e em uma redução na produtividade e na qualidade do produto. A obstrução do sistema de válvulas do distribuidor afeta o fluxo de aço para o molde fazendo com que este seja assimétrico e assim cause excessiva variação do nível de aço no molde. Além disto, esta situação pode reduzir a vazão e provocar ocasionalmente a liberação de aglomerados de partículas no fluxo de aço. Todos estes problemas causados pela obstrução lideram os defeitos em produtos, especialmente os defeitos superficiais formados pelo aprisionamento de inclusões durante condições instáveis de lingotamento. Em relação à deposição do Al_2O_3 nas paredes dos refratários, esta depende de vários fatores, tais como: velocidade de lingotamento, concentração de Al_2O_3 no aço líquido, vazão de Argônio, material e estrutura das válvulas.⁽¹⁾

Conforme Suzuki et al.⁽²⁾ para a produção de aço via lingotamento contínuo à injeção de Argônio (Ar) através dos refratários tem um papel fundamental no controle da obstrução, na melhora da uniformização da temperatura superficial do aço no molde e na promoção da separação das inclusões não metálicas. Por outro lado quando as bolhas de Ar ficam presas na frente de solidificação durante o lingotamento estas podem acarretar defeitos internos no processamento do aço. Da mesma forma que as práticas de injeção do argônio na válvula superior do distribuidor, a estrutura da válvula e o material poroso estão bem estabelecidos há mais de dez anos, apud Suzuki et al.⁽²⁾ Porém, recentemente observa-se que as novas práticas de utilização de baixas vazões de Argônio e sequenciais de longa duração tornaram-se praticas comuns, o que implica em necessidade de novos desenvolvimentos do *design* e dos materiais refratários da válvula.

Neste estudo a distribuição de gás no interior da válvula submersa e do molde é analisada utilizando modelamento matemático (*computational fluid dynamics* – CFD) e modelo físico em água. O modelo em água tem dimensões em escala industrial, com uma replica em acrílico da válvula submersa (SEN) e duas válvulas superiores para injeção do gás: com configuração diferente e dois pontos de injeção. Os efeitos



da distribuição do gás no sistema de válvulas e no molde e os aspectos metalúrgicos são discutidos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Modelo Físico

Utilizou-se modelo de molde em escala 1:1 com largura de 1.260 mm e espessura de 200 mm. O líquido utilizado na simulação foi água a 25°C. Foi construída uma réplica em acrílico da válvula submersa (*Submerged Entry Nozzle - SEN*) (Figura 1a). As dimensões internas da peça em acrílico são idênticas as apresentadas na Figura 1b. De maneira a se obter uma condição similar de lingotamento a válvula em acrílico tem também as dimensões da base (região que permanece submersa) idênticas ao projeto (Figura 1a).

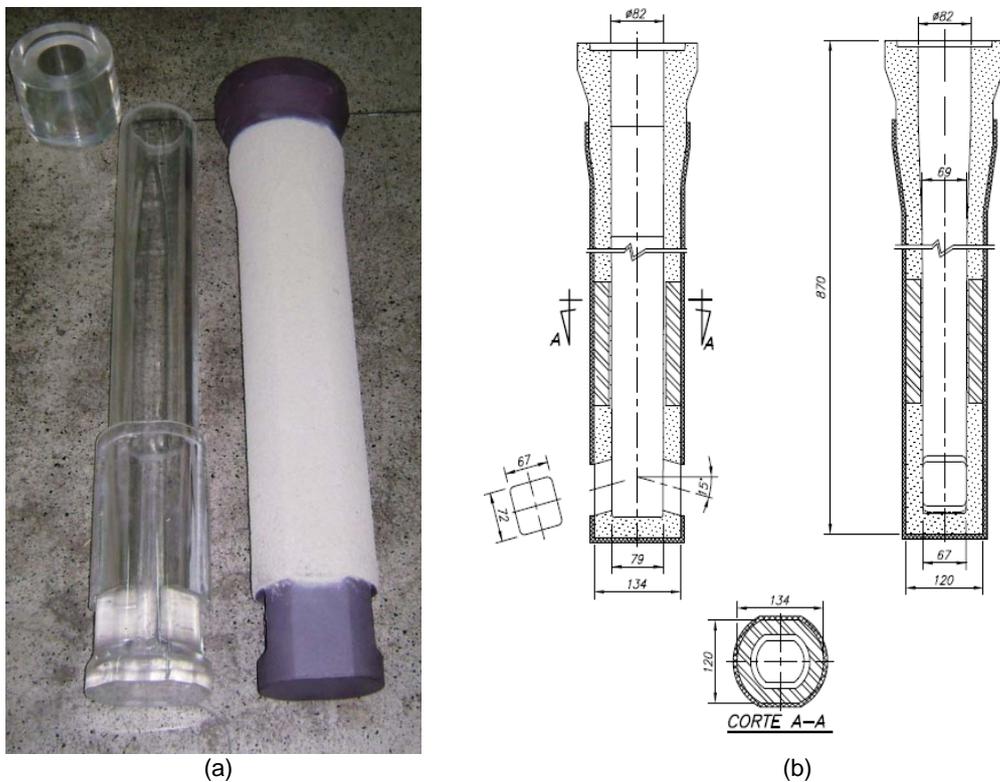


Figura 1. (a) SEN construída em acrílico ao lado da SEN refratária; e (b) desenho da SEN.

Foram testadas duas válvulas superiores com configurações refratárias diferentes. A válvula mostrada na Figura 2a tem dois pontos de injeção de gases, porém todo o material refratário apresenta permeabilidade ao gás (porosidade), enquanto que a válvula apresentada na Figura 2b possui material denso entre as duas áreas de injeção de gases.

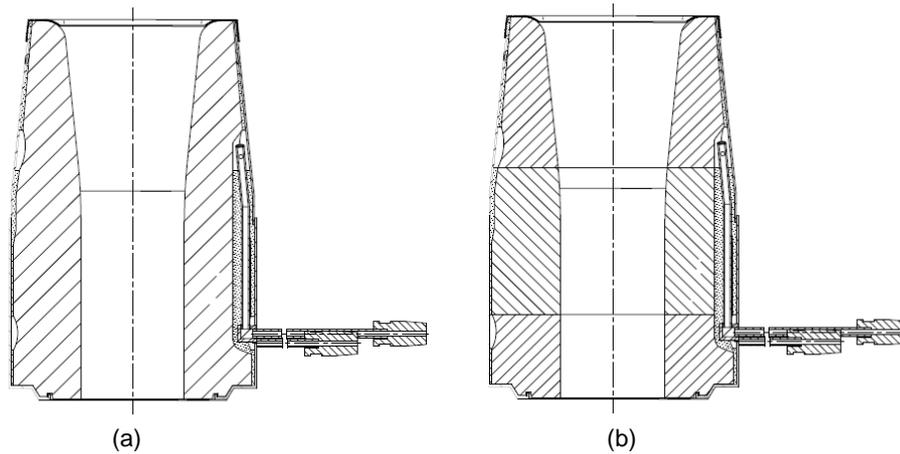
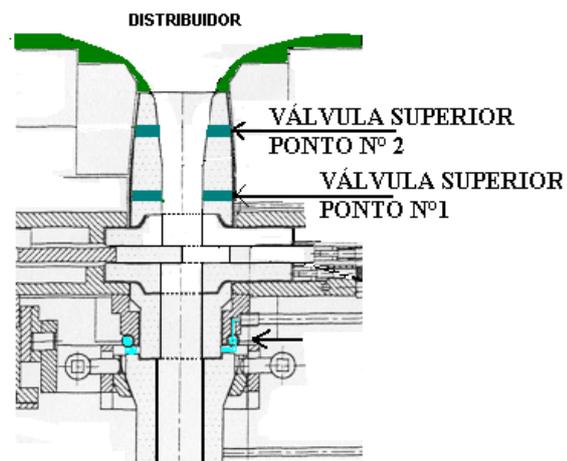


Figura 2. (a) Desenho válvula superior porosa; e (b) desenho válvula superior com material denso.

A válvula superior e a válvula em acrílico foram montadas seguindo uma configuração similar a utilizada na montagem do sistema de refratários (Figura 3a). Contudo, alguns ajustes foram realizados, tais como: a válvula em acrílico foi construída com duas peças, uma representando a válvula submersa e outro o monobloco (Figura 1a), o controle de fluxo é realizado por uma válvula entre o reservatório de água e a válvula superior (Figura 3a) e não por um sistema com válvula deslizante (Figura 2b). O gás utilizado na simulação em água em substituição ao argônio (Ar) foi ar e Hélio (He) injetado nos dois pontos de injeção da válvula superior (Figura 3). O controle de vazão de gás foi realizado utilizando-se reguladores de pressão e medidor de vazão mássica Omega da série FMA; a vazão de água foi ajustada com o auxílio de um medidor do tipo palheta (previamente calibrado para a tubulação de alimentação) e inversor de frequência para controle de rotação da bomba.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Montagem modelo em escala 1:1; e (b) esquema de montagem dos refratários para lingotamento contínuo.

Empregou-se duas vazões de água, a 336 l/min e 400 l/min, equivalentes a 2,35 t/min e 2,8 t/min de aço, respectivamente, enquanto as vazões de ar foram



fixadas em 4 NI/min, 8 NI/min, 12 NI/min e 16 NI/min, estas vazões foram determinadas com base em critério de similaridade. De acordo com este a similaridade é atingida se a razão entre vazões de líquido e gás se mantiverem, comparando-se máquina industrial e modelo. A profundidade de imersão da SEN, medida entre a parte superior da porta de saída e o nível de líquido foi fixada em 120 mm.

Foram realizadas filmagens da metade do molde com utilização de *laser (laser sheet visualization)* para determinação do comportamento das bolhas de ar e do fluxo de água no molde. Em alguns experimentos foram adicionadas partículas de SG6 de mesma densidade da água para explicitar o movimento da água na região do menisco e nas regiões com poucas bolhas de ar. Posteriormente se avaliou o comportamento do fluxo de água e das bolhas através do *software Pivview* para geração dos vetores de movimento.

Para determinação do tamanho de bolha, no interior da SEN, foram realizadas filmagens a 150 fps, sob luz estroboscópica, utilizando-se uma escala de referência junto à válvula em acrílico (Figura 4). Posteriormente utilizou-se um *software* comercial para separação da filmagem em frames e outro *software* – *Quantikov* - para determinação do tamanho médio das bolhas.

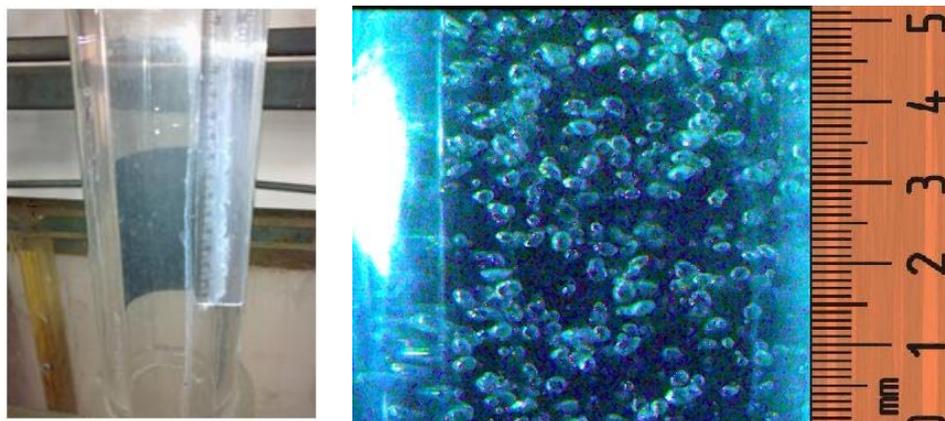


Figura 4. Válvula em acrílico com escala de referência; exemplo de foto para 336 lpm e 2 lpm de ar, válvula superior completamente porosa.

2.2 Modelo Matemático

O modelo matemático foi elaborado de maneira a representar as condições físicas do modelo em água com observância das dimensões reais do mesmo. O *software* utilizado foi o CFX em módulo transiente com as seguintes condições de contorno:

- Fase contínua definida foi água a 25°C e a fase dispersa o ar na condição de gás ideal;
- vazão de água igual a 336 l/min e ar 12 NI/min;
- diâmetro de bolha igual a 3 mm;
- tensão superficial de bolha de gás com H₂O igual 0,7 N/m;
- passo de tempo adaptativo de 10^{-3s} a 10^{-1s};
- *target* de convergência igual 10⁻⁵;
- Rms (resíduo) igual 10⁻⁵;
- coeficiente mínimo de *loops* igual a 2 e o máximo igual a 8, com a condição de ajuste de que quando o número de *loops for* ≤4 o tempo entre as interações é incrementado em 6%, contudo quando o número de *loops for* >4 o tempo é reduzido em 20%.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Diâmetro Médio das Bolhas Dentro da SEN

Como citado são duas alternativas de bloco superior da válvula: todo o corpo poroso e duas seções porosas (Figura 2). As filmagens com luz estroboscópica tiveram por objetivo investigar se, em função das diferentes geometrias de injeção, haveria diferença significativa entre os tamanhos médios e distribuição de tamanhos das bolhas dentro da SEN (portanto abaixo das seções de injeção). A evidência experimental não permite identificar a formação de filmes gasosos junto às paredes da SEN e a identificação individual de bolhas só se torna possível em baixas vazões de gás. Para esta faixa de vazões foram realizadas contagens manuais em 10 *frames*, com auxílio do *software Quantikov*, com os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Tamanho médio das bolhas de acordo com as condições de injeção para válvula toda porosa

LPM Liq	LPM gas	Ar/He		Dmédio
336	2	0	Ar	2,22867
336	2	1	He	2,33692
336	4	0	Ar	2,34824
336	4	1	He	2,34988
400	2	0	Ar	1,89258
400	2	1	He	2,05748
400	4	0	Ar	1,94441
400	4	1	He	2,19058

Regressão *stepwise* dos dados apresentados sugerem que as variáveis significativas são a vazão de líquido, vazão de gás e o tipo de gás, com fórmula de regressão $d(\text{mm}) = 3,863 - 0,00460 \times \text{vazão de água (LPM)} + 0,0397 \times \text{vazão de gás (LPM)} + 0,130 \times \text{tipo de gás (Ar=0; He=1)}$ $r^2 = 88\%$, o que indica serem as bolhas de Helio ligeiramente, 0,13 mm, maiores.

Como se nota não parece haver diferença significativa, o que provavelmente se deve aos altos valores de número de Reynolds, da ordem de 100.000, o que assegura ser o fluxo turbulento. Desta forma, após curto trajeto, as condições de formação de bolhas (condição local de porosidade) não seriam determinantes, mas sim o processo de desintegração e coalescimento dominado pela turbulência. O valor médio do diâmetro das bolhas é normalmente um dado de entrada em modelagem matemática em sistemas gás-líquido com o abordado nesta contribuição.

Ainda de acordo com a Tabela 1, se pode perceber, que para ambos os gases, o diâmetro das bolhas são maiores para vazões de água menores e para vazões de ar ou He maiores. Este comportamento foi apresentado e discutido por Suzuki⁽¹⁾ e Thomas et al.⁽³⁾

Experimentos semelhantes, conduzidos para a válvula com duas seções porosas de injeção (ver figura 2 b) sugerem, para diâmetros de bolha $d(\text{mm}) = 3,494 - 0,00381 \times \text{vazão de água (LPM)} + 0,079 \times \text{vazão de gás (LPM)}$ $r^2 = 74\%$, que não existem diferenças perceptíveis de tamanhos entre os dois sistemas de injeção.



3.2 Distribuição de Gás no Interior do Molde para Válvula Superior Totalmente Porosa

O padrão de fluxo no molde (distribuição e trajetória das bolhas; movimentação do líquido) se mostra fortemente influenciado pela combinação entre vazão de líquido e de gás. Para vazão de 336 l/min e para a vazão de ar de 4 NI/min pode-se observar a existência do fluxo duplo rolo (Figuras 5a e 6a). A existência de um fluxo duplo rolo bem definido com velocidade de menisco adequada (em torno de 0,2~0,4 m/s) é considerada a melhor condição para qualidade interna do aço em todas as larguras de placas.⁽⁴⁾ Contudo, para as vazões de ar de 8 NI/min, 12 NI/min e 16 NI/min, se observa que o fluxo duplo rolo fica prejudicado pelo fluxo de ar, que tende a determinar um fluxo ascendente próximo a saída da válvula, sendo este mais intenso e mais próximo da válvula para as vazões mais elevadas (12 NI/min e 16 NI/min). A Figura 5b e 6b a visualização do molde e a imagem gerada com os vetores de movimento pelo *software Pivview*, onde se pode verificar a modificação no fluxo de água no molde devido ao movimento ascendente das bolhas de ar.

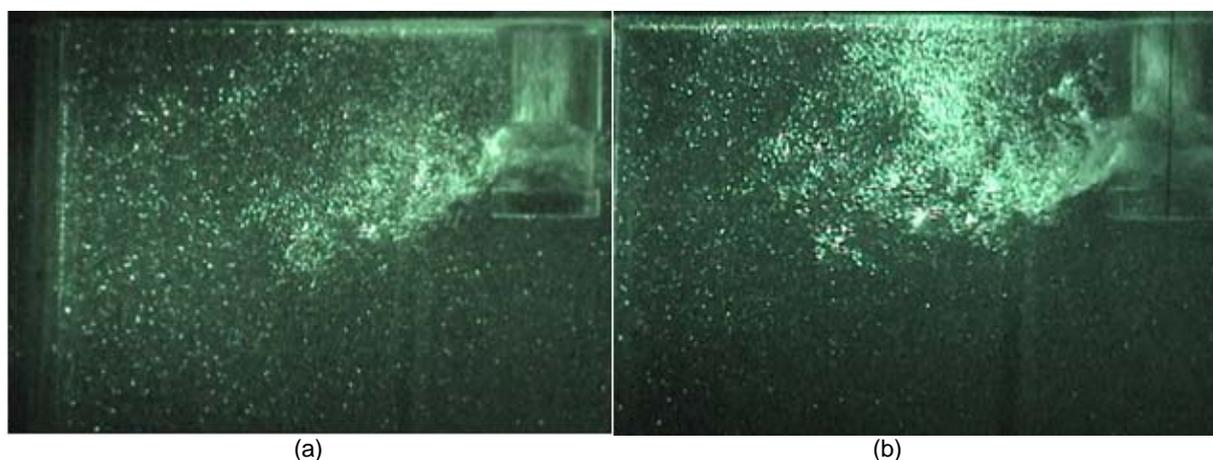


Figura 5. Foto modelo físico em funcionamento com (a) 336 l/min de água e 4 NI/min de ar; e (b) 336 l/min de água e 12 NI/min de ar.

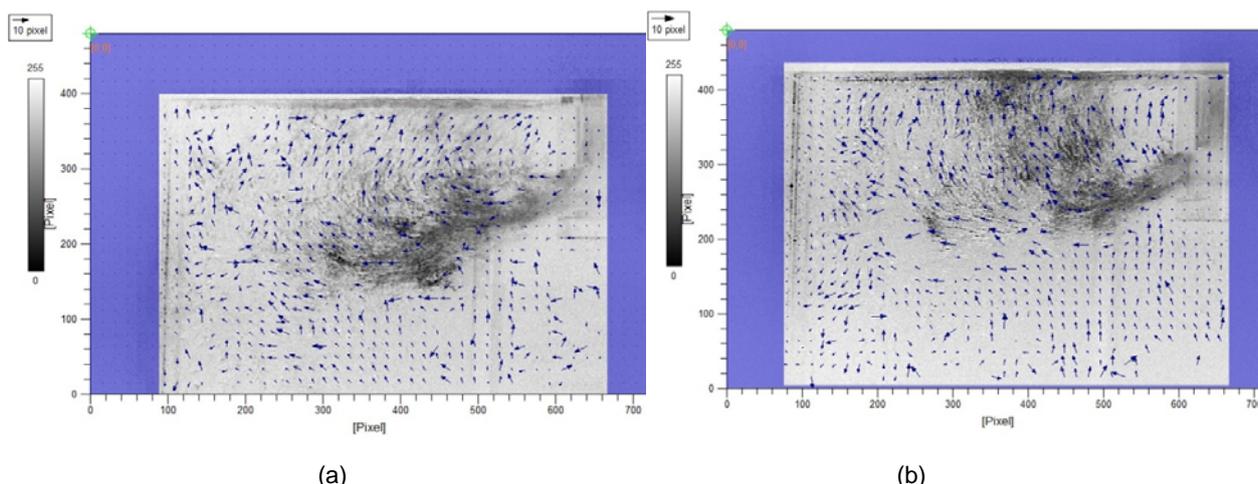


Figura 6. Imagem vetores gerados pelo *Pivview* para o caso de (a) 336 l/min de água e 4 NI/min de ar; e (b) 336 l/min de água e 12 NI/min de ar.

Para as vazões de água de 336 l/min com injeção de 12, além do fluxo alterado no menisco (Figuras 5b e 6b), se observa também a ocorrência periódica de bolhas com diâmetros maiores saindo da válvula e gerando uma turbulência adicional no



menisco (Figura 7). Conforme comentado por Thomas et al.:⁽³⁾ “as bolhas se concentram em regiões de baixa velocidade da válvula, as quais inclusive apresentam um fluxo de recirculação e estas regiões incluem a válvula gaveta e a e a parte superior da saída da SEN”. Além das regiões mencionadas por Thomas et al.,⁽³⁾ se observou no modelo físico uma concentração de bolhas no fundo da SEN o que em princípio seria responsável pela coalescência das bolhas e a modificação do campo de fluxo no molde.

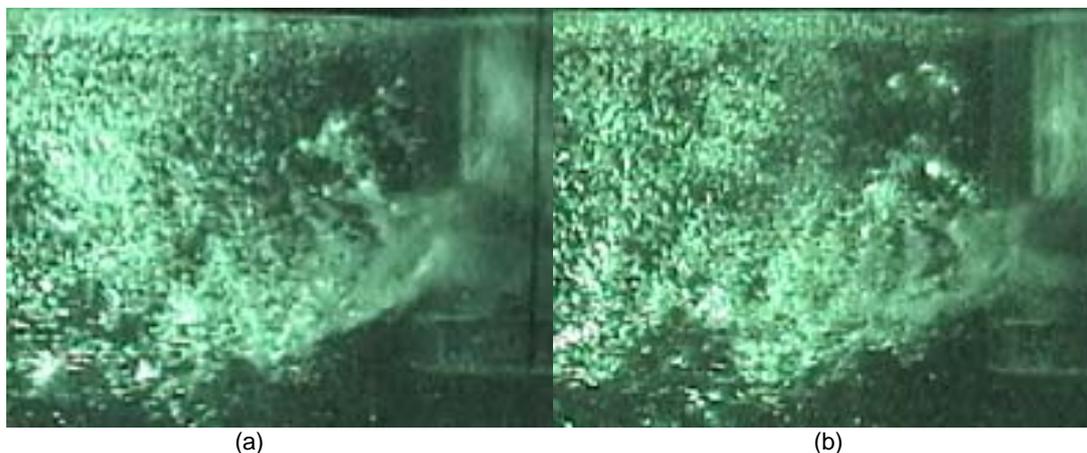


Figura 7. Fotos evidenciando as bolhas na saída da SEN; 336 l/min com injeção de 12 NI/min e 16 NI/min.

Para vazão de 400 NI/min se observa o fluxo duplo rolo no molde para todas as vazões de ar (4 NI/min, 8 NI/min, 12 NI/min e 16 NI/min). Na Figura 8, referente à vazão de água de 400 l/min e 12 NI/min de ar, se pode observar que o gás é levado até a lateral do molde e que se distribui de uma maneira muito mais homogênea, ao contrário do observado em vazões inferiores de líquido, 336 l/min. A análise das imagens geradas via *software Pivview*, para a condição de 400 l/min e 12 NI/min, mostra claramente a formação do fluxo em duplo rolo (Figura 8). Contudo, uma situação que não se observa para a vazão de 400 l/min é a formação de bolhas com diâmetro maiores na saída da válvula. Entende-se que a maior vazão gera uma maior turbulência o que não permite a aglomeração do gás em bolhas maiores. Outro fator que pode influenciar também este fenômeno é que para vazões maiores de água espera-se uma redução no tamanho das bolhas.^(1,3)

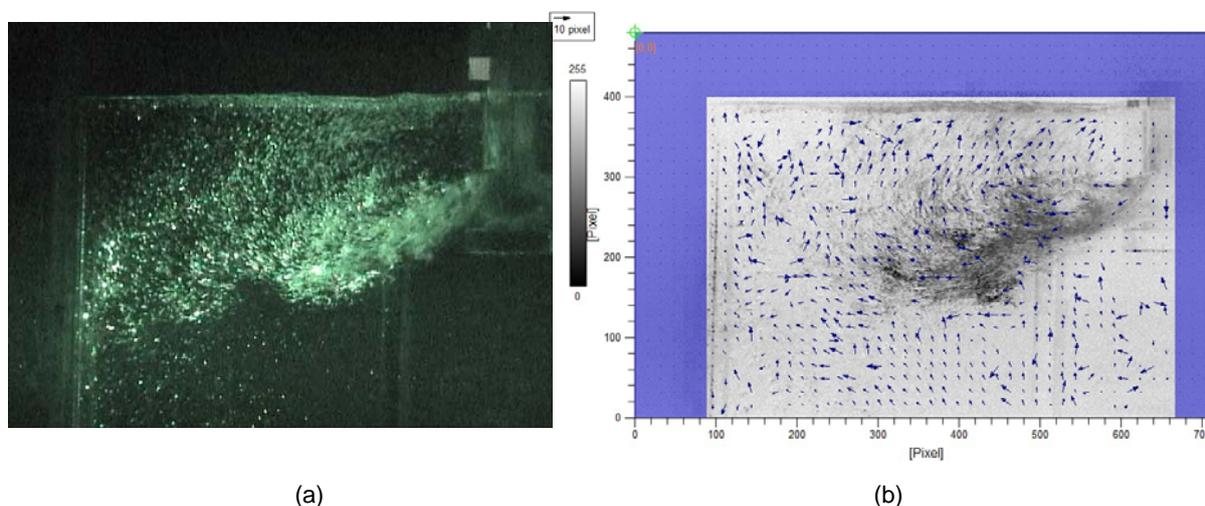


Figura 8. Foto modelo físico em funcionamento com 400 l/min de água e 12 NI/min de ar; Imagem vetores gerados pelo *software Pivview* para o caso de 400 l/min de água e 12 NI/min de ar.



3.3 Distribuição de Gás no Interior do Molde para Válvula Superior com Duas Seções Porosas

Semelhante ao observado para válvula superior totalmente porosa mostra-se que o padrão de fluxo no molde é fortemente influenciado pela combinação entre vazão de líquido e de gás. Para vazão de 336 l/min e para a vazão de ar de 4 NI/min se observa a existência do fluxo duplo rolo idêntico ao da Figura 8a (Figura 9a). Enquanto que para vazões de ar de 8 NI/min, 12 NI/min e 16 NI/min, se observa que o fluxo duplo rolo fica prejudicado pelo fluxo de ar, o que tende a determinar um fluxo ascendente próximo a saída da válvula. Para vazões de 400 l/min se mantém a formação do fluxo de duplo rolo (Figura 9b). Ou seja, independentemente da vazão de água, quando se avalia o fluxo de água no molde (incluindo a distribuição e trajetória das bolhas; movimentação do líquido) não se observa diferenças significativas quer se trate de válvula totalmente porosa ou de válvula com duas seções porosas de injeção. Tal comportamento poderia ser antecipado face à avaliação anteriormente efetuada dos diâmetros das bolhas no interior da SEN; naquele caso também o tamanho de bolhas não se mostrou influenciado pelo tipo de válvula superior.

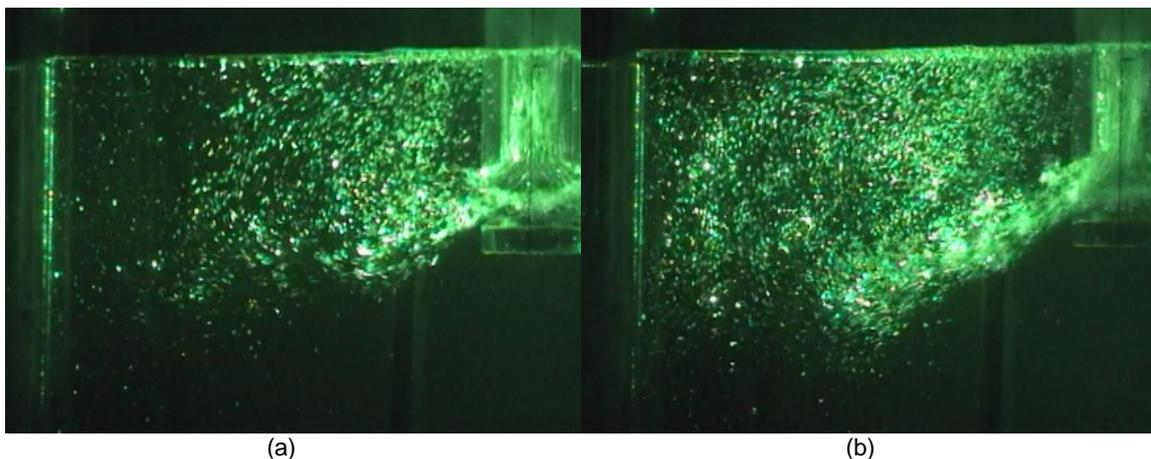


Figura 9. Foto modelo físico em funcionamento válvula superior com duas seções porosas (a) 336 l/min de água e 4 NI/min de ar; e (b) 400 l/min de água e 12 NI/min de ar.

3.4 Simulação Numérica

A Figura 10 apresenta uma comparação entre os frames da distribuição volumétrica prevista pelo modelo matemático (CFX), imagem à esquerda, e a distribuição de bolhas observada no modelo físico, à direita. A posição da região de maior concentração de bolhas gasosas é claramente coincidente, nas duas simulações. Como a imagem do CFX é referente a um único plano (corte transversal do molde passando pelo centro da SEN), enquanto que a imagem do modelo físico é relativa à sobreposição dos planos, não se pode observar nesta imagem do CFX a região de escape de bolhas. Contudo, ao avaliar-se a imagem em 3-D (Figura 11) se percebe claramente a região de concentração de gases e a região de escape dos mesmos.

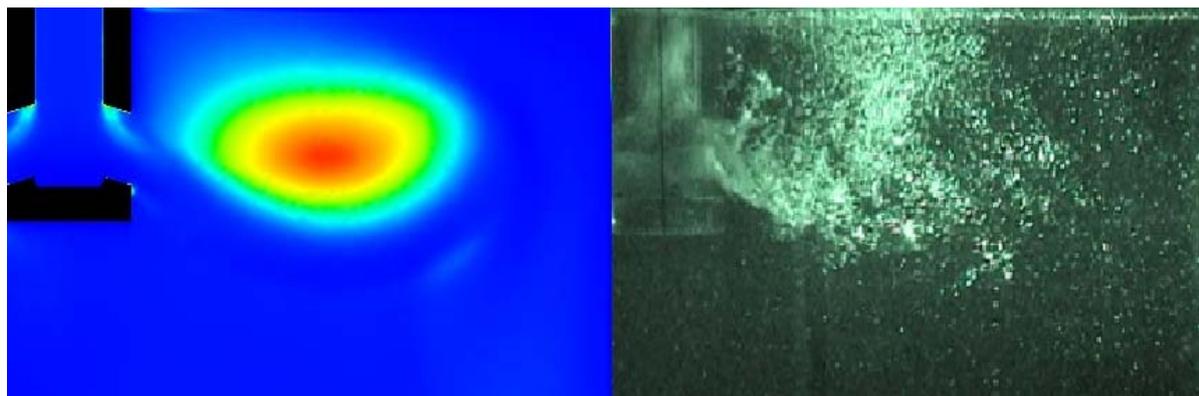


Figura 10. Imagem distribuição gasosa gerada na simulação matemática e na simulação física, 336 lpm e 12 NI de gás por minuto.

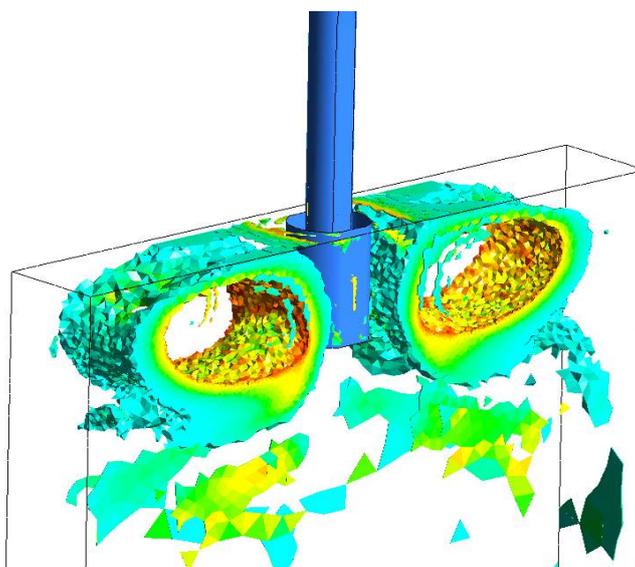


Figura 11. Distribuição gasosa gerada na simulação matemática vista 3-D, 336 lpm e 12 NI de gás por minuto.

O perfil correspondente de velocidade de líquido é mostrado na Figura 12. Nota-se a falta de simetria, que se deve ao caráter transiente da simulação, que foi levada a 180 segundos (CPU time = 13 dias, 18 horas e 16 segundos), e ao fato desta ser referente a um frame, e que se mantém a estrutura de duplo rolo. Esta última característica não é observada na modelagem física, o que deixa evidente a necessidade de ajuste do modelo matemático. A discrepância observada entre a modelagem física e matemática pode ser devida ao expediente de se fixar valor constante de diâmetro de bolha, o que claramente não se observa na modelagem física. Nesta, embora claramente o diâmetro médio no interior da SEN esteja próximo de 2,5 mm se nota coalescimento de bolhas na região inferior do fundo da SEN e nas portas de saída. Conforme Yavuz e Sengupta⁽⁴⁾ e Forman et al.⁽⁵⁾ uma maneira de se eliminar a região de baixa velocidade no fundo da SEN seria modificando a geometria da válvula. Todavia, ambos autores discutem as condições de lingotamento (profundidade de imersão da válvula, vazão de aço e largura de molde), onde está nova configuração seria mais adequada (redução de deposição de alumina e arraste de escória).

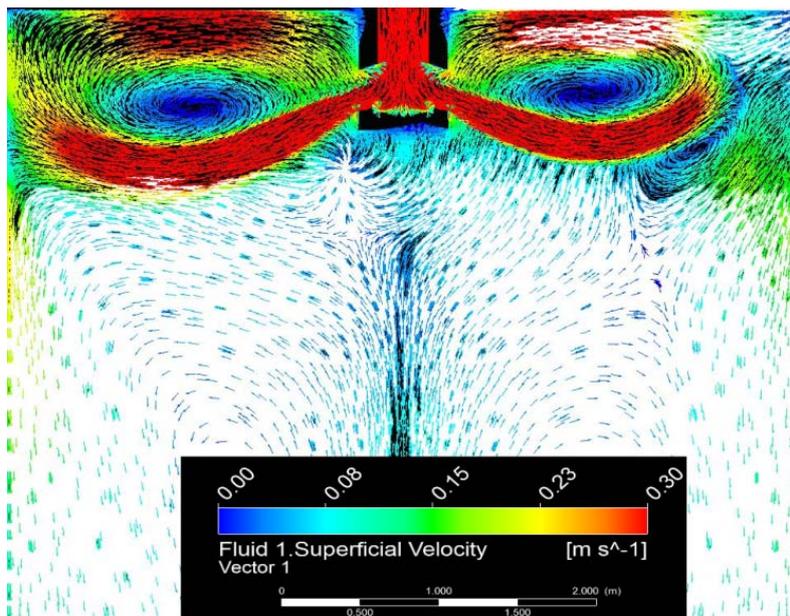


Figura 12. Vetores velocidade do líquido gerado pela simulação numérica, 336 lpm de água e 12 lpm de gás.

4 CONCLUSÃO

Para as condições operacionais investigadas, os seguintes resultados foram obtidos:

- O diâmetro das bolhas no interior da SEN é maior para vazões de água menores e para vazões de gás maiores.
- para vazão de 336 lpm de água somente se mantém o fluxo duplo rolo no molde para baixa vazão de gás (4 nl/min). Nas outras vazões de gás, 8 nl/min, 12 nl/min e 16 nl/min, o processo de coalescência das bolhas (aumento do diâmetro), temos que o fluxo duplo rolo fica prejudicado pelo fluxo de ar.
- para vazão de 400 lpm de água se mantém o fluxo de duplo rolo para todas as vazões de gás.
- o resultado da simulação numérica para 336 lpm e 12 nl/min de gás reproduz parcialmente o resultado observado no modelo físico. Isto se deve provavelmente a que o diâmetro de bolha se encontra fixo em 3 mm no CFX. Ajustes e novas simulações são necessários para adequar o modelo matemático.

Agradecimentos

A Superintendência de Assistência Técnica e ao Centro de Pesquisas da Magnesita, ao CNPq e a FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 YUAN, F. "Numerical simulation of Al₂O₃ deposition at a nozzle during continuous casting". Journal of the University of Science and Technology Beijing, Vol 15, Number 3, p. 227, Jun. 2008.
- 2 SUZUKI, H. et al. "Structure of Porous Upper Nozzle for Tundish and Gas Bubble Behavior". Shinagawa Technical Report, 2003.



- 3 THOMAS, B. et al. “Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel”. ISS 80th Steelmaking Conference, p. 375-384. 1997
- 4 YAVUZ, M. M.; SENGUPTA, J. “Nozzle Design for ArcelorMittal Dofasco’s N^o 1 Continuous Caster for Minimizing Sliver Defects”. AISTech 2010 Proceedings - Volume II.
- 5 FORMAN, B. et al. “Optimization of a Submerged Entry Nozzle Design to Reduce Non-metallic Inclusions in Line Pipe Steel”. AISTech 2010 Proceedings - Volume II.