

## UMA PROPOSTA PARA MODELO DE FLUXO EM MOLDE DE BEAM BLANK\*

Weslei Viana Gabriel<sup>1</sup>  
Johnê Jesus Mol Peixoto<sup>1</sup>  
Gustavo Santos Galante<sup>2</sup>  
Guilherme Santiago Queiroz<sup>2</sup>  
Pedro Henrique Resende Vaz de Melo<sup>3</sup>  
Carlos Antonio da Silva<sup>4</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>4</sup>

### Resumo

Em função da complexidade geométrica dos moldes de *beam blank*, torna-se desafiador definir modelo de válvula submersa para alimentá-los. Principalmente quando se propõe a trabalhar com apenas uma válvula submersa (SEN), uma vez que a maioria dos modelos propostos, neste caso, propiciam fluxo assimétrico. Neste estudo, uma nova configuração é proposta, na qual o molde é alimentado pelo centro da alma. A caracterização do fluxo é realizada através de técnicas de modelagem física e de simulação matemática. Esta nova configuração gerou uma simetria de fluxo de fluido ao longo do molde, comportamento mais estável do menisco e menor profundidade do ponto de impingimento. A taxa de remoção de inclusões é semelhante à de outros modelos de SEN. A diminuição da velocidade de lingotamento e o aumento da diferença de densidade entre os fluidos utilizados para simular aço e escória aumentam a estabilidade interfacial.

**Palavras-chave:** Beam blank; Válvula submersa; Fluxo; Comportamento interfacial.

### A PROPOSAL FOR FLOW MODEL IN A BEAM BLANK MOLD

#### Abstract

The geometric complexity of beam blank molds makes it challenging to define the proper submerged entry nozzle design. This is especially true in cases where only one SEN is used, because in many situations an asymmetric flow results. In this paper, a new SEN configuration is proposed, which feeds the mold through the web center. A characterization of the resulting flow is done by physical and mathematical simulations. This new design creates a symmetric fluid flow inside the mold, leading to a more stable behavior of the meniscus and lower depth of the impingement point. The inclusions removal rate is similar to those obtained by other models of SEN. Decreasing the casting velocity and increasing the density difference of liquids emulating metal and slag increase the interfacial stability.

**Keywords:** Beam blank; Submerged entry nozzle; Flow; Interfacial behavior.

<sup>1</sup> Eng. Metalurgista, MSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Metalurgista, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Metalurgista, MSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. Metalurgista, DSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo das características de fluxo em molde de beam blank é uma ferramenta importante para entender os fenômenos que ocorrem no interior do reator possibilitando a prevenção de anomalias, bem como o desenvolvimento de sistemas mais adequados para alimentação, visando aumento da produtividade e decréscimo no número de defeitos. Técnicas de modelamento físico e matemático utilizando água como fluido para simular o comportamento do aço tem sido largamente aplicada em função dos critérios de similaridade. Assar e Singlenton [1] relataram que dentre as técnicas que permitem uma análise quantitativa de fluxo, a técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) é a que permite que se avalie vários pontos numa pequena fração de segundos e sem promover distúrbios no meio. Daí a sua importância para determinação do perfil de velocidade em moldes de lingotamento contínuo. Além disto, a transparência da água é um fator importante para permitir a visualização do movimento de partículas no interior da mesma.

A configuração da válvula submersa influencia o perfil de velocidade do fluido no interior do molde. De acordo com Mishra *et al.* [2], válvulas com seção interna em formato oval são mais vantajosas em relação às válvulas circulares para moldes de seções estreitas, resultando em fluxos mais estáveis. Além disto, portas de saída em formato retangular melhoram a distribuição do fluido no molde. O perfil de velocidade exerce grande influência no perfil térmico, uma vez que regiões com maiores velocidades implicam em maiores temperaturas, devido à facilidade na renovação do metal, além disto, alta velocidade próxima à casca inibe o desenvolvimento da mesma (Zhang *et al.* [3]).

Para moldes de placa, Liuyi *et al.* [4] demonstraram que pequenas profundidades de imersão resultam em aumento na turbulência da interface bem como em forte impacto do jato na parede da face estreita, por outro lado, para profundidades de imersão muito altas, tem-se aumento na profundidade da região de impacto o que desfavorece o crescimento da casca, além de dificultar a flotação de inclusões e a fusão do pó fluxante. Segundo Chen *et al.* [5], para evitar a formação de defeitos no lingote de *beam blank*, a espessura mínima da casca na saída do molde deve ser de 12 mm e a temperatura ao longo do resfriamento secundário deve ser rigorosamente controlada para evitar principalmente a formação de trincas transversais.

Neste estudo, é proposto uma nova configuração do sistema para alimentação do molde, utilizando uma única válvula submersa posicionada no centro da alma. Nos sistemas tradicionais, o metal líquido é inserido no centro de um ou em ambos os flanges. Deste modo, quando se opta por utilizar apenas uma válvula submersa, tem-se uma distribuição assimétrica de fluxo do fluido. Esta assimetria na distribuição do fluido pode promover assimetria no fluxo de calor e conseqüentemente uma formação de casca irregular (De Santis *et al.* [6]). O objetivo deste trabalho é caracterizar o fluxo nesta nova configuração, simular a taxa de remoção de inclusões bem como prever o comportamento da interface metal/escória com este novo modelo de válvula submersa.

## 2 DESENVOLVIMENTO

As análises foram realizadas num molde de *beam blank* construído em acrílico, escala 1:1 cujas dimensões são 499 mmX415 mmX125 mm e 1,5 m de altura. Foi utilizada água na temperatura ambiente para simular o aço líquido a aproximadamente 1600 °C. A caracterização do fluxo foi realizada utilizando técnicas de simulação física e matemática. As vazões utilizadas foram de 100 L/min; 125 L/min e 150 L/min e a profundidade de imersão da SEN foi mantida em 60 mm. Foram aplicadas diferentes técnicas de simulação tanto no modelo físico, quanto também no matemático, permitindo descrever o comportamento do fluxo em diferentes regiões, simular o comportamento da interface metal escória, bem como a remoção de inclusões no interior do molde.

O novo modelo de válvula proposto (Figuras 1 e 2b)) é posicionado no centro do molde visando promover simetria de fluxo. O formato da seção transversal da SEN é oval e a mesma possui 3 portas de saída, sendo duas laterais, retangulares 20 mmX60 mm e uma circular na base inferior com diâmetro de 20 mm. O ângulo de inclinação das portas laterais estudados foi de 60° em relação ao eixo vertical ( $\Theta$ ).

### 2.1 Simulação Física

Através da simulação física foram avaliados o perfil de velocidade em uma região do plano AA através da técnica PIV, permitindo avaliar os valores de velocidade ao longo da linha 2 (Figura 1). Peixoto *et al.* [7] detalha o princípio de funcionamento desta técnica. Os resultados obtidos foram comparados aos de simulação matemática. A análise de dispersão de traçador permite uma avaliação qualitativa do fluxo. Neste caso, injeta-se corante na tubulação de entrada e filma-se a dispersão do mesmo ao longo do molde no plano frontal AA. Este corante é injetado na forma de solução, cuja diluição é de 100g para cada 2 litros de água.

Mensurou-se a oscilação da superfície livre utilizando um conjunto de sensores ultrassônicos modelo SICK UM30-21\_118. As medições deste equipamento são pontuais e os pontos escolhidos para análise estão destacados na Figura 1. Para o modelo do sistema de alimentação proposto, tem-se simetria de fluxo em ambos os flanges, por isto a análise unilateral da interface, neste caso, é o suficiente.

Para simular o comportamento da interface metal/escória líquidos, adicionou-se uma camada de óleo com espessura de 20 mm sobre a superfície da água. Os óleos utilizados foram o óleo de silicone 500 cSt e um óleo de motor 10w40 com menor densidade e viscosidade, permitindo avaliar como as alterações nas propriedades físicas dos mesmos influenciam no comportamento da interface água/óleo. Os resultados da avaliação do modelo físico também foram comparados ao matemático. A Tabela 1 apresenta os valores em unidade SI para as principais propriedades físicas dos fluidos utilizados na simulação da interface metal/escória (densidade, tensão interfacial e viscosidade).

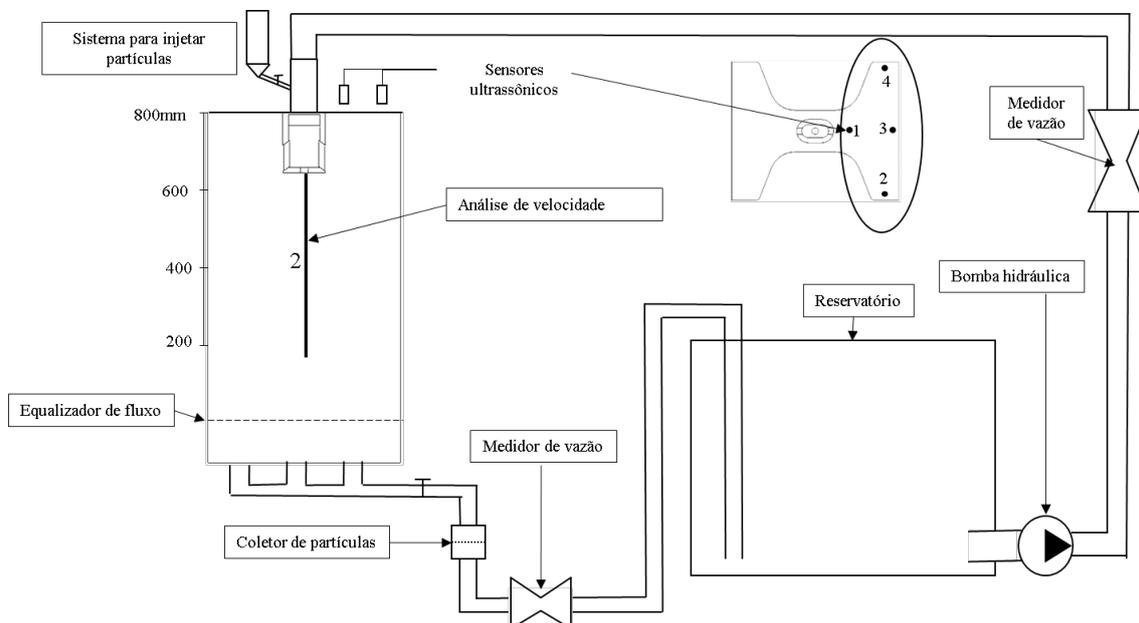
A taxa de remoção de remoção de inclusões foi simulada injetando-se 5 g de partículas com granulometria entre 100# e 200# na entrada do molde, de acordo com a técnica descrita por Gabriel *et al.* [8]. A Figura 1 apresenta esquematicamente o aparato experimental utilizado na simulação física, destacando o ponto de injeção

das partículas, bem como o ponto no qual as partículas passantes são coletadas. Neste ponto tem-se uma peneira para coleta das partículas passantes. Após os cinco minutos de teste com a vazão especificada, desliga-se o sistema e a válvula da saída do molde é fechada para permitir a coleta das partículas que posteriormente são secadas e pesadas. Para cada velocidade de lingotamento foram realizados 5 testes.

O tamanho das partículas utilizadas equivale a inclusões no banho metálico na faixa granulométrica entre 41,84  $\mu\text{m}$  e 83,68  $\mu\text{m}$  (Gabriel *et al.* [8]).

**Tabela 1.** Propriedades físicas dos materiais aplicados na simulação do comportamento metal/escória.

Material	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Gamma_{\text{água/óleo}}$ ( $\text{N/m}$ )	$\Gamma_{\text{óleo/ar}}$ ( $\text{N/m}$ )	$\mu$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
500 cSt	950	0,0357	0,0394	0,475
10W40	865	0,0152	0,0234	0,192



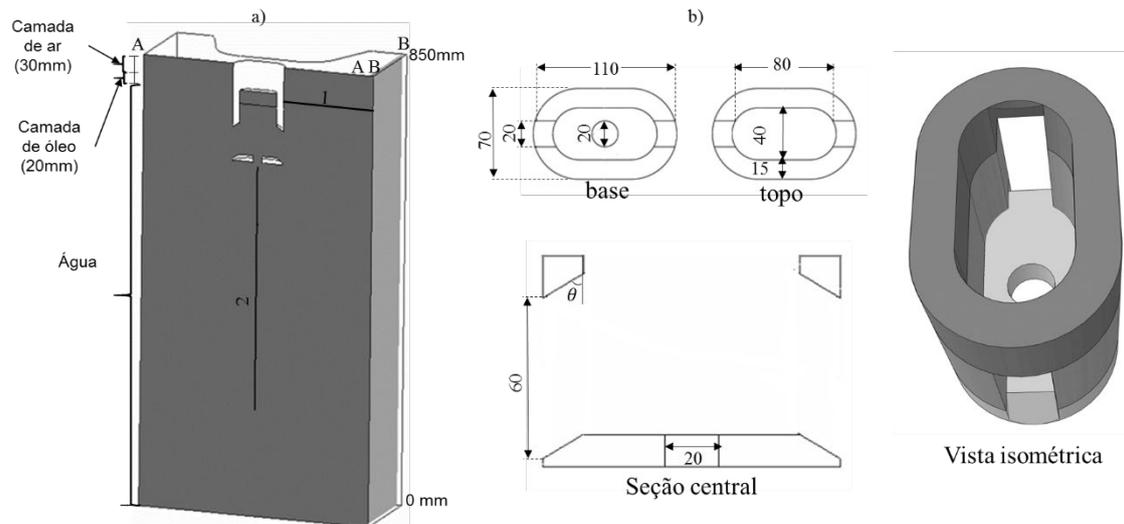
**Figura 1.** Aparato experimental aplicado na modelagem física.

## 2.1 Simulação Matemática

A Figura 2.a apresenta uma vista isométrica do modelo aplicado na simulação matemática. Neste caso, considerou-se a altura útil de 800mm, acrescida de uma camada de óleo de 20 mm e sobre esta uma camada de ar de 30mm. As linhas 1 e 2 mostram as regiões de análise de velocidade via CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para caracterização do fluxo. A linha 1 situa-se a 10 mm da interface água/óleo (considerando a interface inicial). Já a linha 2, passa pelo centro do jato gerado pela porta inferior. A Figura 2.b mostra detalhes da SEN utilizada.

Na descrição do fluxo, foi utilizado o software Ansys CFX versão 18.2. Esta ferramenta permite descrever o perfil de velocidade em quaisquer regiões do molde. Sendo que, neste caso, as regiões avaliadas correspondem ao plano de simetria (plano AA Figura 2.a) e um plano lateral situado a 10 mm da superfície do molde (plano BB Figura 2.a). Além do perfil de velocidades, foi possível analisar o

comportamento da interface água/óleo e comparar com as filmagens realizadas no modelo físico.



**Figura 2.** a) Vista isométrica do modelo aplicado na simulação matemática destacando os planos de análise do perfil de velocidade no molde de *beam blank* e as fases utilizadas b) modelo de válvula submersa.

O processo de simulação é constituído das etapas de desenvolvimento da geometria, divisão da geometria em diversos volumes de controle (construção da malha), em seguida determina-se as condições de contorno, as equações a serem resolvidas bem como modelo de turbulência aplicado. A geometria é subdividida em 3 partes (Figura 2.a): região superior com altura de 30mm, inicialmente é preenchida com ar; a região intermediária e inferior que compreendem o molde propriamente dito e são preenchidas inicialmente com óleo e água, respectivamente. Esta subdivisão no molde é necessária para permitir refinamento da interface água/óleo/ar sem aumento exacerbado no número de elementos.

Para confecção da malha primeiramente especificou-se o tamanho dos elementos de malha de 7mm. Em seguida aplicou-se a técnica *sweep* nas regiões superior e intermediária. O tipo de elementos nestas regiões foi o hexaédrico, enquanto que no restante do corpo, foi tetraédrico. Em todas as paredes aplicou-se o *inflation*, para melhorar os cálculos de velocidade nestas regiões. Visando redução no tempo de simulação, as mesmas foram realizadas em metade do molde (condição de simetria).

Na simulação matemática resolve-se as seguintes equações: Continuidade, Navier Stokes, Viscosidade Efetiva, Energia cinética de turbulência, Dissipação da energia cinética de turbulência e Viscosidade turbulenta. As condições de contorno aplicadas foram:

- Paredes - Condição de não deslizamento nas paredes do molde e da válvula;
- Saída e superfície abertas, com pressão de referência igual às pressões hidrostáticas correspondentes;
- Vazão mássica na entrada – 0,833 kg/s; 1,042 kg/s e 1,25 kg/s para as velocidades de lingotamento equivalentes a 0,78 m/min; 0,98 m/min e 1,2 m/min respectivamente.
- Simetria no plano AA.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise do Fluxo

Avaliando o fluxo por meio da dispersão de corante, Figura 3, percebe-se uma distribuição do mesmo ao longo do molde, com boa renovação do fluido no menisco. As portas laterais preenchem rapidamente os flanges enquanto a porta inferior supre a alma, tornando a alimentação ao longo da seção transversal mais igualitária. Esta distribuição homogênea pode promover uma formação da casca solidificada mais uniforme, evitando o surgimento de trincas. Hibbeler *et al.* [9] destacam que diferenças na espessura da casca pode promover formação de trincas longitudinais, bem como rompimento de veio.

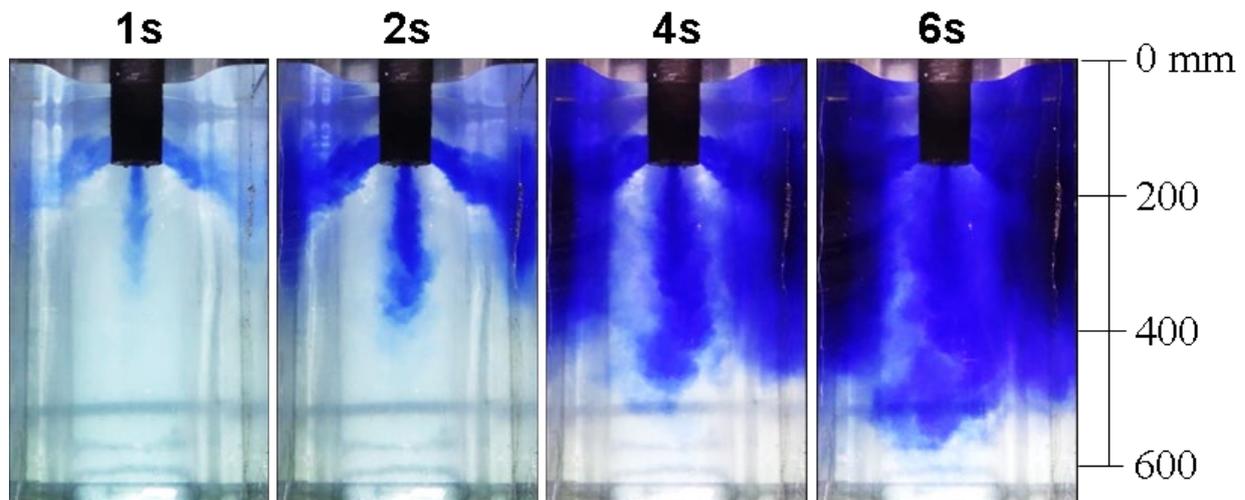


Figura 3. Dispersão de fluido no molde, vazão 125L/min, válvula 60°.

A Figura 4 apresenta o perfil de velocidade no plano AA, obtido através do modelamento matemático para diferentes velocidades de lingotamento. Observa-se que os jatos laterais se espalham ao longo da superfície do flange após atingir o ponto de impingimento. Há a geração de dois vórtices na região superior decorrentes da recirculação do fluido que se desloca em direção ao menisco. Na região inferior tem-se mais quatro vórtices: os dois centrais são oriundos da distribuição do fluido alimentado pela porta inferior; enquanto os dois laterais representam a recirculação do fluido que se distribuiu nas superfícies dos flanges, através das portas laterais.

Na Figura 5 tem-se valores da componente vertical de velocidade no centro do jato oriundo da porta inferior (linha 2) obtidos pelas técnicas PIV (Figura 5.a) e simulação matemática (Figura 5.b). Percebe-se uma boa concordância no perfil de velocidade mensurado por ambas as técnicas e que não existe influência significativa da velocidade de lingotamento sobre a velocidade no centro deste jato. A velocidade é maior próximo à saída do jato ( $z = 680$  mm). A medida que se aproxima da região de espalhamento do jato a velocidade diminui.

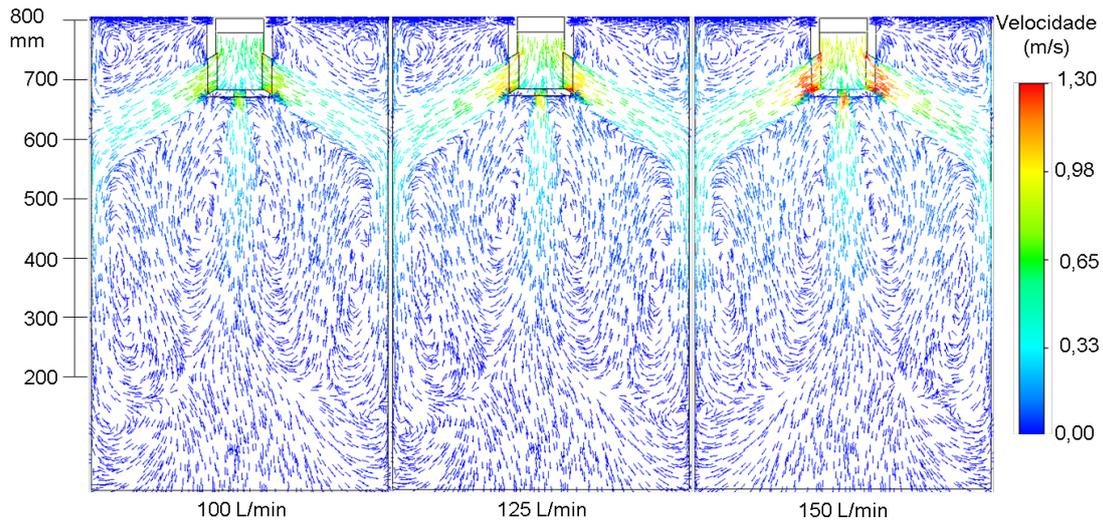


Figura 4. Perfil de velocidade no plano AA em função da vazão de fluido.

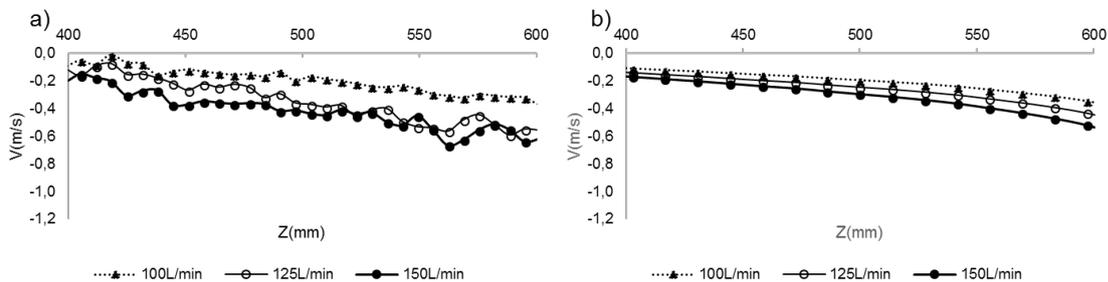


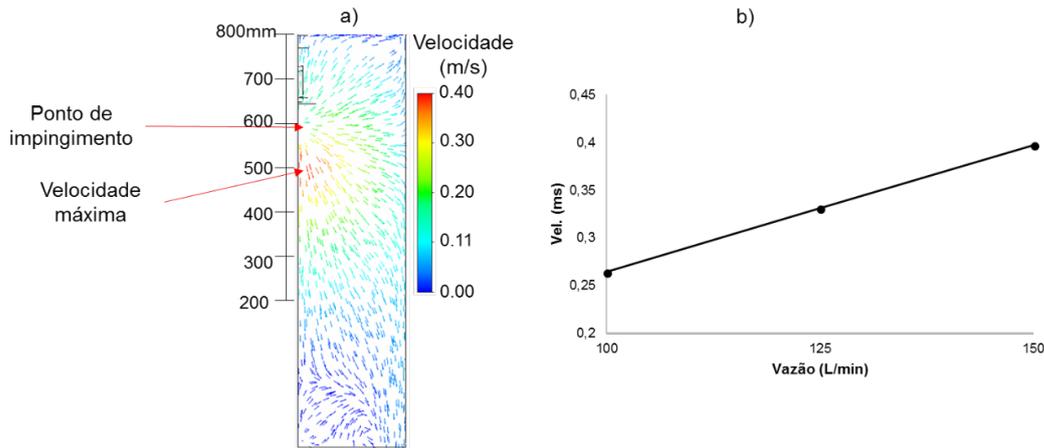
Figura 5. Valores da componente vertical de velocidade ao longo da linha 1: a) PIV; b) CFD.

A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros que caracterizam os jatos formados pela válvula submersa (SEN). Para o jato lateral, mensurou-se sua inclinação e o ponto de impingimento do mesmo sobre a superfície do flange. Para o jato inferior mediu-se a profundidade de imersão. Não foi observado influência da velocidade de lingotamento sobre a profundidade de imersão do jato oriundo da porta inferior. A baixa profundidade de imersão resulta em ponto de impingimento mais próximo ao menisco. Como se trata de uma região de ponto quente, um ponto de impingimento mais longe da saída do molde é favorável ao desenvolvimento da casca nesta região, reduzindo a probabilidade de formação de defeitos.

Tabela 2 – Características do jato lateral e inferior

	Físico	CFD
<b>Inclinação jato lateral</b>	- 30,0°	-29,5°
<b>Profundidade de imersão do jato inferior</b>	230 mm	227 mm
<b>Ponto de impingimento do jato lateral</b>	213 mm	210 mm

A Figura 6.a apresenta o perfil de velocidade ao longo do plano BB, destacando o espalhamento do jato oriundo da porta lateral. A região de máxima velocidade situa-se abaixo do ponto de impingimento (na região de recirculação da parcela descendente do fluxo) os valores de velocidade máxima aumentam com o aumento da velocidade de lingotamento (Figura 6.b).

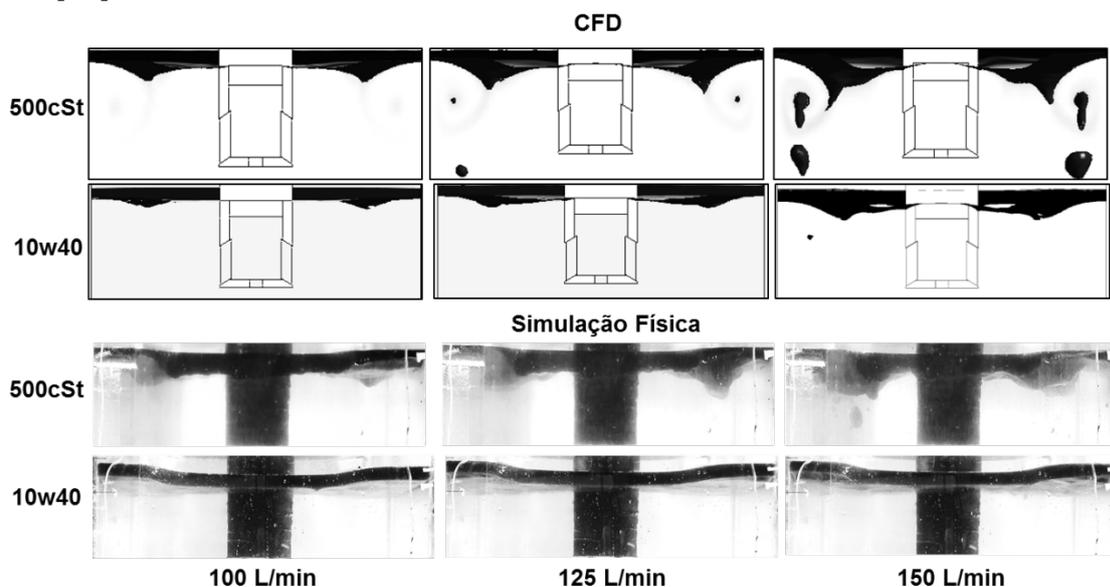


**Figura 6.** a) Perfil de velocidade no plano BB (150 L/min), b) valores de velocidade máxima no plano BB em função da vazão de lingotamento.

Para uma mesma velocidade de lingotamento, esta SEN resultou em menores velocidades e profundidade de impacto dos jatos laterais, quando comparada com a válvula analisada por Gabriel et al. [8]. Estas características possibilitam melhor desenvolvimento da casca solidificada.

### 3.2 Simulação da interface metal/escória

Para o óleo de 500cSt (maior densidade) há uma boa semelhança entre os resultados obtidos via simulação física e matemática, Figura 7. Destaca-se que na vazão de 125 L/min não se observou entranhamento na modelagem física como ocorreu na matemática, porém a grande deformação interfacial na região de recirculação da água, evidencia uma condição crítica (próxima à condição de entranhamento). Sobre a superfície do óleo não se observou grandes deformações, fato importante para garantir alimentação uniforme de escória líquida na região entre a pele solidificada e o molde, garantindo boa lubrificação conforme descrito por Zhu et al. [10].



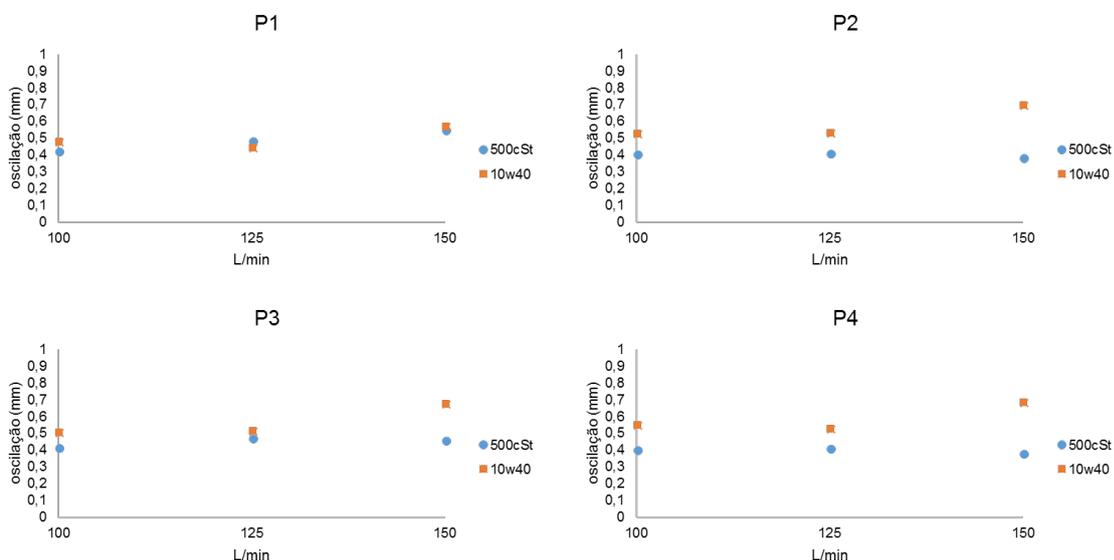
**Figura 7.** Comparação do comportamento interfacial obtida por modelamento matemático e modelamento físico, óleo 500cSt e 10W40.

Ao utilizar o óleo 10W40 com menor densidade ( $865 \text{ kg/m}^3$ ) não se observou grandes deformações na interface para todas as vazões de fluido testadas, demonstrando maior estabilidade da mesma e conseqüentemente, menor tendência à entranhamento de óleo na água. Existiu também, neste caso uma boa concordância entre resultados físicos e de modelamento matemático, Figura 7.

A Figura 8 avalia a intensidade média de oscilação ao longo do menisco, comparando o comportamento quando se aplicou óleos com diferentes propriedades físicas sobre a superfície da água. Os pontos 2 e 4 apresentam valores semelhantes devido a simetria de fluxo ao longo do molde. O ponto 3 situa-se na região na qual observa-se maior deformação interfacial.

De maneira geral, quando se utiliza o óleo 10w40, a intensidade de oscilação é relativamente superior, principalmente na vazão de 150 L/min. Em geral, nas vazões de 100 L/min e 125 L/min não se observa variações significativas da intensidade de oscilação do menisco em função da posição avaliada. Na maioria dos casos, o óleo de menor densidade e viscosidade (10w40) apresentou maior intensidade de oscilação superficial. Este fato pode estar relacionado com a menor resistência apresentada pelo mesmo à recirculação de água próximo à interface.

Aplicando a camada de óleo 500cSt observou-se menor intensidade de oscilação, além da mesma ser praticamente independente da velocidade de lingotamento e da posição avaliada. A alta viscosidade apresentada pelo óleo, dificulta a movimentação do menisco, daí reduz-se a oscilação superficial, mesmo apresentando uma interface instável.



**Figura 8.** Intensidade de oscilação do menisco em função da vazão e do tipo de óleo aplicado na simulação da camada de escória.

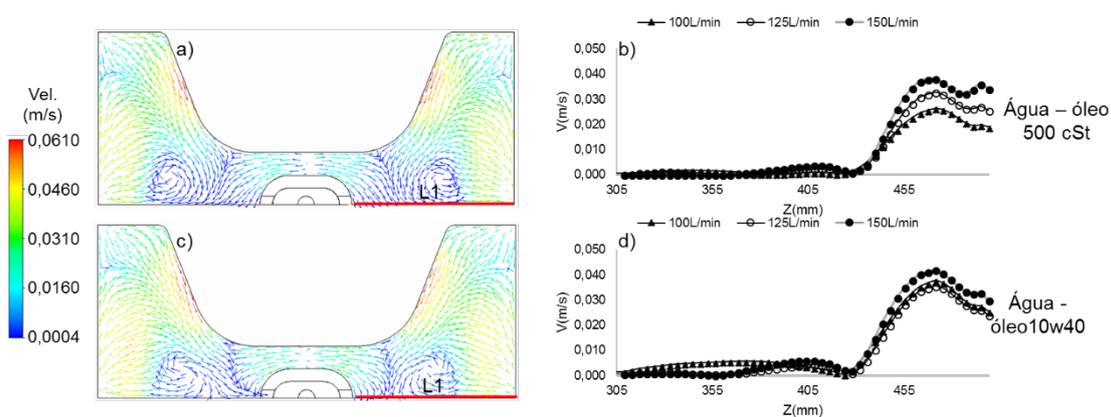
Em estudo de fluxo no mesmo modelo de molde, utilizando válvula posicionada em um dos flanges (fluxo assimétrico) Gabriel *et al.* [11] verificaram valores de oscilação média superiores na região de recirculação do fluido, utilizando uma profundidade de imersão de 250 mm. Além disto, o comportamento da interface era mais irregular ao

longo da seção. Nesta nova válvula, a diferença de oscilação entre os pontos verificados é menor, com intensidades máxima de oscilação semelhante à encontrada por Gabriel *et al.* [11], porém, no presente trabalho, a profundidade de imersão da SEN é de apenas 60 mm.

Analisando o perfil de velocidade próximo ao menisco não se observa alteração em função das propriedades dos óleos utilizados na camada sobre o fluxo da água. As Figuras 9.a e 9.c comparam o perfil de velocidade obtido nos sistemas água/óleo 500 cSt e água/óleo 10w40, demonstrando a semelhança entre eles. Existem vórtices na região entre o filete e a alma, isto explica as deformações interfaciais na região entre filete e a alma demonstrada na Figura 7. Os maiores valores de velocidade estão localizados próximos ao filete e na região de recirculação do flange para a alma. O gradiente de velocidade ao longo da seção transversal é inferior aos obtidos com modelos de válvulas avaliadas por Gabriel *et al.* [11] e Peixoto *et al.* [7]. Uma maior homogeneização superficial, propicia uma lubrificação uniforme do molde.

As Figuras 9.b e 9.d apresentam os valores de velocidade ao longo da linha 1 (L1) (próxima ao menisco). Os valores máximos de velocidade estão à aproximadamente 25 mm da superfície do flange, na região de recirculação do fluido ascendente. Para a vazão de 150 L/min não se observa diferença significativa de velocidade entre os sistemas analisados. Quando se utiliza o óleo mais viscoso, a velocidade diminui com o decréscimo da vazão. No sistema com óleo 10w40 a influência da vazão sobre a velocidade é menor. Para as vazões de 100 L/min e 125L/min não existe diferença significativa de velocidade.

O óleo 10w40 por ser menos denso e viscoso gera uma interface mais estável. A pequena deformação interfacial, principalmente nas menores vazões, implica em menor resistência ao movimento de recirculação da água. Já o óleo de 500 cSt, além de provocar grande deformação da interface devido à pequena diferença de densidade com a água, é muito viscoso, exercendo resistência sobre a recirculação do fluido nesta região.



**Figura 9.** Comparação dos perfis de velocidade próximo ao menisco ( $z=0,79$  m) e da velocidade ao longo da linha 1 em função do tipo de óleo utilizado a) e b) óleo 500 cSt; c) e d) óleo 10w40. Vazão de 150 L/min.

### 3.3 Análise da Taxa de remoção de inclusões

A Figura 10 apresenta valores da taxa de remoção de inclusões obtidos via modelagem física para as diferentes velocidades de lingotamento estudadas. O aumento da velocidade de lingotamento resultou em redução na taxa de remoção de inclusões. Gabriel *et al.* [8] encontraram valores semelhantes para taxa de remoção de inclusões em um sistema alimentado com apenas uma SEN, numa configuração assimétrica do fluxo. Zhang *et al.* [12] encontraram para sistemas de alimentação compostos por duas válvulas tubulares, valores de taxa de remoção de inclusões variando de 25 a 27%. Para esta mesma velocidade, o presente modelo de válvula posicionada no centro da alma apresentou um valor médio de remoção de inclusões consideravelmente superior.

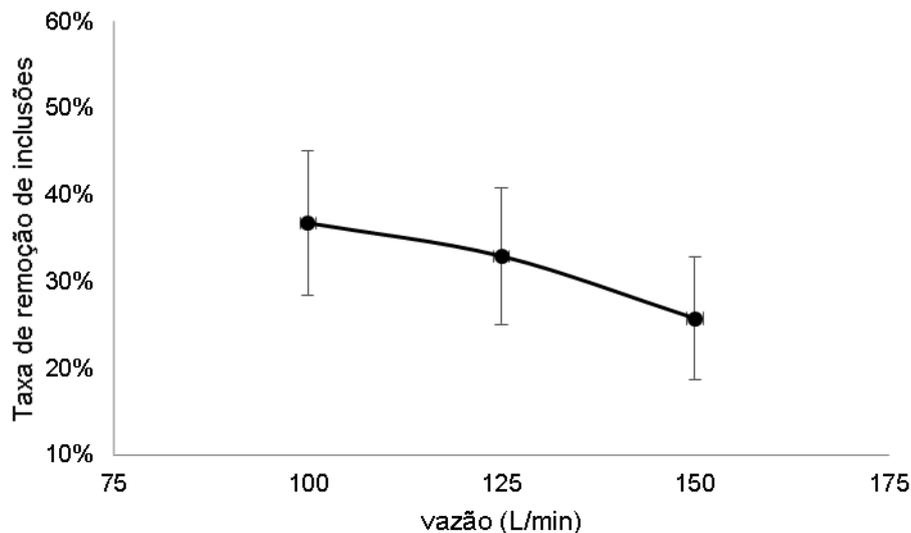


Figura 10. Valores de taxa de remoção de inclusões em função da vazão.

## 4 CONCLUSÃO

Com base nas características de fluxo avaliadas conclui-se que:

- A configuração de válvula proposta para alimentação do molde de beam blank propicia melhor simetria de fluxo do que outros modelos comumente aplicados;
- Esta simetria de fluxo tende a proporcionar homogeneidade do perfil térmico e crescimento uniforme da casca, reduzindo a geração de defeitos no lingote;
- A redução de viscosidade e o aumento da densidade do fluido que simula escória, aumenta a estabilidade da interface, reduzindo tendência à entranhamento;
- A influência das propriedades do óleo sobre o perfil de velocidade na região próxima ao menisco diminui com o aumento da velocidade de lingotamento;
- A taxa de remoção de inclusões no molde diminui com o aumento da velocidade de lingotamento;
- Os valores de taxa de remoção de inclusões obtidos para esta válvula, são semelhantes à de modelos de válvula com fluxo de fluido assimétrico.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer FAPEMIG, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, em especial pelas

bolsas de pesquisa concedidas a W.V. Gabriel, G.L. Alves e J. J. M. Peixoto, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- 1 Assar, MB. Singlenton, J. SEN Design Using PIV Technology. Aistech 2005 Proceedings. Vol. II.
- 2 Mishra, P., Ajmani. SK., Kumar, A., Shrivastava, KK. Review Article. Physical and Numerical Modelling of SEN and Mould for Continuous Slab Casting, International Journal of Engineering Science and Technology. 2012;4: 2234 - 2243.
- 3 L.-L. Zhang, D.-F. Chen, H.-B. Chen, M.-J. Long & X. Xie (2017) Study on transport phenomena in the beam blank continuous casting mould coupling copper mould with molten steel, Ironmaking & Steelmaking. 2017; 44(3): 193 - 201.
- 4 Liuyi Li1., Rong Zhu1., Guoguang Cheng., Bin Hu., Chengshun Wang., Guoyu Qian., Effect of Insert Depth of the Submerged-Entry Nozzle on the Flow Field of Casting Mold. AISTech 2017 Proceedings.
- 5 W. Chen., Y.-Z. Zhang., J.-H. Ma1, B.-X. Wang., Y. Chen., C. Wang., Optimization of Processing Parameters for Beam Blank Continuous Casting Using Moga Combined With FEM. Rev. Adv. Mater. Sci.2013; 33: 337 - 341.
- 6 De Santis, M., Cristallini, A., Rinaldi, M., Sgro, A., 2014. Modelling-based Innovative Feeding Strategy for Beam Blanks Mould Casting Aimed at As-cast Surface Quality Improvement. ISIJ International. 2014;54 (3): 496–503.
- 7 Peixoto, JJM.; Gabriel, WV.; Ribeiro, LQ, Silva, CA, Silva, IA e Seshadri, V. Computational and physical simulation of fluid flow inside a beam blank continuous casting mold. Journal of Materials Processing Technology. 2016(a);233: 89 – 99.
- 8 Gabriel, WV; Peixoto, JJM; Alves, GL; Silva, CA; Silva, IA; Seshadri, V. FLUXO DE LÍQUIDO NUM MOLDE DE BEAM BLANK E A REMOÇÃO DE INCLUSÕES. 48° Seminário de Aciaria, Fundação e Metalurgia de Não-Ferrosos, São Paulo, 2017. 299-309.
- 9 Hibeller, LC.,Koric, S, Xu, K, Thomas, BG., Spangler, C. Thermo-Mechanical Modeling of Beam Blank Casting, Aistech 2008, Pittsburg, PA, p. 1-14.
- 10 Zhu M., Xu M., Luo S. The Design of New Submerged Entry Nozzles for Beam-Blank Continuous Casting. In: Nastac L. et al. (eds) Advances in the Science and Engineering of Casting Solidification.2015; Springer, Cham
- 11 Gabriel, WV; PeixotoJJM; Alves, GL; Silva, CA; Silva, IA; Seshadri, V. Comportamento da Interface Metal/Escória em Molde de Beam Blank , 48° Seminário de Aciaria, Fundação e Metalurgia de Não-Ferrosos, São Paulo, 2017. p. 456-467.
- 12 Zhang,L.,Cheng,D.Long,M.,Xie,X.,Zhang,X.,Ma,Y. Hydraulic Simulation of Fluid Flow in Beam Blank Continuous Casting Mold With Double Nozzles. EPD Congress 2014, p.375-384.