

ESTUDO DO MECANISMO DE CLOGGING NA REGIÃO DA VÁLVULA TAMPÃO EMPREGANDO CFD

André Carlos Contini ¹
 Bayard Beling Morales ²
 Leonardo Barboza Trindade ³
 Antônio Cezar Faria Vilela ⁴

Resumo

A deposição de inclusões (*clogging*) na válvula submersa e na válvula tampão do distribuidor é um problema que pode ocorrer em todas as aciarias, provocando a interrupção de veios, desestabilização da operação e aumento nos custos. Este trabalho pretende avaliar a influência do escoamento do aço líquido na deposição de inclusões de alumina na válvula tampão. Para isso, é empregado um modelo fluidodinâmico computacional para caracterizar o escoamento do aço na região da válvula tampão. Para o cálculo foi construída uma geometria tridimensional da região próxima à sede. A solução do escoamento e a previsão da deposição de inclusões foram implementadas usando uma formulação euleriana e o modelo lagrangeano, respectivamente. São avaliadas diferentes aberturas da válvula para visualizar o comportamento do aço e relacioná-lo à taxa de deposição de inclusões. Consegue-se observar que ocorre uma recirculação na ponta do tampão e que está relacionada com a abertura da válvula. Observa-se que, quanto maior a abertura da válvula, menor é a taxa de deposição de inclusões.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo de aço; Válvula tampão; *Clogging*; CFD.

INVESTIGATION OF CLOGGING MECHANISM IN THE STOPPER ROD REGION EMPLOYING CFD ANALYSIS

Abstract

Inclusions deposition on stopper rod and submerged entry nozzle is a problem which may occur in every steel plant, leading to casting interruption, operational instabilities and increase in costs. This paper seeks to analyze the influence of molten steel flow pattern on alumina inclusions deposition at stopper rod. A computational fluid dynamical model is employed in order to characterize the flow in that region. A 3–dimensional geometry of the nozzle region was built. Molten steel flow and inclusions deposition are computed through eulerian and lagrangian approaches, accordingly. Different nozzle openings are evaluated in order to visualize the steel flow and to relate alumina deposition rate with it. The results show that there is a recirculation that occurs in the stopper rod tip and it is related to the nozzle openings. It is seen that larger nozzle openings tends to lower the inclusions deposition rate.

Key words: Continuous casting of steel; Stopper rod; *Clogging*; CFD.

¹Físico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Equipe Técnica – STE. Av. Ipiranga, 6681, Portal TECNOPUC (P. 99A), sala 809, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: andre@ste-metals.com.br

²Físico, Mestre em Engenharia, Equipe Técnica, STE. Av. Ipiranga, 6681, Portal TECNOPUC (P. 99A), sala 809, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: bayard@ste-metals.com.br

³Físico, Dr., Engenharia Metalúrgica, Diretor Geral, STE. Av. Ipiranga, 6681, Portal TECNOPUC (P. 99A), sala 809, Partenon, Cep 90619-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: trindade@ste-metals.com.br

⁴Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor do Departamento de Metalurgia – DEMET, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Coordenador do Laboratório de Siderurgia – LASID. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 6, Centro de Tecnologia, Sala 222, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: vilela@ufrgs.br

I INTRODUÇÃO

Durante o lingotamento contínuo, o controle da vazão de aço do distribuidor para o molde pode ser feito por dois tipos de controladores: válvula gaveta e válvula tampão. Em ambos os casos, é frequente o acúmulo de inclusões nas regiões de estrangulamento do escoamento, causando a interrupção do vazamento ou dificuldades em manter a velocidade de lingotamento. Este fenômeno é conhecido como *cloggin*,⁽¹⁾ e pode ser considerado um dos mais danosos na operação do lingotamento contínuo.⁽²⁾

Vários autores buscaram entender quais são os mecanismos responsáveis por esse fenômeno. Singh⁽³⁾ realizou estudos em uma planta piloto, utilizando aço com uma elevada quantidade de inclusões para amplificar a ocorrência de *clogging*. Observou que as inclusões localizadas na região próxima à camada limite possuem baixa velocidade e, com isso, têm maior tendência em aderir às paredes da válvula.

Wilson et al.⁽⁴⁾ realizaram testes em planta piloto e por meio de modelagem numérica computacional, para caracterizar o escoamento na região da válvula. Concluiu-se que, para inclusões com diâmetro acima de 36 μm , o principal mecanismo, que faz com que as inclusões migrem até a parede da válvula, é a força centrípeta, que age sobre elas na região onde ocorre o estrangulamento do escoamento. Para inclusões com diâmetro abaixo de 36 μm , a causa primária da deposição seria a turbulência, que ocorre devido ao estrangulamento do escoamento na entrada do canal.

Dawson⁽⁵⁾ realizou estudos em um modelo físico com água para buscar a causa do acúmulo de inclusões na entrada do canal, por meio da injeção de bolhas de hidrogênio visando visualizar e avaliar o comportamento do escoamento. Utilizou diversas configurações, variando tanto a geometria quanto a inclinação da válvula. Na segunda parte do trabalho, ele localizou as regiões preferenciais de deposição por meio de testes em uma planta piloto. Fazendo uma comparação entre os dois experimentos, concluiu que as regiões onde ocorre uma estagnação do escoamento ou descolamento da camada limite são mais favoráveis ao acúmulo de inclusões.

Ressalta-se que, nos trabalhos descritos anteriormente, a geometria das sedes de válvulas possuíam cantos vivos e não havia a utilização de tampão para controle de vazão. Na prática atual, o *design* desses equipamentos é realizado eliminando os cantos vivos e com a presença de tampões.⁽⁶⁻⁹⁾

Uma análise do escoamento para uma geometria com cantos arredondados foi realizada por Klostermann, Chaves e Schwarze.⁽⁷⁾ Nesse estudo são comparados os escoamentos monofásico (água) e bifásico (água-ar) calculado por meio de modelagem numérica com resultados de um modelo físico. Na primeira parte do trabalho, o

objetivo foi avaliar o comportamento da água na região da ponta do tampão e na região de saída da válvula submersa. Na segunda parte, avaliou-se o comportamento do gás no escoamento quando injetado pelo bico do tampão.

Contini et al.⁽⁹⁾ buscaram quantificar a deposição por meio de um modelo algébrico para uma geometria similar à aplicada no trabalho de Klostermann, Chaves e Schwarze.⁽⁷⁾ Os resultados mostram que quanto mais aberta estiver a válvula, menor é a deposição nas regiões do colo e da ponta do tampão.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é a caracterização do escoamento na região da válvula tampão e da válvula submersa para diferentes aberturas de tampão usando solução numérica do escoamento do aço. Para prever as regiões mais prováveis de deposição é aplicada uma modelagem lagrangeana, na qual é possível calcular a trajetória da partícula dentro do domínio e quantificar o número de inclusões depositadas.

2 METODOLOGIA

A simulação do escoamento em um distribuidor, incluindo detalhes da região da válvula tampão e submersa, tornaria o modelo extremamente pesado do ponto de vista computacional. Além do que, cada distribuidor apresenta características geométricas e de escoamento próprias, variando tamanho, número de veios e vazões de operação. Para contornar esse problema, optou-se por construir um modelo que representasse a região de interesse e que pudesse ser usado para um estudo comparativo entre diferentes condições operacionais. Foi construída uma geometria tridimensional de um quarto da região da válvula tampão e da válvula submersa, assumindo a existência de dois planos de simetria, conforme apresentado na Figura 1a.

A discretização foi feita utilizando uma malha hexaédrica de aproximadamente 118 mil nós. A distribuição dos nós foi realizada de modo a priorizar a região de estrangulamento, a ponta do tampão e a camada limite, conforme apresenta a Figura 1b. Segundo Bannenberg⁽¹⁰⁾, as regiões mais prováveis para ocorrência da deposição de inclusões são indicadas na Figura 1c. O desenvolvimento da malha e a solução do escoamento foi realizada utilizando o pacote comercial Ansys CFX 11.0.

Considerou-se também que a maior parte do escoamento na região analisada é descendente, ou seja, o aço entra no domínio somente pela parte superior da geometria. Sabe-se que, na prática, dependendo da localização do veio, o escoamento poderia vir de diferentes regiões. Foram simuladas três situações de escoamentos distintas, conforme apresentado na Tabela 1.

As alturas do tampão foram escolhidas de modo que a razão entre a área mínima de passagem e a seção transversal da válvula submersa fossem, respectivamente, $A_v/A_t = 1,0, 0,6$ e $0,3$, conforme proposto por Contini et al.⁽⁹⁾

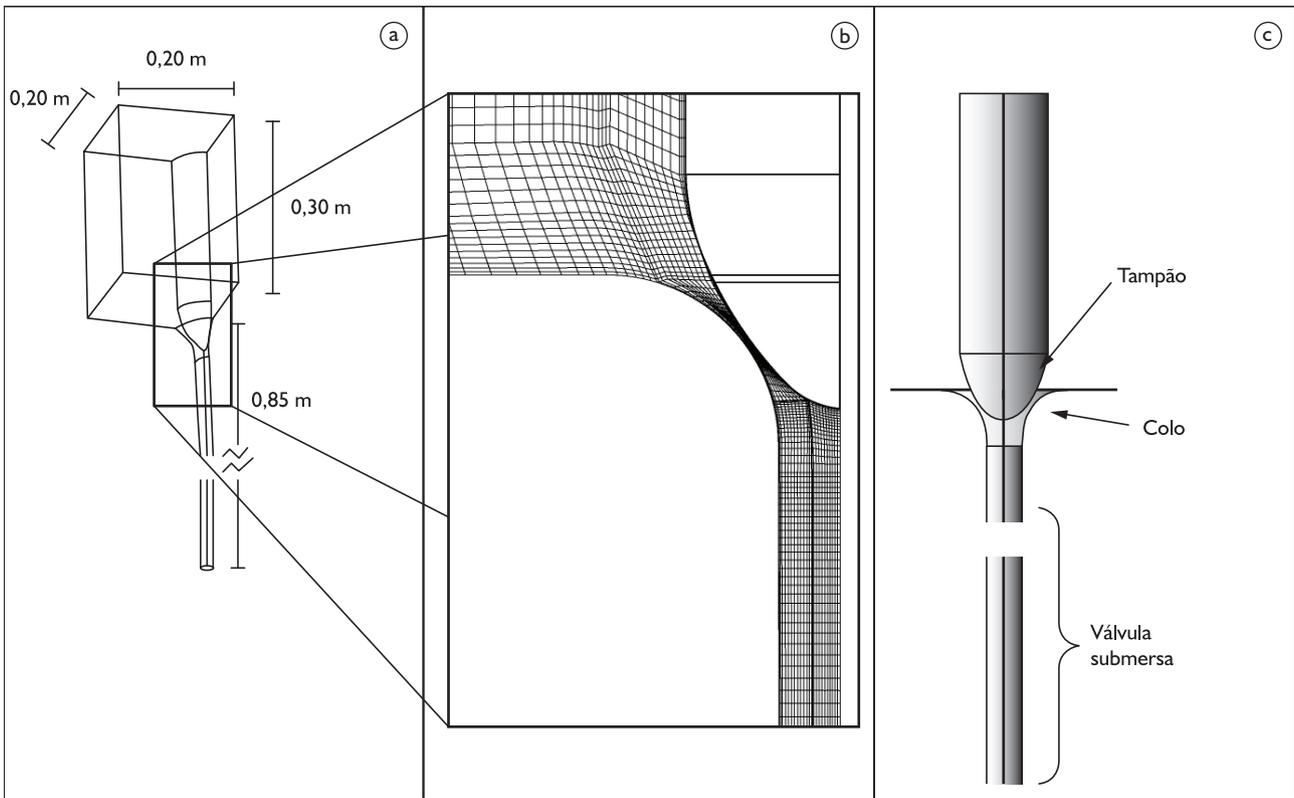


Figura 1. a) Geometria de um quarto da válvula tampão e da válvula submersa; b) Foco da malha computacional no plano de simetria; c) Regiões de interesse do escoamento.

Tabela 1. Condições simuladas

| | | | |
|------------------------------------|------|------|------|
| A_v/A_t | 1,0 | 0,6 | 0,3 |
| Altura do tampão [mm] | 11,3 | 6,8 | 3,3 |
| Velocidade de lingotamento [m/min] | 2,1 | 2,07 | 1,76 |

Depois que o escoamento atingiu o regime permanente, injetaram-se 40.000 inclusões sólidas de alumina com 10 μm de diâmetro, com o objetivo de avaliar seu comportamento no escoamento e prever as regiões preferenciais de deposição.

2.1 Escoamento Monofásico

O modelo de escoamento monofásico considera que o escoamento é incompressível, isotérmico, turbulento e estacionário. As equações de conservação de movimento e da massa são dadas pelas Equações 1 e 2:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Para a modelagem da turbulência utilizou-se o modelo *Shear Stress Transport* (SST), mais indicado para simular escoamentos com gradiente de pressão adverso, em regiões próximas à camada limite.⁽¹¹⁾

2.2 Modelo Lagrangeano de Partículas

É empregado o modelo lagrangeano para representar as inclusões de alumina que estão presentes no aço. Nele, para cada partícula é feito um balanço de forças a cada instante de tempo, conforme apresentado na Equação 3:

$$m_{\text{part}} \frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{F}_{\text{arrasto}} + \bar{F}_{\text{empuxo}} + \bar{F}_{\text{Disp.turb.}} + \bar{F}_{\text{massa virtual}} + \bar{F}_{\text{grad.pressão}} \quad (3)$$

Por meio dessa abordagem é possível visualizar o comportamento das inclusões dentro do domínio. Neste modelo, a deposição das inclusões ocorre quando as partículas tocam a parede. No final da simulação realiza-se a contagem das inclusões que se depositaram em cada região da válvula. Mais detalhes da metodologia podem ser vistos no manual do software.⁽¹²⁾

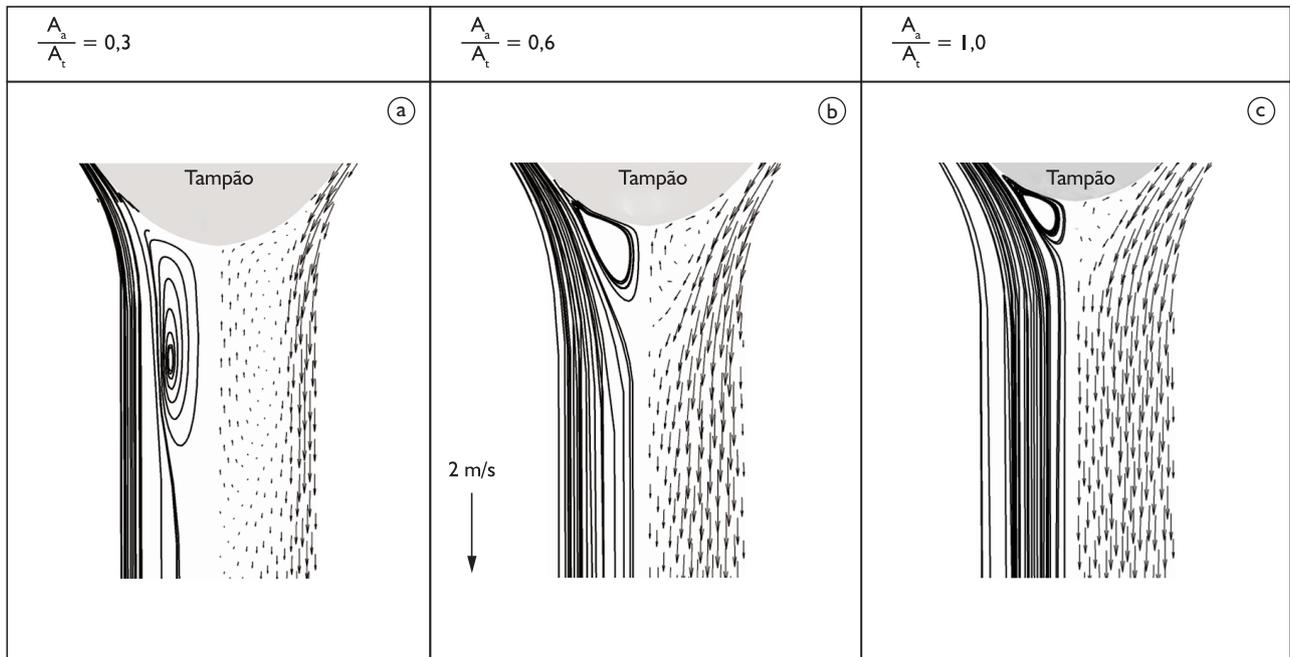


Figura 2. Campo de velocidade e linhas de corrente do escoamento para o caso $A_a/A_t = 0,3, 0,6$ e $1,0$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Optou-se por analisar o escoamento através de linhas de corrente e vetores de velocidade, embora uma análise da dissipação da energia cinética de turbulência e dos mapas de pressão também pudesse ser empregada para tal. A ampliação dessa análise ainda é objetivo de outros artigos.

A Figura 2 mostra um corte paralelo ao eixo de simetria para diferentes alturas da válvula tampão. Na Figura 2a, pode-se observar o comportamento do escoamento na ponta do tampão para a válvula com uma abertura de $A_a/A_t = 0,3$. Nessa região ocorre o descolamento da camada limite e, conseqüentemente, uma recirculação na ponta do tampão, formando uma região de baixa velocidade. Colocando o tampão na posição $A_a/A_t = 0,6$ e $1,0$ conforme as Figuras 2b,c, pode-se observar que a recirculação vai ficando menor à medida que se eleva o tampão. Isso se deve ao fato de que com o tampão mais elevado a velocidade de passagem do aço através da válvula é menor, implicando numa menor queda de pressão na ponta do tampão. Esse descolamento da camada limite e a baixa velocidade são regiões favoráveis a deposição de inclusões, segundo Dawson.⁽⁵⁾

A Figura 3 ilustra a trajetória de algumas inclusões de alumina que se depositaram na ponta do tampão, para o caso $A_a/A_t = 0,3$. Pode-se observar que as trajetórias têm uma característica laminar após entrar no domínio. No entanto, ao passar pela região de estrangulamento, a trajetória das inclusões torna-se praticamente aleatória como pode ser visto no detalhe da Figura 3. Isso se deve ao fato de que, quando as inclusões entram no domínio, a velocidade do aço é baixa e o escoamento pode ser

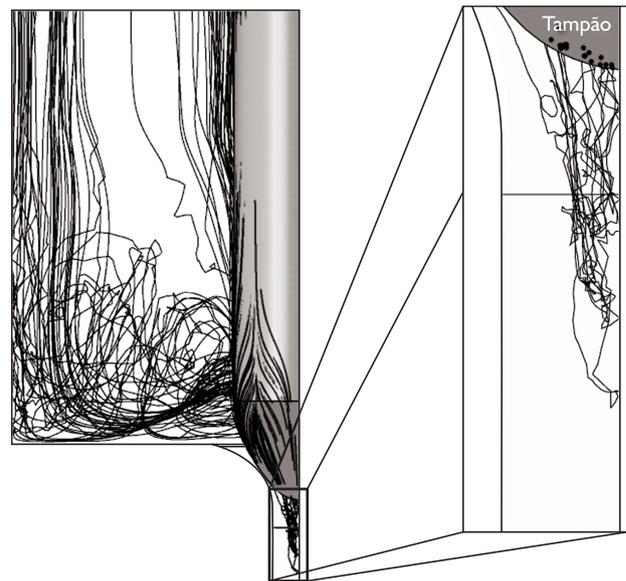


Figura 3. Linha de trajeto de algumas inclusões de alumina que se depositaram na ponta do tampão para o caso $A_a/A_t = 0,3$.

considerado como laminar. À medida que se aproxima da válvula, a velocidade do aço aumenta devido ao estrangulamento e, com isso, o escoamento torna-se turbulento. A elevada turbulência da região pode ser vista como um dos fatores que contribui para o aumento do *clogging*, pois promove o aumento das colisões de inclusões com as paredes.

A Figura 4 mostra, considerando o total de inclusões que entram no domínio, o percentual de inclusões depositadas em cada região. Observa-se que, à medida

que a válvula vai sendo aberta, a taxa de deposição vai diminuindo. O colo da válvula foi onde ocorreu uma maior deposição de inclusões, seguido pela válvula submersa e tampão.

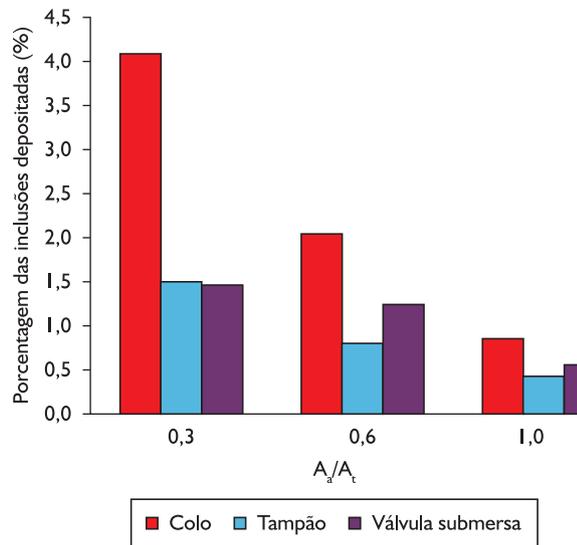


Figura 4. Comparação da porcentagem de inclusões depositadas em função da abertura do tampão A_v/A_t .

4 CONCLUSÕES

O modelo computacional desenvolvido pode auxiliar a prever as condições de *clogging* da válvula-tampão, sendo sensível a alterações da geometria do equipamento. Isto o coloca como uma ferramenta para desenvolvimento de novos *designs* de válvula e de otimização das condições de lingotamento.

Pela utilização do modelo observa-se que, à medida que a válvula vai sendo aberta, menor é a recirculação presente na ponta da válvula tampão e menor a turbulência no gargalo entre colo e tampão. A diminuição

desses dois fenômenos contribui para que a deposição de inclusões se reduza em todas as regiões, diminuindo o *clogging*.

Cabe salientar que as trajetórias das inclusões, as linhas de corrente e vetores de velocidade apresentadas nas figuras anteriores são específicas para a situação simulada, podendo não representar uma situação real. Porém, do ponto de vista comparativo, podem ajudar a caracterizar o fenômeno de deposição de inclusões na região da válvula tampão.

A continuação do desenvolvimento do modelo, por meio de validação experimental, simulação de outras geometrias e acoplamento termodinâmico, pode aumentar a confiabilidade da ferramenta, tornando possível considerar parâmetros como composição do aço e variações de velocidade de lingotamento, entre outros.

| Símbolos | Índices |
|-----------|---|
| A | Área [m ²] |
| \vec{F} | Força [N] |
| g | Gravidade [m/s ²] |
| m | Massa [kg] |
| p | Pressão [N/m ²] |
| Q | Fonte de momento [kg/m ² .s ²] |
| u | Velocidade [m/s] |
| x | Posição [m] |
| ρ | Massa específica [kg/m ³] |
| μ | Viscosidade absoluta [N/s.m ²] |
| a | Abertura do tampão |
| i | Comprovante na direção-i |
| j | Comprovante na direção-j |
| t | Área transversal da válvula submersa |

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro de uma bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 RACKERS, K.; THOMAS, B.G. Clogging in continuous casting nozzles. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 78., 1995, Nashville. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 1995. p. 723-34.
- 2 BAI, H.; THOMAS, B.G. Effects of clogging, argon injection and casting conditions on flow rate and air aspiration in submerged entry nozzles. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 83., 2000, Pittsburg, PA. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 2000. p. 183-97.
- 3 SINGH, S.N. Mechanism of alumina buildup in tundish nozzles during continuous casting of aluminum-killed steels. *Metallurgical Transactions*, v. 5, n. 10, p. 2165-78, 1974. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02643930>
- 4 WILSON, F. G. et al. Effect of fluid flow characteristics on nozzle blockage in aluminium-killed steels. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 14, n. 6, p. 296-309, 1987.
- 5 DAWSON, S. Tundish nozzle blockage during the continuous casting of aluminum-killed steel. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 73., 1990, Detroit. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 1990. p. 15-31.

- 6 BOLGER, D. Stopper rod and submerged nozzle design and operation in continuous casting. STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 77., 1994, Chicago. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 1994. p. 531-7.
- 7 KLOSTERMANN, J.; CHAVES, H.; SCHWARZE, R. Investigation of the gas-liquid flow in a stopper rod controlled SEN. *Steel Research International*, v. 78, n. 8, p. 595-601, 2007.
- 8 SILVA JUNIOR, W. G. *Verificação do efeito de injeção de gás através de válvulas submersas multioporos sobre a lingotabilidade e limpeza do aço*. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- 9 CONTINI, A.C.; MORALES, B. B.; TRINDADE, L. B.; VILELA, A. C. F. Estudo do mecanismo de clogging do ponto de vista fluidodinâmico na região da válvula tampão através da ferramenta de CFD. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA INTERNACIONAL, 40., 2009, São Paulo, ABM, 2009.
- 10 BANNENBERG, N. Inclusion modification to prevent nozzle clogging. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 78., 1995, Nashville. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 1995, p. 457-63.
- 11 MENTER, F. R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence model for aerodynamic flows. In: FLUID DYNAMICS, PLASMA DYNAMICS, AND LASERS CONFERENCE, 23., 1993, Orlando, FL. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993. Paper 1993-2906.
- 12 AEA TECHNOLOGY. *CFX-11.0 Solver manual*. Washington, DC, 2007.

Recebido em: 07/01/2011

Aceito em: 17/10/2011