



ESTUDO DO FENÔMENO DE *CLOGGING* NA REGIÃO DA VÁLVULA TAMPÃO POR MEIO DA FERRAMENTA DE CFD¹

André Carlos Contin²
Bayard Beling Morales³
Leonardo Barboza Trindade⁴
Antônio Cezar Faria Vilela⁵

Resumo

No lingotamento contínuo o fenômeno de *clogging* é um problema ainda a ser resolvido e pouco se sabe a respeito da fluidodinâmica e sua relação com a deposição de inclusões. Este trabalho pretende compreender melhor o mecanismo de deposição de inclusões de alumina empregando 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 válvula. A solução do escoamento e o estudo da deposição de inclusões foi implementada usando uma formulação euleriana e o modelo lagrangeano, respectivamente. Foram avaliadas diferentes aberturas do tampão para visualizar o comportamento do aço na região da válvula e relacioná-lo a taxa de deposição de aluminas. Conseguiu-se observar que ocorre uma recirculação na ponta do tampão e ela está relacionada com a abertura da válvula. Observou-se que quanto mais elevada estiver a válvula tampão menor 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

During continuous casting the clogging phenomenon is a problem about which there is still little knowledge, mainly concerning its fluid-dynamic relation to inclusions deposition. The purpose of this study is to enhance the understanding of the inclusions deposition mechanism, employing a CFD model to describe steel flow in a stopper rod. A 3D geometry of the nozzle region was built. The results were obtained using an Euler approach and the Lagrangean to solve the flow and the inclusions deposition, respectively. Different stopper rod openings were evaluated in order to visualize the steel flow through the nozzle and compare the alumina deposition rate. The results show that there is a relation between the stopper rod openings and the recirculation that occurs in the stopper rod tip. It was observed that larger stopper rod openings lower the inclusions deposition rate.

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

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

² Físico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS.

³ Físico, Mestre em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS.

⁴ Físico, Dr. Eng. Metalúrgica – Diretor Geral – Science, Technology & Engineering – STE.

⁵ Eng. Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID.



1 INTRODUÇÃO

Na etapa de lingotamento contínuo, o controle do fluxo de aço do distribuidor para o molde pode ser feito por dois tipos de controladores: válvula gaveta e válvula tampão. Em ambos, é freqüente o acúmulo de inclusões nas regiões de estrangulamento do escoamento, causando a interrupção do vazamento ou dificuldades em manter a velocidade de lingotamento⁽¹⁾. Este fenômeno é conhecido como *clogging*,⁽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*. Ele observou que as inclusões localizadas na região próxima à camada limite possuem baixa velocidade e com isso têm tendência a ficarem aderidas às paredes da válvula.

Gelata⁽⁴⁾ propôs um modelo baseado na trajetória individual das inclusões. Contudo, ao avaliar os resultados da sua modelagem, o próprio autor conclui que o mecanismo de deposição proposto não é fisicamente aceitável.

Wilson *et al.*⁽⁵⁾ realizaram testes em planta piloto e por meio de modelagem numérica computacional para caracterizar o escoamento na região da válvula. Foi concluído 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⁽⁶⁾ realizou estudos em um modelo físico com água para buscar a causa do acúmulo de inclusões na entrada do canal. Através da injeção de bolhas de hidrogênio, foi possível visualizar e avaliar o comportamento do escoamento. Foram utilizadas 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, ele concluiu que nas regiões onde ocorre uma estagnação do escoamento ou descolamento da camada limite são mais favoráveis ao acúmulo de inclusões.

Dos trabalhos descritos anteriormente, nenhum considera o efeito do tampão no escoamento e todos avaliam válvulas com cantos vivos, ao contrário do que já está sendo pesquisado e usado atualmente.⁽⁷⁻¹⁰⁾

Uma análise do escoamento para uma geometria similar a usada neste trabalho foi realizada por Klostermann *et al.*⁽⁸⁾ Foi estudado o escoamento monofásico (água) e bifásico (água-ar) através da modelagem numérica do escoamento em 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.*,⁽¹⁰⁾ buscaram quantificar a deposição através de um modelo algébrico para uma geometria similar a aplicada neste trabalho. O resultado mostrou que quanto mais aberta estiver a válvula, menor é a deposição nas regiões do colo e da ponta do tampão.



O objetivo principal deste trabalho é caracterização do escoamento na região da válvula tampão e da válvula submersa para diferentes aberturas de tampão. Para prever as regiões mais prováveis de deposição é aplicada uma modelagem lagrangeana onde é possível quantificar o número de inclusões e avaliar a sua trajetória dentro do domínio. Toda metodologia aplicada é realizada através de uma modelagem fluidodinâmica computacional.

2 METODOLOGIA

Para a modelagem numérico-computacional foi construída uma geometria tridimensional de um quarto da região da válvula tampão e da válvula submersa - assumindo a simetria do modelo, conforme a Figura 1(a). 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 a Figura 1(b). Segundo Bannenber⁽¹¹⁾ as regiões mais prováveis para ocorrência da deposição de inclusões são indicados na Figura 1(c).

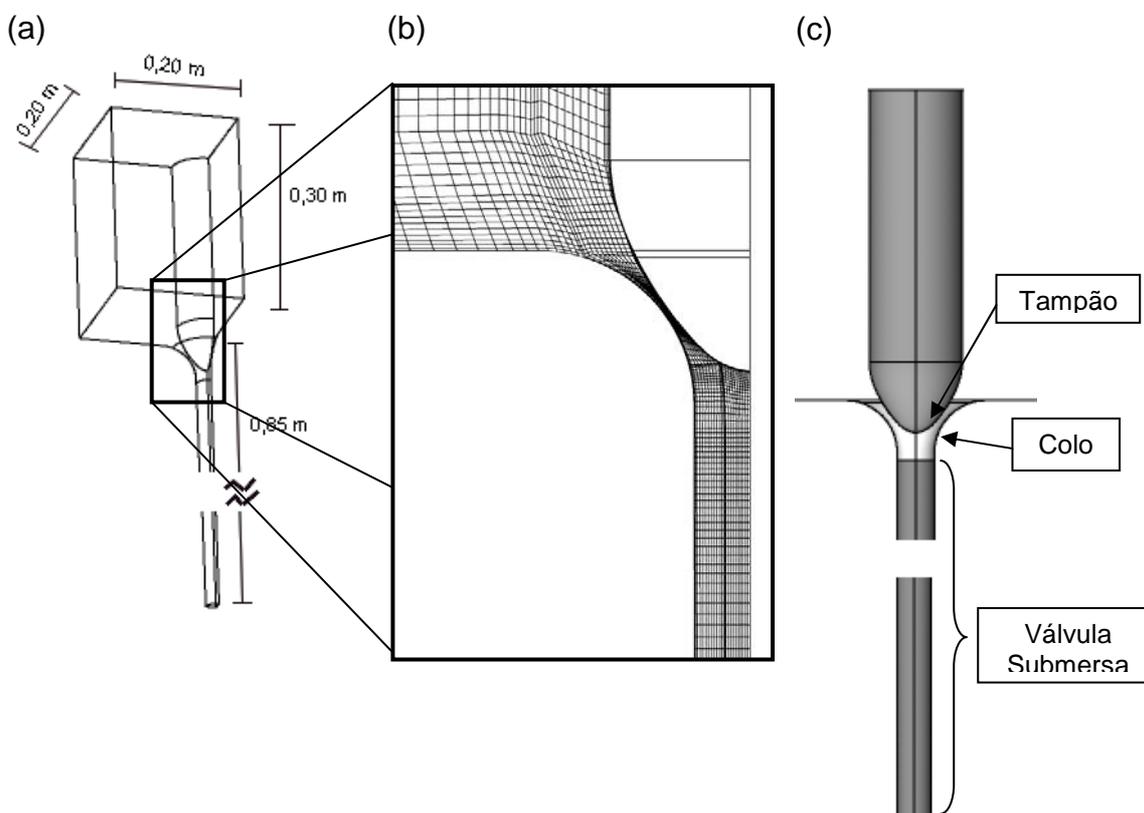


Figura 1 a) Geometria de um quarto da válvula tampão e da válvula submersa b) Malha computacional da região em estudo c) Regiões de interesse do escoamento.

O aço entra no domínio através da parte superior da geometria. Foram simulados três escoamentos, com condições dadas pela tabela 1. Estas alturas foram escolhidas de modo que a razão entre a área mínima de passagem e a seção transversal do válvula submersa fossem, respectivamente, $A_a/A_t=1,0$, $0,6$ e $0,3$, conforme proposto por Contini *et al.*⁽¹⁰⁾



Tabela 1. Condições simuladas

A_a/A_t	1,0	0,6	0,3
Altura de tampão [mm]	11,3	6,8	3,3
Vel. Lingotamento [m/min]	2,1	2,07	1,76

Depois que o escoamento atinge 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.

A implementação e solução do problema foi realizada através do software Ansys CFX 11.0.⁽¹²⁾

2.1 Escoamento Monofásico

Esta modelagem assume que o escoamento é incompressível, isotérmico, turbulento e estacionário. As equações de conservação de movimento e da massa são dadas a seguir:

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

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

O modelo de turbulência usado foi o *Shear Stress Transport* (SST), mais indicado para simular escoamentos com gradiente de pressão adverso em regiões próximas a camada limite.⁽¹³⁾

2.2 Modelo Lagrangeano de Partículas

Para representar as inclusões de alumina que estão presentes no aço foi empregado o modelo lagrangeano. Nele, para cada partícula é feito um balanço de forças a cada instante de tempo, conforme a equação (3):

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

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 do processo é realizada a contagem das inclusões que se depositaram em cada região da válvula e feito um tratamento estatístico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como ilustra a Figura 3 (a), o escoamento para válvula com uma abertura de $A_a/A_t=0,3$ mostra que ocorre uma recirculação na ponta do tampão, formando uma região de baixa velocidade. Este fenômeno poderia explicar a deposição de alumina que ocorre na ponta do tampão. Pode-se notar, também, que não ocorre

recirculação junto ao colo da válvula, ao contrário do que ocorre quando não há a presença da válvula tampão.⁽⁶⁾

Colocando o tampão na posição $A_a/A_t=0,6$ e $1,0$ conforme a figura 3(b) e 3(c), pode-se observar que a recirculação vai ficando menor a medida que eleva-se 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. Analisando a região abaixo da ponta do tampão, nota-se que o escoamento é predominantemente descendente à medida que a abertura aumenta.

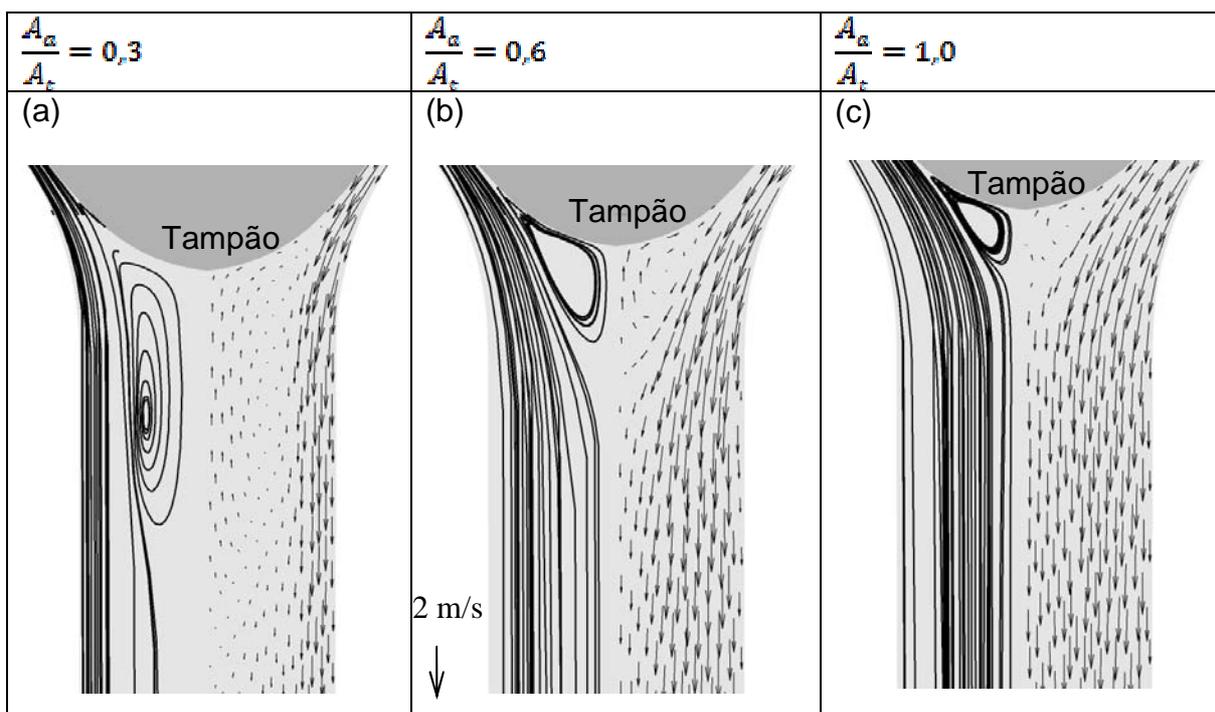


Figura 3 – Campo de velocidade e linhas de corrente do escoamento para o caso $A_a/A_t = 0,3, 0,6$ e $1,0$.

A Figura 4 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 são suaves imediatamente após entrar no domínio. No entanto, ao passar pela região de estrangulamento a trajetória das inclusões tornam-se praticamente aleatórias como pode ser visto no detalhe da Figura 4. Isso se deve ao fato de que quando as inclusões entram no domínio a velocidade do aço é baixa e o escoamento por ser tratado como laminar. À medida que se aproxima da válvula a velocidade do aço aumenta devido ao estrangulamento e com isso o escoamento ganha um caráter turbulento descaracterizando o comportamento laminar das inclusões.

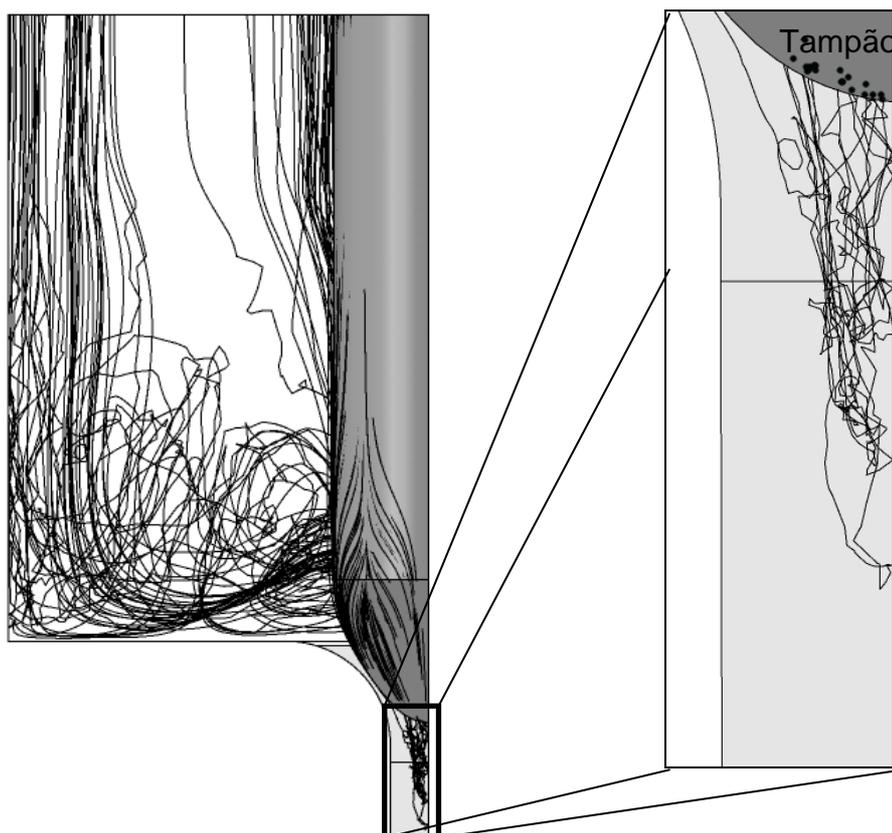


Figura 4 – Linha de trajeto de algumas inclusões de alumina que se depositaram na ponta do tampão para o caso $A_a/A_t=0,3$.

Fazendo a contagem da quantidade de inclusões que se depositaram nas regiões de interesse – colo, tampão e válvula submersa - e convertendo para valores em porcentagem, conforme a Figura 5, observa-se que à medida que a válvula vai sendo aberta, a taxa de deposição vai diminuindo.

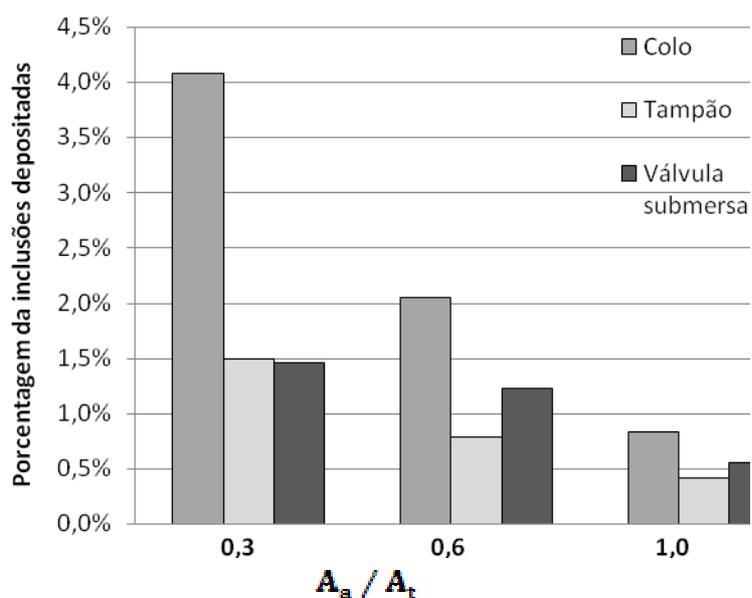


Figura 5 Comparação da porcentagem de inclusões depositadas em função da abertura do tampão A_a/A_t .



Cabe ressaltar que esses resultados são provenientes de um modelo de escoamento e de transporte de partículas e devem ser validados com a prática industrial sempre que possível. Outras variáveis que são inerentes ao modelo ainda são alvos de estudos e fazem parte de uma dissertação de mestrado que se encontra em andamento no Laboratório de Siderurgia da UFRGS⁽¹⁴⁾.

4 CONCLUSÕES

Para as condições deste trabalho, observou-se que à medida que a válvula vai sendo aberta menor é a recirculação presente na ponta da válvula tampão.

O aumento da velocidade que ocorre na região de estrangulamento faz com que a trajetória da inclusões tenha um caráter aleatório.

A diminuição da recirculação conforme é elevada a válvula provoca diminuição da taxa de deposição de inclusões.

Símbolos

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 [$kg/m^2 \cdot s^2$]
u	Velocidade [m/s]
x	Posição [m]
ρ	Densidade [kg/m^3]
μ	Viscosidade absoluta [$N/s \cdot m^2$]

Índices

a	Abertura do tampão
i	Componente na direção- i
j	Componente na direção- j
t	Área transversal do válvula submersa

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro através de uma bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 Rackers, K. and B.G. Thomas. "Clogging in Continuous Casting Nozzles" 78th Steelmaking Conference Proceedings, Nashville, TN, April 2, 1995, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, Vol.78, 1995, pp. 723-734.
- 2 Bai, H. and B.G. Thomas. "Effects of Clogging, Argon Injection and Casting Conditions on Flow Rate and Air Aspiration in Submerged Entry Nozzles" 83RD Steelmaking Conference Proceedings, Pittsburg, PA, March 26-29, 2000), Vol. 83, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 2000, pp. 183-197.
- 3 Singh, S.N. "Mechanism of alumina buildup in tundish nozzles during continuous casting of aluminum-killed steels. Metallurgical Transactions", v. 5, p. 2165-78, 1974.
- 4 Gelata, P.: Proc Modelling of Welding and Casting Processes, ISS of AIME, 1881, pp. 361-372.



- 5 Wilson, F.G.; Heemson, M.J.; Nicholson, A.; Hills, A.W.D. "Effect of fluid flow characteristics on nozzle blockage in aluminium-killed steels. Ironmaking and Steelmaking", v. 14, n. 6, p. 296-309, 1987.
- 6 Dawson, S. "Tundish nozzle blockage during the continuous casting of aluminum-killed steel". In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 1990. [S.n.t.]. p. 15-31.
- 7 D. Bolger, "Stopper Rod And Submerged Nozzle Design And Operation In Continuous Casting". Steelmaking Conference Proceedings, 1994, pp. 531.
- 8 Klostermann, J.; Chaves, H.; Schwarze, R. "Investigation of the gas-liquid flow in a stopper rod controlled SEN". Steel Research Int., v. 78, n. 8, p. 595-601, 2007.
- 9 Silva Junior, W.G.; "Verificação do efeito de injeção de gás através de válvulas submersas multiporos sobre a lingotabilidade e limpeza do aço", Porto Alegre, 2009. Dissertação (mestrado profissional), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica da UFRGS.
- 10 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". Anais do 40º Seminário de Aciaria - Internacional. São Paulo, ABM, 2009.
- 11 BANNENBERG, N. Inclusion modification to prevent nozzle clogging, In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 1995. [S.n.t.]. p. 457-63.
- 12 AEA TECHNOLOGY. CFX-11.0 Solver manual. EUA, 2007.
- 13 Menter, F.R. "Zona two-equation k- ω turbulence model for aerodynamic flows", AIAA Paper 1993-3906, 1993.
- 14 Contini, A.C. "Estudo do fenômeno de *clogging* na válvula de saída do distribuidor através da simulação numérica do escoamento". 2008. Dissertação em andamento (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da UFRGS, Porto Alegre.