

ESTUDO DO MECANISMO DE CLOGGING DO PONTO DE VISTA FLUIDODINÂMICO NA REGIÃO DA VÁLVULA TAMPÃO ATRAVÉS DA FERRAMENTA DE CFD¹

André Carlos Contini²
Bayard Beling Morales³
Leonardo Barboza Trindade⁴
Antônio Cezar Faria Vilela⁵

Resumo

O fenômeno de *clogging* no lingotamento contínuo é um problema ainda a ser resolvido e pouco se sabe a respeito da fluidodinâmica na região de deposição das 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 da deposição de partículas foi implementada usando uma formulação euleriana e o modelo ASM (*Algebraic Slip Model*), respectivamente. Foram avaliadas diferentes aberturas do tampão para visualizar a sua influência na taxa de deposição. Como resultado, conseguiu-se relacionar a taxa de deposição à queda de pressão que ocorre na válvula. Numa segunda etapa foi feita a injeção de gás através do colo por meio de 16 injetores com o objetivo de ver a influência desta nas regiões de mais provável deposição. Observou-se que a injeção de gás contribuiu para a redução da taxa de deposição na região da válvula.

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

INVESTIGATION OF CLOGGING MECHANISM UNDER FLUIDYNAMICS ANALYSIS AT STOPPER ROD EMPLOYING CFD

Abstract

The clogging phenomenon is a very difficult problem to be solved and, at the same time, there is little knowledge about the fluid-dynamic relation to inclusions deposition. The purpose of this study is to help to understand 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 and the results were obtained using an Euler-Euler approach and the ASM (*Algebraic Slip Model*), to solve the flow and the inclusions deposition, respectively. The alumina deposition rate was evaluated for different stopper rod openings. The results show that there is a relation between the deposition rate and pressure drop that occurs in the stopper rod. In the second part of this paper, the gas is injected through 16 points located at the nozzle to evaluate its influence on the aluminum deposition rate. The comparison between numerical results showed that the gas injection has reduced the deposition rate on the stopper rod region.

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

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.

² Físico, mestrando em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS.

³ Físico, mestrando 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

Embora seja um problema antigo e que atinge praticamente todas as aciarias, o fenômeno de *clogging* ainda está longe de ser completamente solucionado. A primeira tentativa para tentar elucidar a causa da deposição foi feita por Singh.⁽¹⁾ Ele afirmou que o fenômeno de *clogging* era causado pela presença de redemoinhos próximos a camada limite que seriam capazes de lançar as partículas em direção às paredes da válvula.

Contudo, Dawson⁽²⁾ fez uma estimativa da velocidade radial desses redemoinhos, e concluiu que essa não seria a origem primária. Ele afirma que a deposição seria essencialmente causada por um descolamento da camada limite. Wilson *et al.*,⁽³⁾ propõem que a deposição seria originada devido às forças centrípetas que agem sobre a partícula na entrada do canal entre o bico do tampão e as paredes da válvula. Porém, Dawson⁽²⁾ rebate essa hipótese afirmando que o tamanho médio das partículas encontradas no aço é menor que o tamanho mínimo necessário para que estas forças sejam capazes de lançar partículas até a parede. Apesar de várias tentativas para tentar explicar o fenômeno, ainda não se sabe ao certo quais são as prováveis causas fluidodinâmicas.

De todos os trabalhos encontrados na literatura, poucos falam da influência do tampão no escoamento, grande parte analisa apenas a entrada do veio sem a presença do tampão. Visto isso, o presente trabalho busca apontar as possíveis causas de *clogging* causados por alumina nas válvulas do tipo tampão, empregadas principalmente no lingotamento contínuo de tarugos.

2 METODOLOGIA

Na modelagem computacional construída foi usada uma geometria tridimensional da região próxima à válvula tampão – Figura 1 (a). A discretização foi feita com uma malha hexaédrica de aproximadamente 727 mil nós. A distribuição dos nós foi realizada de modo a priorizar a região de estrangulamento e abaixo da ponta do tampão, conforme a Figura 1 (b).

O aço ingressa no domínio pela parte superior da geometria com uma fração mássica de inclusões de alumina de 3×10^{-7} (30ppm). Para estimar a vazão de aço através da válvula, utilizou-se a equação de Bernoulli e um coeficiente de perdas de carga para uma expansão brusca, conforme as equações (1), (2) e (3).⁽⁴⁾

$$\frac{\rho u_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 + \Delta p_{perdas} \quad (1)$$

$$\Delta p_{perdas} = FP \rho u_2^2 \quad (2)$$

$$FP = \left(\frac{A_a}{A_t} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

Foram simulados três escoamentos com diferentes alturas de tampão: 11,3 mm, 6,8 mm e 3,3 mm que correspondem a velocidades de lingotamento de 2,1, 2,07, e 1,76 m/min. Estas alturas foram escolhidas de modo que a razão entre a área mínima de passagem e a seção transversal do veio fossem, respectivamente, $A_a/A_t = 1, 0,6$ e $0,3$.

A implementação e solução do problema foram realizadas através do software Ansys CFX 11.⁽⁵⁾

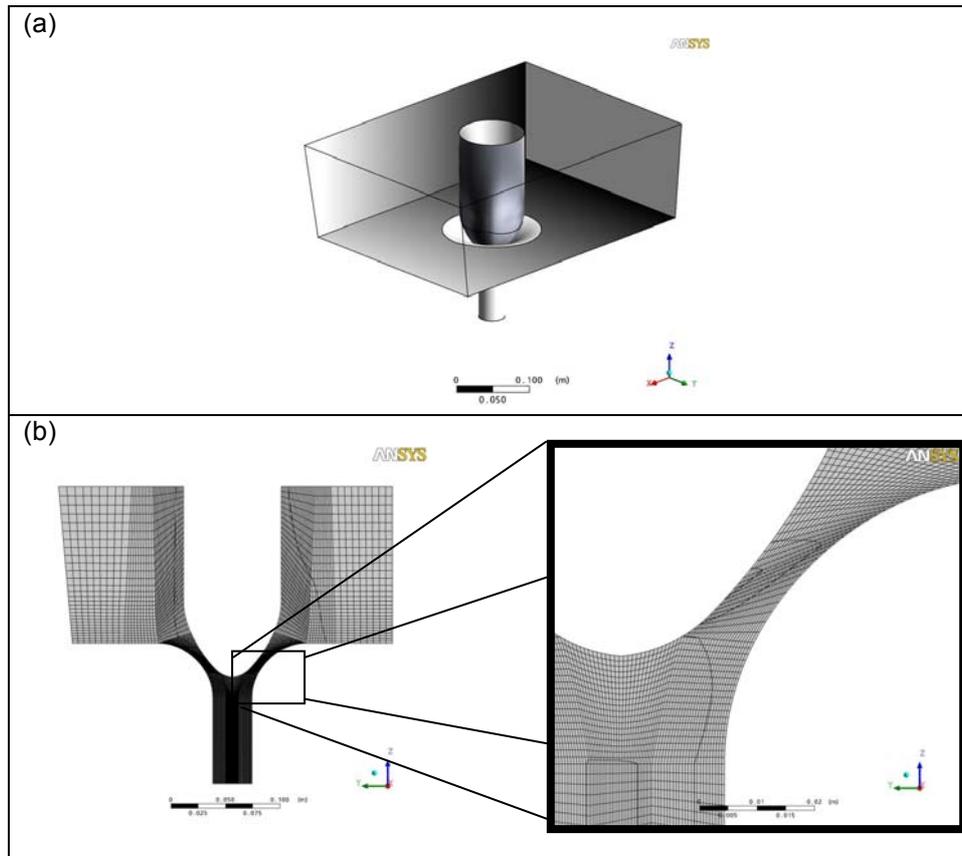


Figura 1. a) Geometria simulada b) Malha computacional

2.1 Algebraic Slip Model (ASM)

Na modelagem Euler-Euler multifásica usual aplicada por Klostermann, Chaves e Schwarze⁽⁶⁾ soluciona-se as equações de Navier-Stokes e continuidade para cada fase. Já no ASM, resolve-se o problema considerando as duas fases (aço-alumina) como sendo um único fluido, conforme as equações (4) e (5):

$$\rho_m \frac{\partial u_m}{\partial t} + \rho_m (u_m \cdot \nabla) u_m = -\nabla p_m + \rho_m g \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (5)$$

No modelo ASM o mecanismo de deposição de alumina nas paredes está relacionado com a velocidade relativa do aço em relação à alumina, comumente chamada de *slip velocity*. Se a componente normal dessa velocidade em direção a parede for maior que zero, ou seja, se a velocidade da alumina for maior que a velocidade do aço em direção a parede, ocorre a deposição.

Para obter essa velocidade utiliza-se uma abordagem algébrica que resulta na seguinte equação (6):⁽⁷⁾

$$\frac{1}{2} \rho_c A_p C_D |\vec{u}_{slip}| \vec{u}_{slip} = V_p (\rho_p - \rho_m) \left[\vec{g} - (\vec{u}_m \cdot \nabla) \vec{u}_m - \frac{\partial \vec{u}_m}{\partial t} \right] \quad (6)$$

Na segunda parte do trabalho foi analisada a influência da injeção de gás (nitrogênio) pelo colo da válvula para o caso $A_a/A_t = 1,0$, com objetivo de avaliar sua influência na taxa de deposição de alumina. A injeção foi feita usando 16 injetores distribuídos uniformemente no colo, de acordo com a Figura 2. A quantidade total de gás injetada pelos 16 injetores em cada simulação foi 0,32, 3,0, 6,0Nl/min.

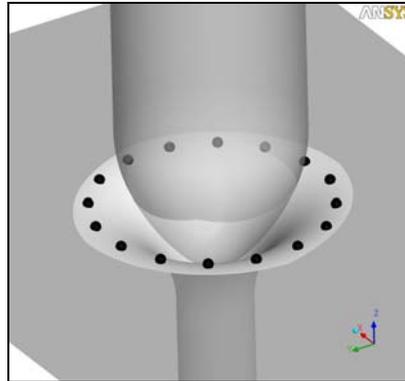


Figura 2 Distribuição dos injetores ao longo da válvula. Os pontos em preto localizados no colo representam a posição dos injetores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como ilustra a Figura 3, o resultado do modelo ASM mostrou que as principais zonas de deposição foram o colo e ponta do tampão. Esse resultado concorda com os dados presentes na literatura por Bannenberg.⁽⁸⁾

Embora a deposição ocorra praticamente em todo o colo e tampão no modelo analisado, algumas regiões são mais favoráveis. Quanto mais levantado estiver o tampão, menor é a taxa de deposição no colo da válvula e no tampão. Observa-se, também, o deslocamento da região preferencial de deposição em direção ao veio.

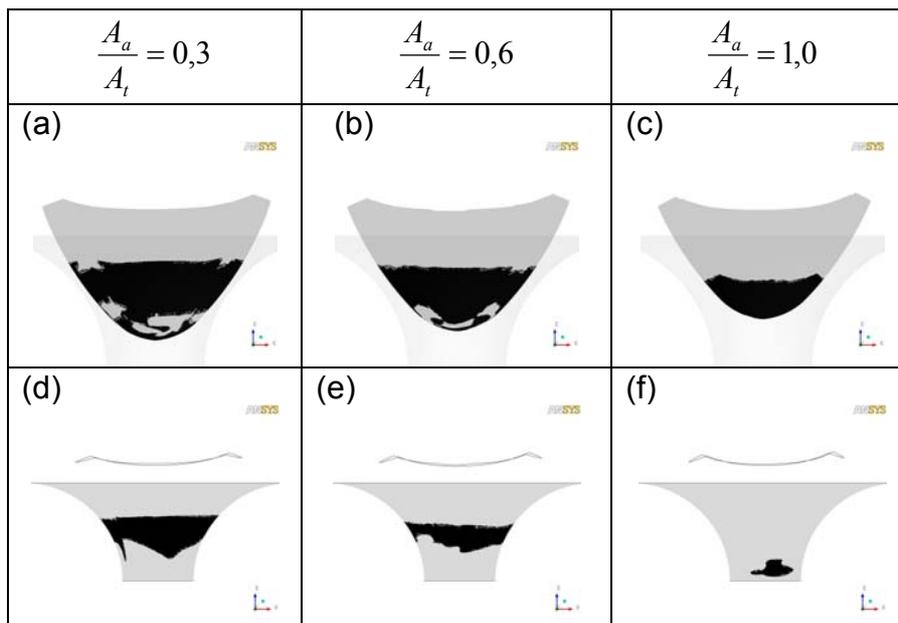


Figura 3 – Comparação das regiões mais propícias à deposição de alumina para diferentes aberturas de tampão. As figuras (a), (b) e (c) representam as regiões preferenciais na ponta do tampão e as

figuras (d), (e) e (f) representam as regiões preferenciais no colo da válvula. A cor preta representa uma taxa de $5 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ou maior de deposição de alumina.

Este fenômeno pode ser relacionado com a variação da pressão ao longo da válvula, como visto na Figura 4. Ela indica que a maior zona de deposição localiza-se na região de menor pressão na válvula. Este abaixamento da pressão ocorre devido a um aumento da velocidade na região de estrangulamento. Esse efeito é também conhecido como fenômeno de Venturi.

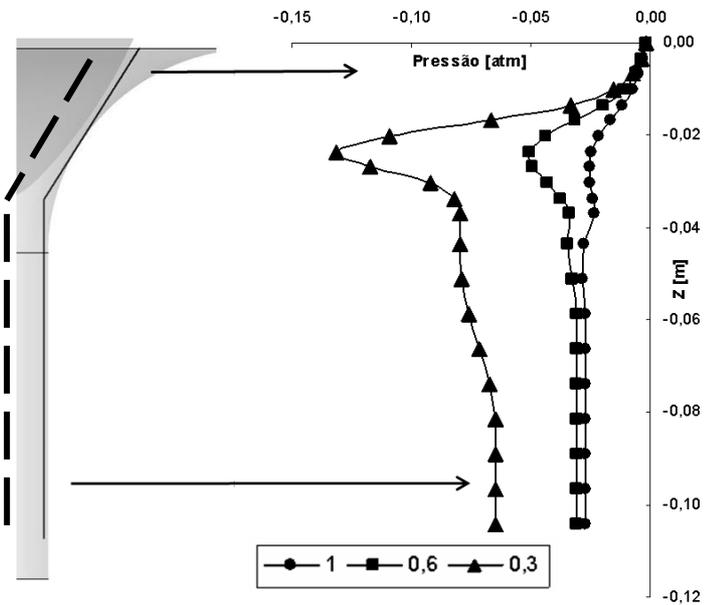


Figura 4 Distribuição da pressão ao longo da linha tracejada mostrada na válvula tampão.

Na Figura 5 são apresentados os valores de taxa de deposição integrados nas áreas das regiões de interesse e normalizados pelo valor máximo, sendo esse obtido na condição de menor abertura, ou seja, $A_a/A_t = 0,3$. À medida que o tampão vai sendo aberto, a taxa de deposição vai diminuindo tanto no tampão quanto no colo da válvula.

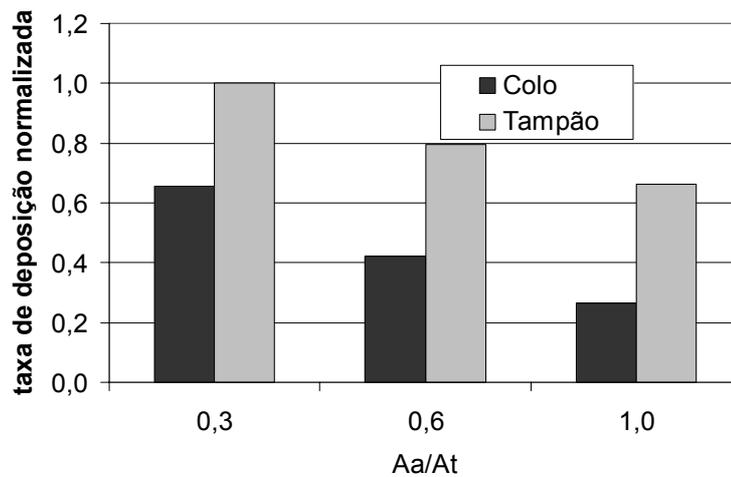


Figura 5 Comparação da taxa de deposição normalizada em função da abertura do tampão.

Na Figura 6, visualiza-se o comportamento do gás injetado pelos 16 injetores. Para o caso de 0,32 NI/min não se observou arraste de gás em direção ao veio. Todo gás injetado seguiu em direção a escória.

Nos casos de 3 NI/min e 6 NI/min pode ser visto que uma parte da fração de gás injetada é arrastada pelo aço criando uma camada proteção na ponta do tampão. Também, pode ser vista nestes casos a proteção feita pelo gás ao longo do veio. Este gás arrastado segue em direção ao molde.

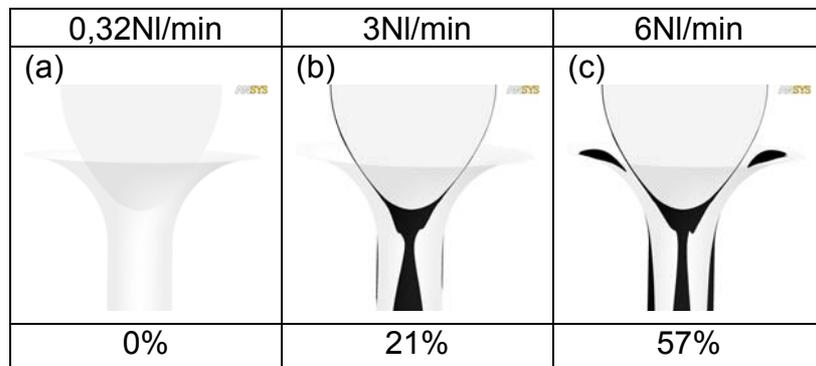


Figura 6 Vista transversal de um corte no centro do tampão e a respectiva porcentagem de gás arrastado para o veio. A cor preta representa uma fração volumétrica de 0,5 ou maior de gás.

Na Figura 7 são mostrados os mapas de deposição para as três condições de vazão de gás simuladas. Cabe lembrar que todas essas condições possuem abertura fixa de $A_a/A_t = 1,0$. No caso (a), a região de deposição permaneceu idêntica ao caso sem injeção de gás. De maneira óbvia este resultado era esperado, pois a abertura do tampão é a mesma e o gás injetado subiu na sua totalidade para escoria, não influenciando o escoamento na região da válvula. Já nos casos (b) e (c), a injeção de gás alterou o resultado das regiões mais favoráveis de deposição de alumina tanto no colo quanto no tampão. Pode se observar que na região do tampão a injeção de gás inibiu completamente as regiões preferenciais. No entanto, na região do colo mostrada nas figuras (d), (e) e (f) o gás influenciou de maneira contrária, aumentando as regiões preferenciais de deposição.

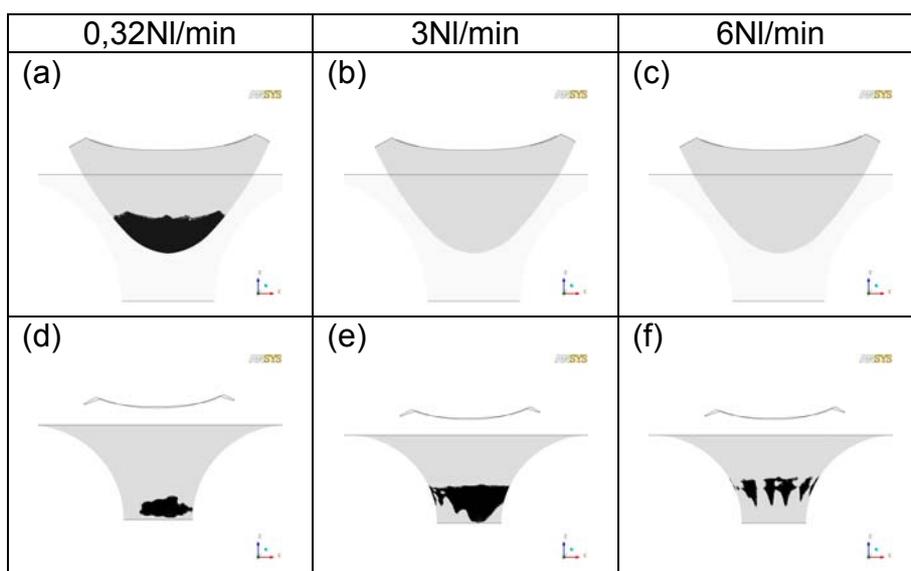


Figura 7 Comparação das regiões mais propícias à deposição de alumina para diferentes injeções de gás. As figuras (a), (b) e (c) representam as regiões mais prováveis de deposição de alumina na

ponta do tampão e as figuras (d), (e) e (f) representam as regiões preferenciais no colo da válvula. A cor preta representa uma taxa de $5 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ou maior deposição de alumina.

A quantificação da taxa de deposição de alumina com a injeção de gás diminuiu consideravelmente na região do tampão, conforme Figura 8. Contudo, na região do colo a taxa de deposição permaneceu praticamente constante em todas as vazões propostas.

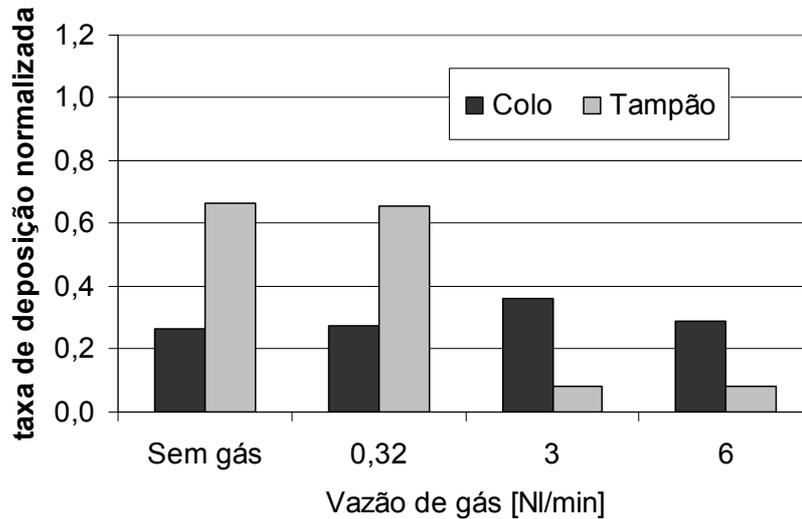


Figura 8 Comparação da taxa de deposição normalizada em função da injeção gás.

Fazendo o somatório da deposição ocorrida no tampão e no colo de todos os casos analisados neste artigo, nota-se que com gás obtém-se as menores taxas de deposição, conforme Figura 9. Atribui-se este resultado ao arraste de gás em direção as regiões de interesse, criando uma camada de proteção e evitando o contato de alumina nas paredes da válvula. Dados na literatura à respeito não foram encontrados para efeitos comparativos.

Cabe ressaltar que esses resultados são provenientes de um modelo de escoamento multifásico 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 alvo de estudos e fazem parte de uma dissertação de mestrado que se encontra em andamento no Laboratório de Siderurgia da UFRGS.⁽⁹⁾

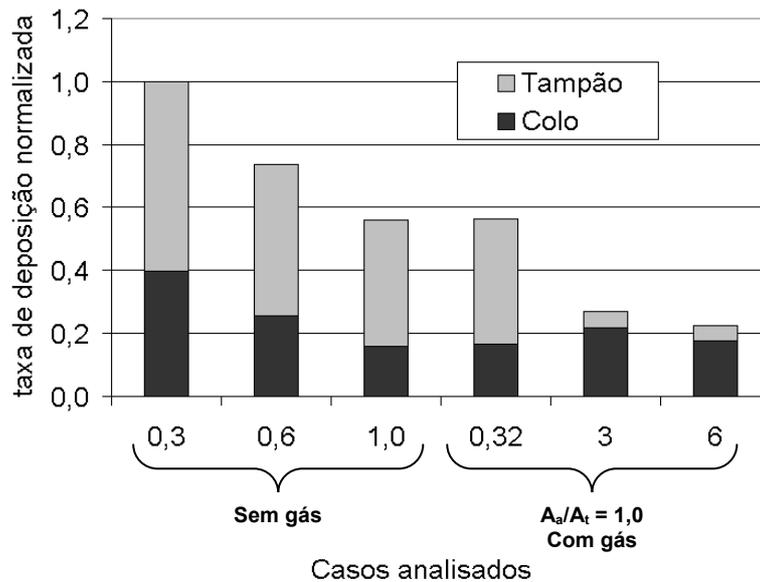


Figura 9 Comparação da taxa de deposição normalizada para todos os casos analisados.

4 CONCLUSÕES

Para as condições deste trabalho, conclui-se que quanto mais elevado estiver o tampão menor a taxa de deposição de inclusões.

Relacionou-se o aumento da deposição com a queda de pressão na válvula.

Com uma injeção de 3 e 6NI/min, observou-se que parte do gás injetado criou uma camada de proteção no tampão reduzindo a deposição. Contudo, na região do colo a injeção de gás não se mostrou eficaz.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Supercomputação Nacional (UFRGS) pela disponibilização de recursos computacionais, ao CNPq pelo apoio financeiro através de uma bolsa de mestrado e a Magnesita pelas informações referentes à válvula multiporos.

Símbolos

ρ	Densidade (kg/m ³)
FP	Coefficiente de perdas de carga
u	Velocidade (m/s)
p	Pressão (pa)
g	Gravidade (m/s ²)
h	Altura (m)
V	Volume (m ³)
C_D	Coefficiente de arrasto
A	Área (m ²)

Índices

a	Maior estrangulamento
t	Veio
m	Mistura
p	Partícula
c	Fase contínua
1	Topo do distribuidor
2	Válvula tampão

REFERÊNCIAS

- 1 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.

- 2 DAWSON, S. Tundish nozzle blockage during the continuous casting of aluminum-killed steel. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 1990. [S.n.t.]. p. 15-31.
- 3 WILSON, F.G.; HEEMSOM, 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.
- 4 WELTY, R.J. *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. 3.ed. EUA: John Wiley & Sons, 1984.
- 5 AEA TECHNOLOGY. CFX-11.0 Solver manual. EUA, 2007.
- 6 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.
- 7 MANNINEN, M.; TAIVASSALO, V.; KALLIO, S. On the mixture model for multiphase flow. EUA: VTT Publications, 1996.
- 8 BANNENBERG, N. Inclusion modification to prevent nozzle clogging, In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 1995. [S.n.t.]. p. 457-63.
- 9 CONTINI, A.C. Estudo do fenômeno de *clogging* na válvula de saída do distribuidor através da simulação numérica do escoamento. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da UFRGS, Porto Alegre.