

SIMULAÇÃO FÍSICA DO ESCOAMENTO DO AÇO NO INTERIOR DO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO COM OU SEM MODIFICADORES DE FLUXO

Elisa Araujo Santos Darsie¹
Felipe das Dores Machado²
Magda Beatriz Galant François³
Antônio Cezar Faria Vilela⁴

RESUMO

Uma das funções do distribuidor de lingotamento contínuo é controlar a limpeza inclusionária dos aços considerados “limpos” (clean steel) proporcionando melhores propriedades mecânicas. Isso pode ser realizado por meio do conhecimento do escoamento do aço líquido no interior do distribuidor visando favorecer a flotação das inclusões. O objetivo deste trabalho é visualizar e avaliar qualitativamente o escoamento do distribuidor por meio do emprego do ensaio de linhas de fluxo em modelagem física sobre diferentes configurações de distribuidor. Dentre os escoamentos estudados, a configuração com tubo longo e com barreiras apresenta o melhor escoamento com ausência de curto-circuito, baixo volume morto, boa distribuição na superfície e maior tempo para flotação de inclusões.

Palavras-chave: Modelagem física, remoção de inclusões, distribuidor.

ABSTRACT

One of the functions of the continuous casting tundish is to control the inclusion removal of the steels considered “clean” allowing better mechanical properties. It can be made by studying the fluid flow inside the tundish with the objective of to improve the flotation of inclusions. The main objective of this work is to analyze and evaluate qualitative the fluid flow of the tundish by physical model of the streamlines in different tundish configurations. Among the studied fluid flows, the configuration with ladle shroud and dams shows the best fluid flow with the absence of short circuit, low dead volume, good surface distribution and longer time of inclusion flotation.

Keyword: Physical model, inclusions remove, tundish.

INTRODUÇÃO

Com a crescente busca do setor industrial por aços com melhores propriedades mecânicas, a indústria de fabricação do aço tem seguido rígidas especificações quanto à quantidade, tamanho e morfologia de inclusões não metálicas presentes nos aços. A

¹ Acadêmica do curso de Engenharia Metalúrgica, LaSid/DEMET/EE/UFRGS

² Engenheiro Químico, Doutorando, LaSid/PPGE3M/EE/UFRGS

³ Professora do curso de Engenharia Química/ULBRA e Pesquisadora LaSid/UFRGS

⁴ Professor - Orientador LaSid/DEMET/PPGE3M/EE/UFRGS (vilela@ufrgs.br)

modificação do escoamento interno do distribuidor de lingotamento contínuo favorecendo a flotação das inclusões é uma maneira bastante eficaz no controle da limpeza do aço.

O distribuidor é um dos equipamentos que torna possível o processo de lingotamento da fabricação de aços para um modo contínuo. Ele é o responsável pela alimentação de aço líquido para os moldes e também atua como pulmão durante a troca de painéis aumentando a produtividade do processo. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos aços, especialmente no caso de aços “limpos” (clean steels), este equipamento também é empregado como um reator metalúrgico capaz de atuar na limpeza das inclusões do aço. Esta função é importante, pois as inclusões podem atuar como concentradoras de tensões e, conseqüentemente, diminuir as propriedades mecânicas dos aços, como resistência mecânica, ductilidade, durabilidade e outros.

Convém ressaltar que o distribuidor é a última etapa do processo de fabricação com volume e tempo de residência suficiente para as inclusões flatarem e serem retiradas do aço. Essas inclusões são intrínsecas ao processo e podem ser originadas em diferentes pontos da aciaria, como por exemplo: a reoxidação do metal líquido por meio da exposição ao ar atmosférico, o processo de desoxidação (adição de agentes desoxidantes – ex. alumínio), arraste de escória da panela para o distribuidor, a emulsificação de escória no distribuidor e vários outros que podem ser encontrados na literatura (SAHAI, 2007).

O estudo do escoamento interno do distribuidor e o fenômeno de remoção de inclusões são essenciais para que se consiga reduzir o nível de inclusões não metálicas no aço e para que haja um melhor cumprimento das funções atuais do distribuidor, o que evita problemas de qualidade de produto (ex. trincas) como problemas operacionais do processo, como o fenômeno conhecido como *clogging*.

Visto que estudos em planta envolvem grandes perigos à segurança do trabalho, uma das ferramentas que podem ser utilizadas nos estudos de escoamento do distribuidor é a modelagem física. Esta ferramenta utiliza modelos construídos em acrílico, que podem ser em escala real ou reduzida e emprega-se água, a temperatura ambiente, para simular aço líquido. Os modelos mantêm relações de similaridade, como por exemplo, similaridade geométrica, dinâmica, cinemática e térmica que permitem a transposição de alguns resultados para os equipamentos industriais.

O objetivo deste trabalho é visualizar e avaliar qualitativamente o escoamento no interior do distribuidor por meio do emprego do ensaio de linhas de fluxo em modelagem física sobre as diferentes configurações no distribuidor propostas a fim de encontrar a configuração mais favorável a remoção de inclusões dentre as propostas.

METODOLOGIA

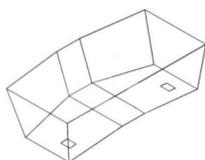
Para a realização dos ensaios foi utilizado um modelo físico, escala 1:1, construído em acrílico e pertencente ao Laboratório de Siderurgia da UFRGS, conforme pode ser visto na Figura 1. Este modelo é igual a um distribuidor real instalado em uma usina siderúrgica. Neste trabalho foram testadas quatro configurações de distribuidor que visam

a modificação do escoamento, são elas: (1) sem tubo longo e sem barreiras; (2) sem tubo longo e com barreiras; (3) com tubo longo e sem barreiras; (4) com tubo longo e com barreiras. As configurações são ilustradas na Figura 2.

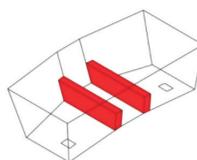
Figura 1: Modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo pertencente ao LaSid/UFRGS.



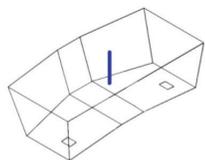
Figura 2: Ilustrações em três dimensões do distribuidor com as configurações estudadas nos ensaios de modelagem física.



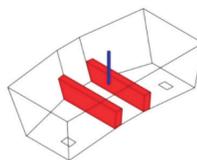
a) Sem tubo longo e sem barreiras



b) Sem tubo longo e com barreiras



c) Com tubo longo e sem barreiras



d) Com tubo longo e com barreiras

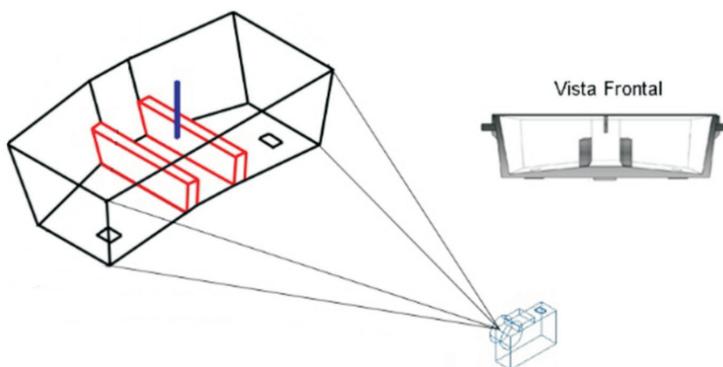
A simulação física do aço líquido utilizando a água à temperatura ambiente baseia-se na viscosidade cinemática da água a 25 °C que é similar à do aço na temperatura de

processamento, aproximadamente 1600 °C e os critérios de similaridade de Reynolds e Froude. Essas considerações já são bem conhecidas pela literatura (WOLLMANN, 1999; MAZUMDAR; GUTHRIE, 1999; FRANÇOIS; BOCK; VILELA, 2006; SAHAI; EMI, 2007; PEREIRA et al., 2007; MACHADO 2014).

O ensaio de linhas de fluxo tem motivação de qualificar o escoamento do distribuidor sob o ponto de vista da remoção de inclusões. Este ensaio permite visualizar as linhas de fluxo que percorrem dentro do distribuidor até que atinjam os veios. Com isso determinam-se áreas onde o líquido demora mais tempo para se misturar (zonas mortas) ou onde permanece menos tempo (curto-circuito).

A metodologia empregada para o ensaio de linhas de fluxo é baseada no trabalho de Wollmann (1999). O ensaio de linhas de fluxo é operado com o distribuidor em regime permanente com velocidade de lingotamento igual a 2,2 m/min. Para a visualização do escoamento é injetado um pulso (3 segundos) de uma solução de flutuação neutra de permanganato de potássio ($KMnO_4$) de aproximadamente 400 ml de volume. A injeção ocorre após o período de estabilização do escoamento (10 minutos) para que não haja interferências ao experimento. O caminho em que o corante percorre no modelo é acompanhado por meio de uma câmera filmadora, posicionada à frente do modelo para captura da vista frontal, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Posicionamento da câmera da vista frontal utilizada no ensaio de linhas de fluxo.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

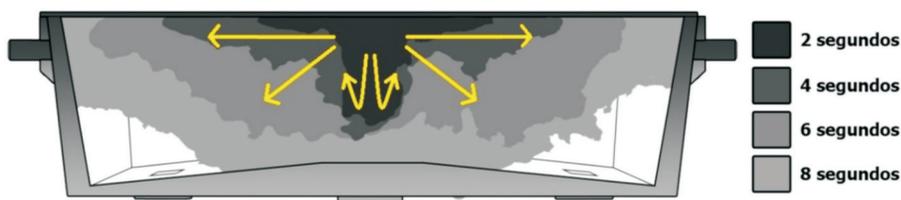
As figuras 4 a 7 apresentam os resultados de linhas de fluxo do teste de permanganato. Nessas, o tempo é mostrado na forma de escalas de cinza. Quanto mais claro o tom de cinza, maior é o tempo de ensaio após a injeção do corante. As flechas amarelas indicam as linhas de fluxos preferenciais e os círculos pontilhados em vermelho indicam as zonas mortas.

Distribuidor sem tubo longo e sem barreiras

Para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Figura 4), o impacto da interface ar/água pode causar uma quebra dos vetores de velocidade, com isso a penetração do jato não é profunda. Todavia, essa configuração ocasiona um movimento ascendente ao escoamento, permitindo assim maior contato do aço com a escória, para só então se dirigir aos veios. Entretanto, o escoamento se divide em dois: um ascendente que se espalha pela superfície e outro descendente que possui direcionamento direto para os veios, chamado como curto-circuito.

Lembrando que o curto-circuito se caracteriza pelo movimento do fluido direcionado diretamente ao veio, com um tempo de residência muito inferior ao tempo de residência do fluido no reator. As consequências disto estão ligadas a um possível aumento no índice de inclusões passantes pelos veios, visto que não há tempo para que as inclusões possam flutarem em direção à escória.

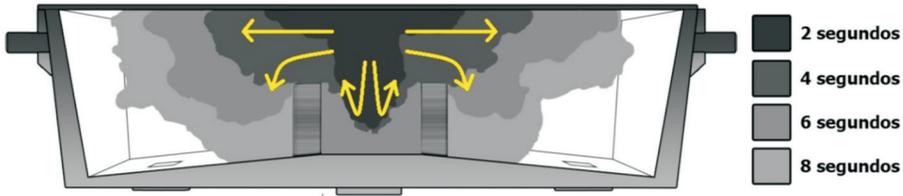
Figura 4: Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista frontal). Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.



Distribuidor sem tubo longo e com barreiras

Quando são empregadas as barreiras e não é utilizado o tubo longo (Figura 5), o escoamento ocorre também de forma ascendente. Diferentemente do escoamento anterior, há uma menor dispersão do escoamento na superfície do distribuidor. Visto que o corante em 8 segundos não atinge as paredes laterais do distribuidor do mesmo modo como visto na Figura 4. Isso pode ser atribuído pela travessia da interface ar/água somada à diminuição de velocidade do fluido na região das barreiras. O escoamento novamente se divide em duas correntes preferenciais: uma ascendente que se espalha pela superfície e outra descendente que se direciona diretamente aos veios caracterizando o curto-circuito. É esperado que o curto-circuito e que a falta de atingir toda a superfície do distribuidor em 8 segundo gere nessa configuração uma diminuição na remoção de inclusões comparada à configuração anterior.

Figura 5: Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista frontal). Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

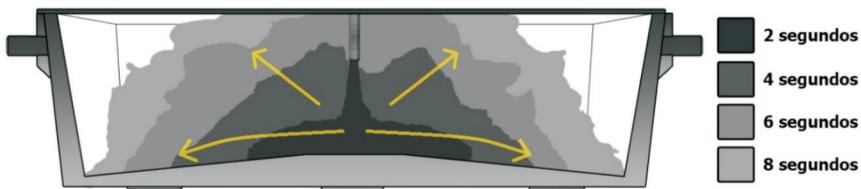


Essa configuração é um simples exemplo de que apesar de haver a presença das barreiras, o curto-circuito permanece no distribuidor. Isso mostra que, quando as barreiras não estão posicionadas no local mais adequado ou não apresentam o correto formato para o distribuidor, elas podem não cumprir a função de eliminar o curto-circuito, como mostrado nos resultados de Jin-gang et al. (2007). Salienta-se que este trabalho não tem como objetivo otimizar o distribuidor.

Distribuidor com tubo longo e sem barreiras

Ao utilizar o tubo longo sem as barreiras (Figura 6), o jato fica imerso no banho metálico e não ocorre a quebra dos vetores de velocidade gerada no choque do jato com a interface ar/água. Desse modo, o aço atinge o fundo do distribuidor mais facilmente. Essa maior velocidade ocasiona um escoamento preferencialmente descendente e que faz com que o aço se dirija diretamente aos veios sem atingir a escória em aproximadamente 4 segundos de ensaio.

Figura 6: Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista frontal). Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

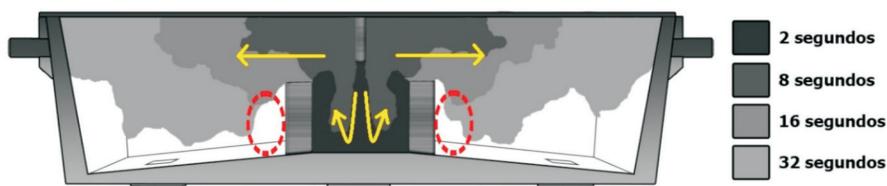


Distribuidor com tubo longo e com barreiras

A configuração com tubo longo e com barreiras (Figura 7) proporciona um escoamento mais próximo do ideal. O escoamento tem característica ascendente, atinge o fundo do distribuidor, entra em contato com toda a escória e então se direciona para os veios. A quebra dos vetores de velocidade gerada pela presença das barreiras associada

ao tubo longo faz com que o escoamento seja muito mais devagar e benéfico à flotação das inclusões. É possível perceber esse comportamento no maior tempo de ensaio (32 segundos) que essa configuração leva para o corante atingir a mesma área que as demais configurações (8 segundos). Também é visualizada uma pequena existência de zonas mortas nas regiões próximas às barreiras.

Figura 7: Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista frontal). Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.



Enquanto que a configuração com barreiras e sem tubo longo é um exemplo de uso incorreto de barreiras no distribuidor, a configuração com tubo longo e com barreiras mostrou que o uso de barreiras nessas condições é favorável ao distribuidor. Assim, como afirmado os autores Jin-gang et al. (2007) e Ray et al. (2011).

CONCLUSÕES

O ensaio em modelos físicos é um recurso muito importante pois permite o estudo do processo de lingotamento contínuo com maior facilidade do que na planta industrial. O ensaio de linhas de fluxo proporciona uma visualização do escoamento interno do distribuidor de lingotamento contínuo o que auxilia na escolha de uma configuração interna mais favorável a remoção de inclusões.

Dentre as quatro configurações analisadas e sob o ponto de vista do ensaio de linhas de fluxo, a configuração com tubo longo e com barreiras é a configuração que apresenta melhores resultados. Os motivos são listados a seguir: escoamento ascendente passando próximo à superfície, ausência de curto-circuito e menor velocidade de escoamento (análise qualitativa).

AGRADECIMENTOS

À Fundação Luiz Englert e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de iniciação científica e mestrado concedidas, respectivamente.

REFERÊNCIAS

FRANÇOIS, M. G.; BOCK, M. L.; VILELA, A. C. F. How to choose a good flow modifier/tundish set in the continuous casting of steel. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 37., 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABM, 2006. p. 388-397.

JIN-GANG, L., et al. Water modeling of optimizing tundish flow field. **Journal of iron and steel research**, v. 14, p. 13-19, 2007.

MACHADO, F. D. **Modelagem física da remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, I. L. R. The physical and mathematical modeling of continuous casting tundish systems. **ISIJ Intern.**, v. 39, n. 6, p. 524-547, 1999.

PEREIRA, J. A. M. et al. Physical and numerical modelling of steel process optimization. **Steel grips**, v. 5., n. 1 , 2007.

SAHAI, Y.; EMI, T. **Tundish technology for clean steel production**. World Scientific Publishing Company, 2007.

RAY, S. K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Modelling performance of four-strand, 12 t, delta shaped continuous casting tundish fitted with different flow modifying arrangements for better steel quality. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 38, p. 173-180, 2011.

WOLMANN, A. M. **Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.