



INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO DO AÇO NO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO E SEU IMPACTO NA LIMPIDEZ DOS AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

José E. Pereira^{1*}, Fabiano A. Barbosa², Estéfano A. Vieira³ e Jetson L. Ferreira⁴

1 – Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, ArcelorMittal Tubarão. Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 526 – Bairro Polo Industrial Tubarão, Distrito de Carapina, Serra, ES, Brasil, CEP: 29160-904. jose-eduardo.pereira@arcelormittal.com

2 – Gerência Geral de Produção de Aço – ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES.

3 – Gerência Geral de Metalurgia, Instituto Federal do Espírito Santo - IFES, Vitória, ES.

4 – Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES.

RESUMO

Após o refino dos aços é muito comum a presença de inclusões não-metálicas no distribuidor no processo de lingotamento contínuo. Nesta etapa, as inclusões podem ser removidas através da escória formada pelo pó de cobertura no distribuidor. As inclusões flutam até a superfície do aço líquido devido a sua menor densidade em relação à do aço líquido e, principalmente, devido às correntes convectivas do fluxo. A eficiência de remoção de inclusões pode mudar devido a alterações do perfil de escoamento do fluxo de aço líquido. Por sua vez, o perfil de escoamento varia em função das condições de processo produtivo e das características físicas do sistema (design interno do distribuidor). Dessa forma, o distribuidor de lingotamento contínuo pode ser considerado como um dos últimos estágios possíveis para o refino do aço líquido, onde as inclusões poderão ser removidas. Este trabalho objetivou a otimização das condições de escoamento no distribuidor visando estabelecer parâmetros ideais para a garantia de elevada limpidez requerida por aços avançados de alta resistência. Utilizando o software Ansys-CFX, simulações numéricas de escoamento multifásico nos distribuidores com diferentes designs interno foram realizadas a fim de se avaliar a influência destas modificações no nível de limpidez dos aços produzidos. Os resultados da simulação numérica foram avaliados comparativamente quanto ao perfil de escoamento, à velocidade do fluido, à existência de zonas mortas, ao risco de curto-circuito, à turbulência, ao impacto na temperatura do aço e à influência na remoção de inclusões do aço (limpidez dos aços). Os resultados das simulações no distribuidor, junto com as variáveis de processo, foram correlacionados de modo a determinar as condições de escoamento mais adequadas para assegurar melhor nível de limpidez dos aços.

Palavras-chave: *Aços avançados de alta resistência, inclusões, limpidez, simulação de fluxo, design interno de distribuidor.*

INTRODUÇÃO

O mercado de aplicação de aço tem exigido requisitos de qualidade cada vez mais elevados, impondo a necessidade constante de melhorias no processo produtivo. Dentre os principais requisitos de qualidade, destaca-se a exigência cada vez maior de limpidez do aço⁽¹⁾. Para a

obtenção de elevada limpidez é necessário além da diminuição do número de inclusões de óxidos não-metálicos e do controle de sua morfologia, composição química, tamanho e distribuição, diminuir também outras impurezas associadas aos sulfetos, carbonitretos, além do fósforo em solução sólida⁽¹⁾.

As inclusões não-metálicas prejudicam a limpidez e afetam as propriedades mecânicas do aço^(1,2). As inclusões grosseiras são mais deletérias às propriedades mecânicas do aço se comparado as inclusões menores, pois um defeito ou falha catastrófica pode ocorrer por uma única inclusão grosseira⁽¹⁾. Logo, para se obter um aço com elevada limpidez é importante tanto a diminuição do número médio de inclusões no aço, quanto evitar a ocorrência de inclusões grosseiras. Diante disso, diversas aplicações de aço apresentam requisito de tamanho máximo de inclusões contidas no aço^(1,2).

Durante o processo de produção do aço, o distribuidor de lingotamento contínuo tem a função de alimentação contínua dos moldes com aço líquido. Embora o aço líquido presente no distribuidor possa conter inclusões não-metálicas, essas podem ser removidas do aço e incorporadas à escória do material de cobertura, seja pela flotação das inclusões, devido à menor densidade quando comparado à do aço líquido, ou pelo perfil de escoamento do fluxo de aço líquido^(3,4,5,6,7). Dessa forma, o distribuidor pode ser considerado como um dos últimos estágios possíveis para o refino do aço líquido, onde as inclusões podem ser removidas^(3,5,6,8). Para isso, diversos estudos e tecnologias vêm sendo feitos para definir o design interno do distribuidor com o desenvolvimento do uso de mobílias refratárias para controle do fluxo, o uso de dispositivos inibidores de turbulência e de pós de cobertura para promover maior captação das inclusões flotadas. Por essa razão, é necessária uma constante melhoria do processo produtivo, a partir da implementação de novas soluções tecnológicas para o controle do perfil de escoamento do aço líquido para a produção de aços com elevada limpidez e garantia da sanidade interna para obtenção das propriedades mecânicas exigidas para sua aplicação^(3,6,7,9,10).

Atualmente, o uso de simulação numérica para definição das condições de escoamento do aço líquido no distribuidor tem se mostrado bastante eficiente seja pela maior flexibilidade e possibilidade de simulação de diferentes cenários, menor tempo de execução e menor custo, quando comparado aos modelos físicos. Tais modelos numéricos foram desenvolvidos e aprimorados por meio de testes laboratoriais via modelo físico e por experiências industriais no processo de produção do aço líquido. Dessa forma, os modelos numéricos atuais apresentam resultados bastante satisfatórios permitindo a direta aplicação industrial de seus resultados, eliminando a necessidade de validação via modelamento físico^(5,6,8,11,12).

Este trabalho tem por objetivo a otimização das condições de escoamento do aço no distribuidor de lingotamento contínuo, visando estabelecer as condições ideais para a garantia dos elevados requisitos de limpidez requerida pelos aços avançados.

MATERIAIS E MÉTODOS

As máquinas de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Tubarão possuem designs interno de distribuidor diferentes. Por consequência, os perfis de escoamento do aço líquido nos distribuidores são diferentes, assim como os resultados de qualidade dos aços produzidos. Os designs utilizados são do tipo convencional com uso de barragens centrais e laterais, ou com inibidor de turbulência, como mostra o comparativo da figura 1.

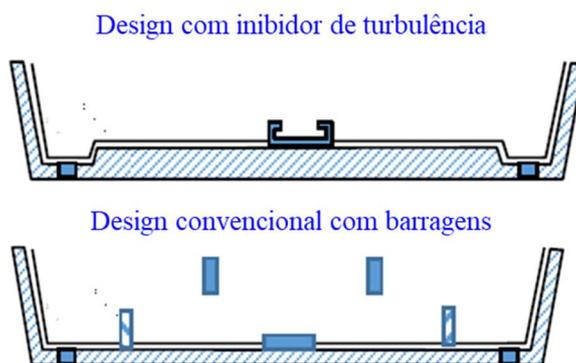


Figura 1 - Comparativo do design interno dos distribuidores utilizados na AM Tubarão.

Neste trabalho, foi realizado o estudo via simulação numérica do escoamento multifásico do aço líquido no distribuidor de lingotamento contínuo utilizados na ArcelorMittal Tubarão, a fim de se avaliar a influência do design interno e o uso de mobílias na limpeza dos aços produzidos. Tais simulações foram realizadas com o uso do software CFX da ANSYS versão 18.1. As simulações foram realizadas para 4 tipos diferentes de designs propostos, sendo: I e IV com inibidores de turbulência, e II e III com barragens. Para as simulações, as variáveis operacionais, tais como: vazão de alimentação e de saída de aço, temperatura do aço líquido e tipo de aço, foram mantidas constantes para fins de estudo comparativo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação numérica mostraram um perfil de escoamento similar entre os designs estudados, apresentando um fluxo ascendente após o impacto com o fundo do distribuidor, sendo direcionado em seguida para a válvula submersa (saída do distribuidor), como exemplificado na figura 2.

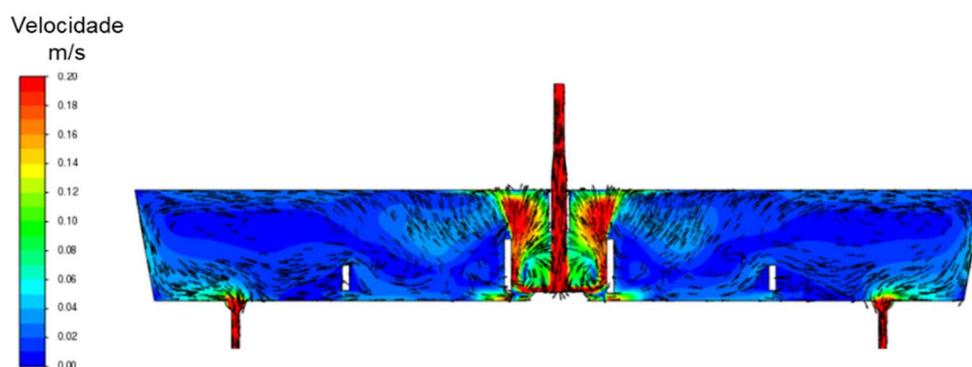


Figura 2: Perfil representativo do escoamento do aço no distribuidor

O design I apresentou a menor velocidade do fluido ascendente na região da válvula longa com valores entre 0,06 e 0,10m/s, já o design III ficou entre 0,08 e 0,16m/s, e os designs II e IV entre 0,10 e 0,18m/s. Nesse caso, o uso do inibidor de turbulência para o caso do design I se mostrou mais eficiente entre os casos estudados, conforme descrito por Zhang⁽¹⁾. A melhor eficiência de redução de turbulência apresentado pelo design I também foi comprovada pela distribuição da velocidade do aço na superfície do distribuidor, com valor médio de 0,08m/s, quando comparado a 0,10m/s para os designs II, III e IV, figura 3.

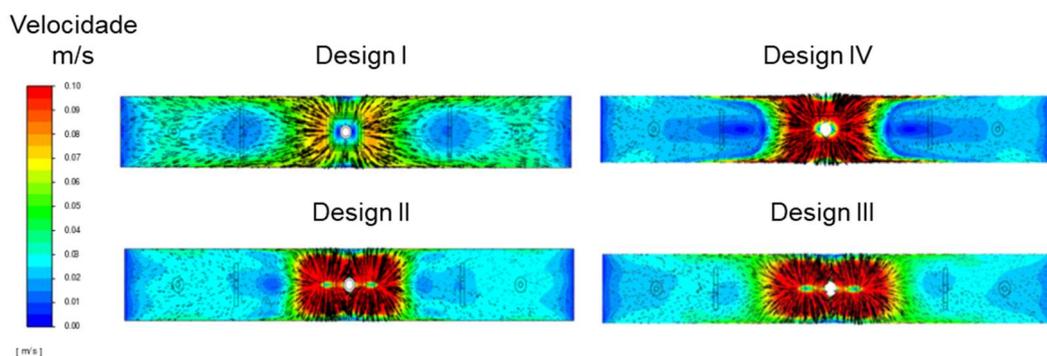


Figura 3: Resultado comparativo da velocidade do fluxo de aço na superfície do distribuidor

Os resultados da simulação para a temperatura do aço na superfície do distribuidor (tabela 1) indicaram uma diferença máxima de 2,0°C entre os designs estudados. A maior temperatura máxima na superfície dos designs II, III e IV em relação a I pode ser relacionada ao maior fluxo ascendente descrito anteriormente, e conforme descrito por Chatterjee⁽¹³⁾. Considerando os gradientes de temperatura do aço na superfície do distribuidor ($\Delta T = T_{\text{máx}} - T_{\text{min}}$) os valores encontrados variaram entre 26,8 e 29,1°C, indicando um baixo risco a formação de zonas estagnadas de solidificação localizada, em conformidade com o encontrado por Miki⁽⁵⁾.

Tabela 1: Valores de temperatura do aço para as configurações de distribuidor simuladas.

Posição	Temperatura média (°C)		Temperatura Máx. (°C)	Temperatura Min. (°C)	Delta Temp. (°C)
	Saída	Menisco	Menisco	Menisco	Menisco
I	1549,5	1546,4	1551,9	1525,1	26,8
II	1549,7	1547,1	1553,9	1524,8	29,1
III	1549,7	1547	1553,5	1524,5	29,0
IV	1549,8	1547	1553,1	1524,7	28,4

As frações de volume pistonado, volume morto e volume de mistura foram calculadas a partir dos resultados de curvas *Residential Time Distribution* (RTD), conforme descrito na literatura^(5,8,9,10), e mostrados na figura 4.

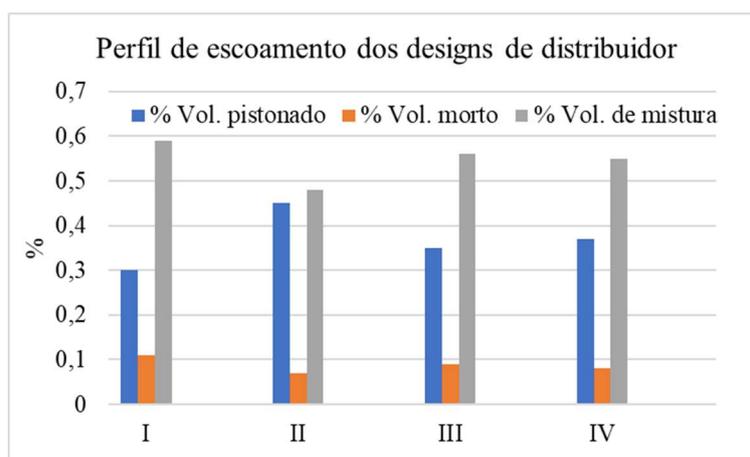


Figura 4: Perfil de escoamento do fluxo de aço no distribuidor

Os resultados mostraram que os designs III e IV apresentaram uma redução de 18 e 27%, respectivamente, na fração de volume morto, em relação ao design I, apresentando menor risco a formação de zonas estagnadas de solidificação, em conformidade com o encontrado na literatura^(8,9,10). Considerando a fração de volume de mistura, os designs III e IV apresentaram um aumento na fração de volume de mistura de 15 e 17%, respectivamente, em relação ao design II. O aumento da fração de volume de mistura para os designs III e IV indicam um aumento no tempo de residência do fluido e partículas no distribuidor. Nesse caso, tem-se um aumento da remoção de inclusões grosseiras devido a maior força de empuxo para flotação, e uma maior probabilidade de colisão entre as inclusões menores originando cluster de maior tamanho e por esse motivo, maior probabilidade de flotação e remoção na superfície do banho, contribuindo para a melhoria da limpidez do aço, conforme descrito por Miki⁽⁵⁾ e Sahai⁽¹⁰⁾.

A fração de inclusões residuais (%FIR), conforme descrito por Chatterjee⁽¹³⁾ e definida pela Equação A, determina a fração de inclusões inseridas no distribuidor que são arrastadas pelo fluxo para a válvula submersa (SEN) e molde. Logo, quanto menor o valor de %FIR, melhor a capacidade do distribuidor na remoção de inclusões, e conseqüentemente, maior limpidez dos aços. Os valores de %FIR são apresentados na tabela 3.

$$\% FIR = \frac{\Sigma N^{\circ} \text{ inclusões detectadas na SEN}}{N^{\circ} \text{ inclusões inseridas no distribuidor}} \times 100 \quad (A)$$

Dentre os designs simulados, o design III apresentou os menores valores de %FIR e, portanto, o melhor resultado potencial de remoção de inclusões, seguido do design IV. De forma geral, todas os 4 designs simulados apresentaram boa capacidade de remoção de inclusões grosseiras (200-500µm), porém o design III foi o que apresentou também a melhor capacidade de remoção de inclusões menores (15-50µm). Conforme descrito por Sahay⁽¹⁰⁾, a eficiência de remoção é maior para inclusões de maior diâmetro, e segundo Mazumdar⁽⁸⁾, as inclusões grosseiras, visto que apresentam maior diâmetro de partícula, são mais susceptíveis ao mecanismo de flotação.

Tabela 3: Resultados de Fração de inclusões residual (%FIR) para os designs simulados.

	15µm	25µm	50µm	100µm	150µm	200µm	500µm
I	51,04%	47,54%	33,25%	6,95%	0,31%	0,00%	0,00%
II	44,08%	42,30%	29,67%	4,39%	0,19%	0,00%	0,00%
III	43,87%	41,71%	27,83%	5,19%	0,00%	0,00%	0,00%
IV	44,55%	37,73%	31,36%	5,00%	0,45%	0,00%	0,00%

CONCLUSÕES

Entre os designs simulados, baseado nos valores calculados de %FIR (Fração de Inclusão Residual), o design III apresentou a melhor eficiência de remoção de inclusões grosseiras e menores, contribuindo para a limpidez do aço, seguido pelo design IV.

Os designs III e IV apresentaram uma redução de cerca de 18 e 27%, respectivamente, na fração de volume morto, em relação ao design I, indicando uma redução no risco a formação de zonas estagnadas de solidificação. Além disso, os designs III e IV apresentaram um aumento de cerca de 15 e 17%, respectivamente, na fração de volume de mistura, em relação ao design II,

indicando um aumento no tempo de residência, favorecendo a flotação de inclusões grosseiras, e a formação de cluster de inclusões menores de maior flotabilidade, contribuindo para a melhoria da limpidez do aço.

Os designs III e IV serão testados em escala industrial para verificação dos resultados obtidos neste trabalho por meio da simulação numérica.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a ArcelorMittal pela disponibilização das informações de processo para o desenvolvimento deste trabalho, e as agências de fomento FAPES, Capes, FINEP e CNPq que apoiam o Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES (PROPEMM).

REFERÊNCIAS

1. ZHANG, L.; THOMAS, B. G. Evaluation and Control of Steel Cleanliness. 85th STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002, pp. 431-452. Disponível em: <http://ccc.illinois.edu>. Acesso em: 07 de outubro de 2021.
2. LI, M.; LIU, Y.; ZHANG, L. Effect of reoxidation on inclusions in steel during calcium treatment. *Metallurgical Research Technology*, v. 116, p. 206-214, 2019.
3. SAHAI, Y.; EMI, T. *Tundish technology for clean steel production*. Singapura: World Scientific, 2008.
4. KOUNTOURIOTIS, Z.; PERICLEOUS, K.; DJAMBAZOV, G.; DOMGIN, J. F.; GARDIN, P. Study of the steel/slag interface instability and the influence of injected gas in the continuous casting of steel. *CFD*, 2011.
5. MIKI, Y.; THOMAS, B. G. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish. *Metallurgical Transactions B*, vol. 30B (4), pp. 639-654, 1999.
6. CLOETE, J. H.; Flow Analysis of a Four-strand Steelmaking Tundish Using Physical and Numerical Modelling. 2014, 134p. Tese (Doutorado em Metalurgia Extrativa) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Stellenbosch, África do Sul.
7. LI, D.; CHATTERJEE, S.; CHATTOPADHYAY, K. Exposed Slag Eye Formation: Air and Argon Convectional Flow and Reoxidization. *AISTech Proceedings*, p. 1507-1516, 2016.
8. MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, R. I. L. The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Tundish Systems. *ISIJ International*, Vol. 39, No. 6, pp. 524-547, 1999.
9. SINGH, S.; KORJA, S.C. Model Study of the Dynamics of Flow of Steel Melt in the Tundish. *ISIJ International*. Vol. 33, No. 12, pp. 1228-1237, 1993.
10. SAHAI, Y.; EMI, T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. *ISIJ International*. Vol. 36, No. 6, pp. 667-672, 1996.
11. CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud Misalignment on Liquid Metal Quality in a Tundish. *ISIJ International*, Vol. 51, No. 5, pp. 759–768, 2011.
12. KUMAR, A.; MAZUMDAR, D.; KORJA, S. C. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal. *ISIJ International*, Vol. 48, No. 1, pp. 38–47, 2008.
13. CHATTERJEE, S.; CHATTOPADHYAY, K. Enhancing Liquid Metal Cleanliness by Controlling Fluid Flow: A Case Study. *The Conference of Metallurgists*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Toronto, 2015.

INFLUENCE OF STEEL FLOW PROFILE IN THE CONTINUOUS CASTING TUNDISH AND THEIR IMPACT ON THE CLEANLINESS OF ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS

ABSTRACT

Non-metallic inclusion is frequently found at steel samples from tundish and mold at continuous casting process. At that step, inclusion can be removed from the steel and be incorporated at the slag of tundish powder. At the tundish, non-metallic inclusions can float to the surface of the liquid steel due to the low density, as compared with steel, and mainly by the convective steel flow. The efficiency to remove inclusions from steel is influenced by the flow profile of liquid steel. The flow profile of liquid steel is influenced by the casting conditions and the tundish design. Therefore, the tundish can be considered as one of the last refining stations during the steelmaking process. This work has aimed to optimize the conditions of the steel flow pattern at tundish to improve the cleanliness for advanced steels. Numerical simulation of the steel flow in tundish were carried out using Ansys-CFX software, for different tundish internal design aiming to evaluate their influence on steel cleanliness. Comparative analysis of the results of the numerical simulation were carried out to evaluate the fluid flow pattern, flow speed, the risks to form dead zones and/or short circuit, the turbulence, the vortexing and their influence on cleanliness. Results of the tundish numerical simulation, including the continuous casting process parameters, were analyzed aiming to define the most appropriate tundish design to cast high cleanliness advanced high strength steels.

Keywords: *Advanced high strength steels, non-metallic inclusions, cleanliness, fluid flow simulation, tundish internal design.*