



Rem: Revista Escola de Minas

versão impressa ISSN 0370-4467

Rem, Rev. Esc. Minas v.54 n.3 Ouro Preto jul./set. 2001

doi: 10.1590/S0370-44672001000300012

Efeitos térmicos e fluido-dinâmicos devidos a um agitador eletromagnético para tarugos

Leonardo Barboza Trindade
Físico Doutorando PPGEM/UFRGS, bolsista do CNPq

Antônio Cezar Faria Vilela
Engenheiro Metalúrgico, Dr-Ing, Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS

Serviços

-  Serviços customizados
-  Artigo em XML
-  Referências do artigo
-  Currículo ScienTI
-  Como citar este artigo
-  Acessos
-  Citado por SciELO
-  Similares em SciELO
-  Tradução automática
-  Enviar este artigo por email

Marco Túlio Menna Barreto de Vilhena
Dr., Professor Titular do DMPA/UFRGS

Rodrigo Belloc Soares
Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Gerente de Desenvolvimento de Produtos e Processos da Gerdau Aços Finos Piratini

Resumo

O uso de agitadores eletromagnéticos (EMS) durante o lingotamento contínuo tornou-se imprescindível para a obtenção de aços de melhor qualidade. Embora os efeitos da agitação durante o processo de solidificação sejam pouco conhecidos do ponto de vista teórico, pode-se estudar esses efeitos sobre o perfil de escoamento antes do aço solidificar.

Esse trabalho tem como objetivo estudar os efeitos térmicos e fluido-dinâmicos produzidos por um agitador rotatório para tarugos. Um modelo resolvido pelo método de elementos finitos foi desenvolvido através do *software Ansys* para resolver o problema magneto-fluido-dinâmico acoplado. Para fins de comparação, foram testados dois valores de corrente no agitador e analisadas as principais diferenças quanto ao escoamento, perfil térmico e fluxo de calor.

Palavras-chaves: agitador eletromagnético, lingotamento contínuo, modelamento numérico do escoamento do aço.

Abstract

The electromagnetic stirring during the continuous casting became indispensable to obtain steel with high quality. Despite the fact that the stirring effects during the solidifying process are not very well known from the theoretical point of view, these effects can be studied on the steel flow.

The aim of this work is to study the magnetic and the fluid dynamic effects due to a rotatory stirrer for billets. A model solved by the finite element method was developed using the Ansys commercial package to solve the coupled magnetic-fluid dynamic problem. To make a comparison simulations with two current values were carried out and the main differences concerning the fluid flow and the thermal profile were analyzed.

Keywords: *electromagnetic stirrer, continuous casting and numerical model of steel flow.*

Metalurgia & Materiais

1. Introdução

O uso de agitadores e freios eletromagnéticos para tarugos e placas tem se mostrado uma ferramenta fundamental para a melhoria da qualidade do aço quando utilizados de maneira adequada. Os agitadores e freios eletromagnéticos possuem objetivos e princípios de funcionamento diferentes e, portanto, devem ser analisados separadamente. Uma boa revisão bibliográfica sobre os princípios básicos e sobre os problemas encontrados, quando do uso de agitadores, pode ser encontrada nos trabalhos de Birat e Choné ⁽¹⁾ e Tzavaras e Brody ⁽²⁾.

Os princípios físicos que justificam o uso do agitador eletromagnético rotatório são relativamente simples. O alto gradiente de temperatura encontrado durante a solidificação do aço é a principal fonte de segregação do soluto e da criação das indesejáveis estruturas colunares de solidificação. O movimento induzido no aço redistribui a temperatura, diminuindo, portanto, os gradientes térmicos. Como consequência, observa-se um aumento da região equiaxial solidificada e também a redistribuição dos solutos. A transição de uma estrutura colunar para uma estrutura equiaxial pode ser explicada através de dois mecanismos. Primeiro, as pontas das dendritas colunares são quebradas pelo mecanismo de arraste ou por refundição. Essas pontas de dendritas são cristais que servirão mais tarde como núcleos de grãos equiaxiais. O líquido pode se tornar levemente resfriado devido às pontas de dendritas frias e, nessas condições, os cristais livres podem começar a crescer. Segundo, o superaquecimento é rapidamente eliminado devido à alta transferência de calor provocada pela agitação.

Os modelos físicos e matemáticos têm sido ferramentas que, de forma combinada, permitem que se faça uma verdadeira varredura sobre o comportamento do escoamento do aço líquido dentro do molde sob efeito dos agitadores eletromagnéticos. Entre os trabalhos que utilizam modelamento numérico para agitadores rotatórios, pode-se citar os realizados por Chang et al. ⁽³⁾, Toledo et al. ⁽⁴⁾, Natajara e El-Kaddah ⁽⁵⁾ e Robiglio et al. ⁽⁶⁾. Alguns autores construíram modelos físicos utilizando mercúrio ou liga de Wood. Entre os que utilizaram mercúrio como fluido de trabalho, pode-se citar os trabalhos realizados por Chang et al. ⁽³⁾, Takeuchi et al ⁽⁷⁾, Dubke, Tacke, Spitzer e Schwerdtfeger ⁽⁸⁾. Modelos que utilizam a liga de Wood foram desenvolvidos por Favre, Kunstreich, Nove, Courths e Korte ⁽⁹⁾, Fujisaki, Nakagawa e Misumi ⁽¹⁰⁾, Kobayashi e Ishimura ⁽¹¹⁾.

Esse trabalho tem como objetivo analisar os efeitos eletromagnéticos e fluido-dinâmicos induzidos no aço, considerando valores de corrente de 340A e 680A no agitador eletromagnético. O modelo já foi validado através de medidas de densidade de fluxo magnético e maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Trindade et al. ⁽¹²⁾. O perfil de escoamento produzido no molde poderá indicar que situações de operação podem causar arraste de escória. Esse estudo será feito através da intensidade das velocidades nessa região. Com um modelo térmico poderá se analisar a distribuição de temperaturas junto às paredes do molde, permitindo ter-se uma idéia dos gradientes de temperatura na casca solidificada. O conhecimento gerado pelo modelo será mais uma ferramenta para se avaliar a eficiência desse equipamento.

2. Modelo numérico

Os fenômenos de eletromagnetismo para problemas relacionados com metais fundidos são regidos pelas equações de Maxwell ⁽¹³⁾, assim como o problema de escoamento do aço é regido pelas equações de Navier-Stokes ⁽¹³⁾.

Esse problema acoplado foi resolvido através do software Ansys 5.6. O Ansys resolve o problema eletromagnético e depois exporta a força de Lorentz para o problema fluido-dinâmico. Para o escoamento foi usado o modelo k-ε de turbulência. Maiores detalhes podem ser obtidos no Ansys Theory Reference ⁽¹⁴⁾. As condições de contorno para o problema de escoamento foram obtidas a partir do trabalho desenvolvido por Huang et al ⁽¹⁵⁾.

Geometria e malha do modelo

A geometria e a malha de elementos finitos do modelo podem ser visualizadas na [Figura 1](#). Pode-se notar as doze bobinas enroladas em torno de um núcleo de ferro ao redor do molde. O ar externo que circunda o modelo foi omitido para que se possa visualizar os detalhes internos do modelo.

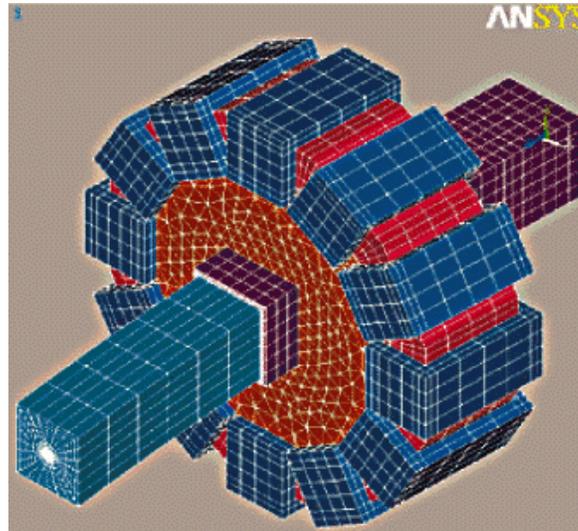


Figura 1 - Geometria e malha do modelo

Condições de contorno

- Velocidade de entrada na válvula submersa: 0,933 m/s.
- Condição de não escorregamento nas paredes e de simetria na superfície do molde (menisco).
- Coeficiente de transferência de calor na superfície: 40 W/m².K.
- Temperatura de entrada na válvula submersa: 1545 °C.
- Temperatura nas paredes do molde: 1500 °C.

Propriedades físicas

- Densidade do aço líquido: 7350 kg/m³.
- Viscosidade absoluta: 0,0062 m²/s.
- Calor específico: 680 J/kg.K.
- Condutividade térmica: 26 W/m.K.
- Permeabilidade magnética relativa do ferro: 1000.
- Permeabilidade magnética relativa do aço, do cobre e do ar: 1.
- Resistividade elétrica do aço: 1,4e-6 Ohm.m.
- Resistividade elétrica do cobre: 3,14e-8 Ohm.m.

3. Resultados

Os resultados serão apresentados na forma de vetores de velocidade, distribuição de temperaturas e fluxo de calor para dois casos em estudo: correntes de 340A e 680A.

Vetores de velocidade

Na [Figura 2](#), é apresentado um plano central ao longo do tarugo com os vetores de velocidade.

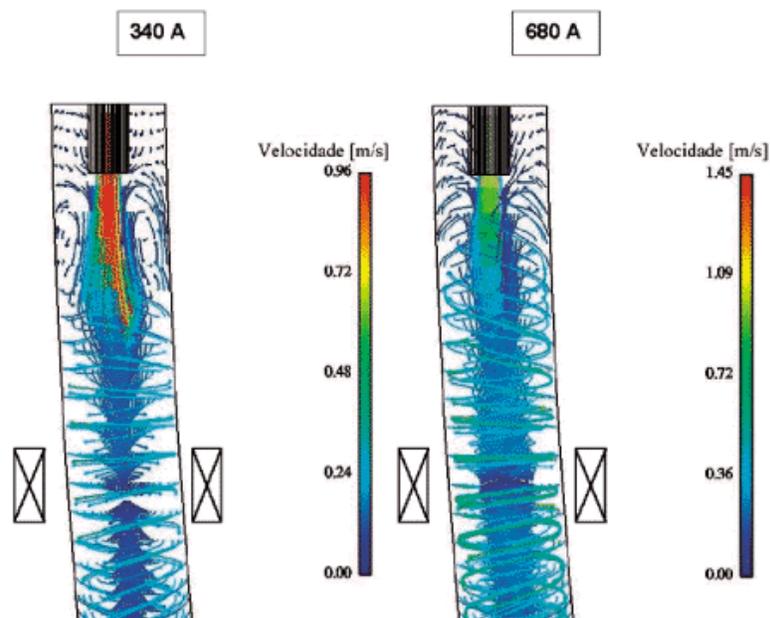


Figura 2 - Vetores de velocidade no plano central.

Observa-se, no plano central, uma diferença significativa entre o escoamento com corrente de 340A e 680A. A duplicação do valor da corrente ocasiona um aumento de velocidade em torno de 1,5 vezes, enquanto que com corrente de 340A a velocidade máxima ocorria na região abaixo da válvula submersa, para a corrente de 680A, a velocidade máxima ocorre na região do agitador. Nota-se, nos dois casos, um movimento ascendente do fluido na região logo abaixo do agitador, devido à baixa pressão ocasionada pelas altas velocidades de rotação. Os retângulos com um "X" indicam a posição do agitador eletromagnético.

A [Figura 3](#) mostra os campos de velocidade na altura do agitador. As velocidades junto às paredes são cerca de 1,5 vezes maiores para a corrente de 680A.

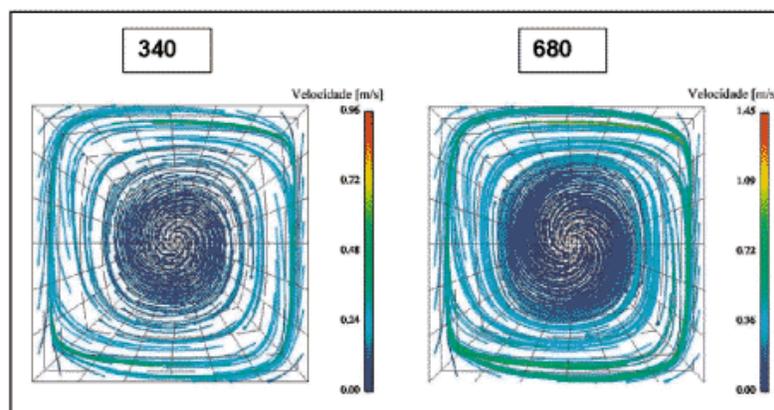


Figura 3 - Campo de velocidades na altura do agitador.

Na [Figura 4](#), estão plotados os vetores de velocidade na altura do menisco. Nessa região, a preocupação está em não agitar excessivamente o menisco, principalmente quando é usado pó para lubrificação do molde. O excesso de agitação pode provocar arraste de escória e, conseqüentemente, o surgimento de inclusões. Alguns autores sugerem o uso de dois agitadores no molde, os chamados Dual-Coils (16) para evitar o arraste de pó e escória do molde.

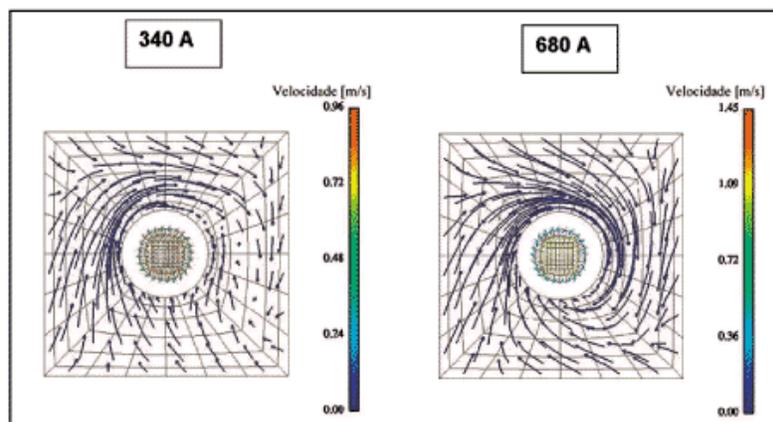


Figura 4 - Vetores de velocidade na região do menisco.

O trabalho desenvolvido por Freitas et al⁽¹⁷⁾ mostra que as velocidades na região de menisco para que ocorra arraste devem ficar em torno de 0,08 m/s. Para os modelos desse trabalho observou-se uma velocidade máxima na região de menisco de 0,054 m/s com o caso com corrente de 340 A e de 0,060 m/s para o caso com corrente de 680 A, ocorrendo um aumento de 1,11 vezes aproximadamente.

Fluxo de calor

A [Figura 5](#) mostra o fluxo de calor ao longo de uma face do tarugo para os dois valores de corrente. Observa-se um aumento de aproximadamente 1.3 vezes no fluxo de calor, quando o valor de corrente é duplicado. Esse resultado já era esperado devido ao aumento de velocidade que gera uma maior transferência de calor por convecção.

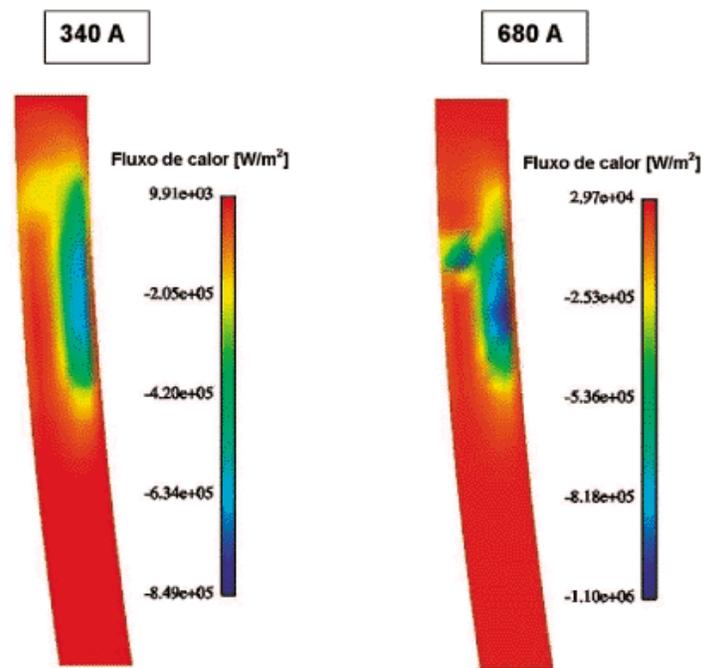


Figura 5 - Fluxo de calor nas paredes do molde.

Temperatura

Como consequência, observa-se uma diminuição da temperatura na altura do agitador. Pela [Figura 6](#), observa-se uma temperatura mais baixa nessa região devido ao aumento do fluxo de calor. Nota-se que a região de coloração verde (1520 °C) é bem menor para a corrente de 680A.

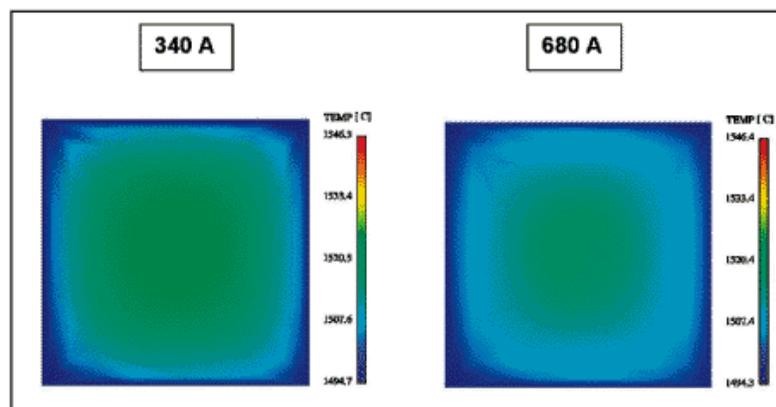


Figura 6 - Perfis de temperatura em °C na região central do agitador.

4. Conclusões

Embora a velocidade tenha aumentado em 1,5 vezes na altura do agitador, na região do menisco, esse aumento foi bem menor, ficando em torno de 1,11 vezes. De acordo com modelos anteriores, esse aumento é considerado insuficiente para provocar arraste de escória, ou seja, com a corrente de 680A se consegue agitar mais o aço sem provocar uma perturbação excessiva da camada de escória.

Observando-se os efeitos térmicos provocados pelo agitador, nota-se um aumento do fluxo de calor nas paredes do molde com o aumento da corrente e conseqüentemente uma diminuição da temperatura na região do agitador.

Como trabalho futuro pretende-se prever o comportamento das inclusões sob o efeito do agitador e verificar qual a relação entre a distribuição de temperatura ao longo da seção do tarugo e o tamanho da região equiaxial.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a valiosa contribuição do professor Ály Flores Filho do Laboratório de Máquinas Elétricas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os autores agradecem aos bolsistas de iniciação científica pela ajuda prestada e ao CNPq, FAPERGS e Gerdau Aços Finos Piratini pelo apoio financeiro e técnico.

Referências Bibliográficas

- (1) BIRAT, J. P., CHONÉ J. Electromagnetic stirring on billet, blomm, and slab continuous casting: state of the art in 1982. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 10, n. 6, p. 269-281, 1983. [[Links](#)]
- (2) TZAVARAS A. A., BRODY H. D. Electromagnetic stirring and continuous casting - achievements, problems, and goals. *Journal of Metals*, p. 31-37, 1984. [[Links](#)]

- (3) CHANG, F. C., HULL, J. R., BEITELMAN, L. Simulation of fluid flow induced by opposing AC magnetic fields in a continuous casting mold. In: 13TH PTD Conference, Nashville, 1995, *Proceedings...*, 1995, p. 79-88.
[[Links](#)]
- (4) TOLEDO et al. Agitación electromagnética en la colada continua de acero. *Rev. Metal. Madrid*, v. 31, n. 1, p. 23-30, 1995. [[Links](#)]
- (5) NATAJARAN, T. T., EL-KADDAH, N. Finite element analysis of electromagnetically driven flow in sub-mold stirring of billets and slabs. *ISIJ International*, v. 38, n. 7, p. 680-689, 1998. [[Links](#)]
- (6) ROBIGLIO et al. Diseño y modelado numerico del EMS en Siderca. In: XII SEMINARIO DE ACERIA - IAS, 1999. Buenos Aires. *Anais...*, p. 410-419. [[Links](#)]
- (7) TAKEUCHI et al. Advances of applied MHD technology for continuous casting processes. *Nippon Steel Technical Report*, n° 61, p. 29-37, 1994. [[Links](#)]
- (8) DUBKE, M., TACKE, K-H., SPITZER K-H., SCHWERDTFEGER K. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part I. Theory and experiments with cold models. *Metallurgical Transactions B*, v. 19B, p. 581-593, 1988. [[Links](#)]
- (9) FAVRE et al. Control of nozzle erosion and slag entrapment in billet casting with electromagnetic stirring. In: 3RD EUROPEAN CONFERENCE ON CONTINUOUS CASTING, 1998. Madrid. *Proceedings...*, Livro 2, p. 595-604.
[[Links](#)]
- (10) FUJISAKI, K., NAKAGAWA, J-i., MISUMI, H. Fundamental characteristics of molten metal flow control by linear induction motor. IEEE *Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 6, p. 4764-4766, 1994. [[Links](#)]
- (11) KOBAYASHI, S., ISHIMURA S. Analysis of turbulent flow field induced by rotating electromagnetic field in round billets. *Transactions ISIJ*, V. 28, p. 754-760, 1988. [[Links](#)]
- (12) TRINDADE et al. Modelo numérico de um agitador eletromagnético para lingotamento contínuo de tarugos. In: XXXII SEMINÁRIO SOBRE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 2001. Salvador. Aceito para publicação. [[Links](#)]
- (13) SZEKELY, J. *Fluid flow phenomena in metals processing*. New York: Academic Press, 1979. 437 p.
[[Links](#)]
- (14) ANSYS Theory Reference. 001099. Ninth Edition. SAS IP. Inc. [[Links](#)]
- (15) HUANG, X., THOMAS, B. G., NAJJAR, F. M. Modeling superheat removal during continuous casting of steel slabs. *Metallurgical Transactions B*, v. 23B, p. 339-356, 1992. [[Links](#)]
- (16) BEITELMAN, L. Flexible control of stirring in a continuous casting mold with a dual-coil system. In: ELECTRIC FURNACE CONFERENCE, 1997. Chicago. *Proceedings...*, 1997, p. 333-340. [[Links](#)]
- (17) FREITAS et al. Estudo do arraste de escória no molde através de modelamento físico e matemático. In: XXX SEMINÁRIO SOBRE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 1999. Belo Horizonte. *Anais...* p. 333-342.
[[Links](#)]

Artigo recebido em 15/03/2001.



Todo o conteúdo do periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#)

Escola de Minas

Praça Tiradentes, 20
35400-000 Ouro Preto MG - Brazil
Tel: (55 31) 3551-4730



editor@rem.com.br