

MODELAGEM MATEMÁTICA DA INTERFACE METAL-ESCÓRIA SOB O EFEITO DE AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

José Ernesto de Azevedo Nadalon²

Rafael Skrzek Sicorski³

Ismael Lis Alves Daoud⁴

Leonardo Barboza Trindade⁵

Antônio Cezar Faria Vilela⁶

Resumo

A interface metal-escória, dentro do molde, pode sofrer perturbações devido à agitação eletromagnética combinada com os efeitos turbulentos do escoamento do aço líquido, ocasionando o arraste e emulsificação de escória. Este trabalho visa analisar o comportamento da interface aço-escória no molde sob efeitos da agitação eletromagnética através da modelagem numérica dos fenômenos eletromagnéticos e fluido-dinâmicos. A modelagem será executada em duas etapas, sendo que na primeira serão calculados os efeitos eletromagnéticos, que proporcionarão os movimentos de agitação no aço, fazendo-se uso de um *software* que calcula numericamente as equações de *Maxwell* e consequentemente as forças de *Lorentz* geradas pelo agitador. A segunda etapa fará o acoplamento das forças a um modelo bifásico aço-escória que resolve numericamente as equações de *Navier-Stokes*, governantes do escoamento. O problema ainda será modelado sem efeito da agitação eletromagnética com o objetivo de validar os resultados numéricos com os obtidos em modelo físico. Para a validação do modelo fluido-dinâmico bifásico, sem agitação eletromagnética, pretende-se comparar os resultados com ensaios realizados em modelo físico do molde (água-querosene). Com este estudo podem-se avaliar as condições críticas de lingotamento nas quais ocorre o arraste e emulsificação de escória sem agitação eletromagnética. Com o acoplamento dos efeitos eletromagnéticos, visa-se avaliar os efeitos das condições de operação do agitador e seus efeitos sobre as perturbações do menisco.

Palavras-chave: Simulação numérica; Agitação eletromagnética; Arraste de escória; Molde de lingotamento contínuo.

MATHEMATICAL MODELING OF THE STEEL – SLAG INTERFACE UNDER THE EFFECT OF THE ELETROMAGNETIC STIRRING IN THE CONTINUOUS CASTING MOLD

Abstract

The metal-slag interface, inside the mold, may present disturbances due to the combined electromagnetic stirring along with the turbulent effects of the liquid steel flow, causing slag entrainment and emulsification. This work aims to analyze the behavior of the steel-slag interface in the mold under effects of the electromagnetic stirring through the numeric modeling of the electromagnetic and fluid-dynamic phenomena. The modeling will be performed in two stages, and, in the first one, the electromagnetic effects will be calculated which will provide the stirring movements in the steel. A software will be used to calculate numerically the *Maxwell's* equations and, consequently, the *Lorentz's* forces generated by the stirrer. The second stage will join the forces to a two-phase model (steel-slag). This solves numerically the *Navier-Stokes's* equations, which govern the fluid flow. The problem will still be modeled without the effect of the electromagnetic stirring aiming at validating the numerical results with the ones obtained in the physical model. For the validation of the two-phase fluid-dynamic model without electromagnetic stirring, there will be the comparison of the results with tests performed in the mold physical model (water-kerosene). With this study, the critical casting conditions can be evaluated in which the slag entrainment and emulsification occurs without electromagnetic stirring. With the joining of the electromagnetic forces, there is an attempt to evaluate the effects of the conditions of the stirrer operation and its effects on the meniscus disturbances.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Engenheiro Civil – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista do CNPq.

³ Engenheiro Mecânico – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista CNPq.

⁴ Engenheiro Mecânico – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista Capes.

⁵ Físico –Dr. Eng. Metalúrgica, Diretor Geral da STE.

⁶ Engenheiro Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS.

INTRODUÇÃO

O arraste de escória no molde durante o processo lingotamento contínuo é apontado como uma das principais fontes de formação de defeitos internos, devido ao aprisionamento de inclusões não-metálicas vindas principalmente da interface metal - escória. A escória se forma a partir do pó fluxante que se funde em contato com o aço líquido, e que tem como uma de suas funções, evitar a reoxidação do metal. Variáveis como, profundidade de submersão e posicionamento de furos da válvula, práticas de injeção de argônio e velocidade de lingotamento são apontadas como condições operacionais, que podem ocasionar arraste de pó fluxante durante o lingotamento contínuo.^(1,2)

Como prática na tentativa de produzir aços de melhor qualidade, a indústria passou a empregar dispositivos para, entre outras coisas, melhorar a estrutura de solidificação do metal: os agitadores eletromagnéticos (EMS). Dentre os equipamentos existentes, alguns têm como objetivo promover movimento de rotação no aço líquido. Este movimento favorece uma maior homogeneidade do campo de temperaturas, diminuindo os gradientes térmicos, favorecendo a redistribuição dos solutos. No entanto, estes movimentos, na região do menisco podem também provocar o arraste de escória para dentro do aço em solidificação. Uma boa revisão bibliográfica pode ser encontrada na tese de Trindade.⁽³⁾

Em busca de um entendimento dos fenômenos que promovem o arraste de escória, foram realizados estudos em modelos físicos que simulam as condições operacionais em laboratório com ajuda de sistemas similares que utilizam água a querosene, para representar o sistema aço – escória. Outras substâncias também são usadas para simular em laboratório o sistema aço – escória, mas como mostra a literatura é bastante complicado obter fluidos que guardem as similaridades necessárias para que se possam comparar com as condições reais que se verificam em processos industriais. Dentre os trabalhos já realizados, citam-se os de Chang, et al.⁽⁴⁾, Takeuchi et al.⁽⁵⁾, Dubke, Tacke, Spitzer e Schwerdtfeger⁽⁶⁾, que utilizam mercúrio como simulador do aço e ainda os de Favre, Kunstreich, Nove, Courths e Korte⁽⁷⁾, Fujisaki, Nakagawa e Misumi⁽⁸⁾, Kobayashi e Ishimura⁽⁹⁾.

Outra ferramenta que vem sendo empregada é a simulação numérica, que também auxilia na compreensão dos fenômenos siderúrgicos. Modelos numéricos, além de simularem os mesmos casos estudados em condições de modelos físicos, podem simular os fluidos reais da indústria, inclusive levando em consideração outras condições, como efeitos de temperatura, por exemplo, que são mais complicados de se avaliar em modelos físicos. Citam-se como trabalhos de simulação numérica os de Chang et al.⁽⁴⁾, Toledo et al.⁽¹⁰⁾, Natajara e El-Kaddah⁽¹¹⁾ e Robiglio et al.⁽¹²⁾.

Esse trabalho apresenta um modelo numérico, em elementos finitos desenvolvido em um *software* comercial, de um agitador eletromagnético de tarugos para avaliar as forças que promovem um escoamento rotacional no aço dentro do molde. Este modelo será empregado posteriormente como condição de contorno para o modelo fluido-dinâmico, desenvolvido em outro *software* numérico, que estuda o escoamento do aço líquido durante o lingotamento. Como objetivo central, o trabalho avalia o comportamento do menisco em casos específicos de operação, com e sem agitação eletromagnética.

METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em etapas, onde inicialmente desenvolveu-se o modelo do agitador eletromagnético (EMS), que simula o efeito deste equipamento no molde. Esse modelo foi validado com alguns resultados da literatura (*Trindade*⁽³⁾). Paralelamente a isso se estudou o comportamento do escoamento do aço líquido dentro do molde, juntamente com a escória sobrenadando no topo do molde, região chamada de menisco. Para tanto, foi desenvolvido o modelo fluido-dinâmico, primeiramente usando como fluídos do domínio, água e querosene. O objetivo deste modelo foi validar o problema resolvido numericamente com base em estudos realizados em modelos físicos que foram realizados por *Freitas*⁽¹⁾, em sua dissertação de mestrado realizado no laboratório de Siderurgia da UFRGS.

Com o modelo fluido-dinâmico validado, iniciaram-se as simulações com os fluídos com características reais, simulando aço e escória. Nesta última etapa o escoamento, bem como a interface metal – escória foi avaliada em duas situações: sem agitação eletromagnética (SEMS) e com agitação eletromagnética (CEMS). A condição CEMS é resultado do acoplamento dos dois modelos numéricos citados anteriormente, onde o campo de forças de Lorentz, resultado do modelo EMS, é inserido como termo fonte no modelo de escoamento fluido-dinâmico.

Modelo Numérico do Agitador Eletromagnético

O equipamento apresentado na Figura 1, representa um agitador genérico que é composto por doze bobinas dispostas em torno do molde, enroladas em um núcleo de ferro que tem a função de direcionar o campo gerado pelos enrolamentos. A excitação é trifásica em corrente alternada. O princípio de funcionamento está baseado nas características físicas de um motor de indução, onde o núcleo do modelo – aço líquido dentro do molde - representa o rotor. A corrente que circula pelos enrolamentos gera um campo eletromagnético. Este campo produz correntes induzidas no núcleo de aço líquido, que devido ao modo de excitação que é imposto às bobinas, impõe ao metal um movimento de giro que é devido às chamadas forças de Lorentz.

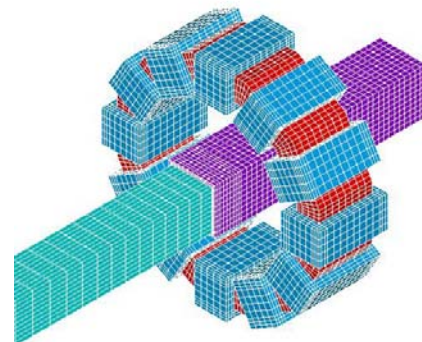


Figura 1. Agitador Eletromagnético

Os fenômenos de eletromagnetismo para problemas relacionados com metais fundidos são regidos pelas equações de *Maxwell*:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

Para materiais saturados sem ímãs permanentes,

$$\mathbf{B} = \mu_m \mathbf{H} \quad (5)$$

onde, μ_m é a permeabilidade magnética.

A solução destas equações pode ser obtida através da introdução de um potencial vetorial magnético tal que a densidade de fluxo magnético B e o campo elétrico E possam ser expressos como:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (8)$$

onde,

B = densidade de fluxo magnético

H = campo magnético

J = densidade de corrente

E = campo elétrico

A = potencial vetorial magnético

ϕ = potencial escalar elétrico

Combinando estas definições com as equações de *Maxwell*, obtém-se:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu_m \sigma_e \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (9)$$

onde,

σ_e = condutividade elétrica

Esta equação é resolvida com as condições de contorno apropriadas.

Para um fluido em movimento, a lei de Ohm diz que:

$$\mathbf{J} = \sigma_e [\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}] \quad (10)$$

A força de corpo \mathbf{F}_b devido ao campo de força eletromagnético, também chamada de força de Lorentz é dada por:

$$\mathbf{F}_b = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (11)$$

Este problema foi resolvido através do *software* que resolve numericamente as equações de *Maxwell* com as condições de contorno impostas ao modelo. A equação 11 vai gerar o campo de forças que atuam sobre o aço líquido. Este termo força entra na equação de *Navier-Stokes* como um termo fonte de força, assim como a força gravitacional.

Modelo Fluido-dinâmico do Escoamento no Molde

A etapa final do lingotamento contínuo acontece com o vazamento do aço do distribuidor para os moldes, por meio de válvulas. Esta fase do processo antecede a solidificação do metal e o aço ainda continua fluído, possibilitando que se faça uso de um modelo fluido-dinâmico para o estudo do escoamento do aço. A presença de escória torna necessária a construção de um modelo bifásico, não homogêneo para representar de forma mais real o fenômeno.

Como já exposto, foram estudados dois sistemas de fluidos: água – querosene e aço – escória, e a Tabela 1 mostra as características dos fluidos destes sistemas.

Tabela 1. Características dos fluidos.

	Massa Específica [kg/m ³]	Viscosidade [kg/m.s]	Tensão Interfacial [N/m]
Água	1000	0,00889	0,045
Querosene	760	0,0018	
Aço	7000	0,005	0,12
Escória	2940	0,234	

Fonte: Freitas ⁽¹⁾

Os problemas foram representados com um modelo de superfície livre, usando como modelo de turbulência o k-ε. As equações de *Navier-Stokes* serão calculadas pelo pacote numérico Ansys/CFX.

Em um modelo numérico, a conservação da variável de fluxo generalizada Φ , que representa tanto a massa específica, as variáveis de momentum, energia e conservação de espécie, é resolvida pela seguinte equação geral de transporte (Patankar, 1980):

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \phi_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \phi_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_i \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} \right] + \alpha_i S_{\phi_i} \quad (12)$$

Onde, Φ é a variável a ser resolvida, α a fração volumétrica de cada fase (gás ou líquido), ρ é massa específica de cada fase, Γ é o coeficiente de troca, t é o tempo e S é o termo fonte dado por unidade de tempo e volume. Os índices Φ e i indicam a variável específica e a fase, respectivamente. O primeiro termo da equação (12) expressa a taxa de mudança de Φ com o tempo. O segundo é o termo advectivo (transporte devido ao escoamento). O terceiro, o termo difusivo (transporte devido à variação de Φ de ponto a ponto), onde Γ_{ϕ_i} é o coeficiente de troca da entidade Φ na fase. Finalmente, o quarto termo expressa o termo fonte (associado com a geração e destruição, ou sumidouro, de Φ). Neste termo é que são inseridas as forças de Lorentz que caracterizam o modelo CEMS.

A viscosidade efetiva é calculada pelas equações (13) e (14), onde $\mu_{aço_0}$ é a viscosidade molecular e $\mu_{aço_T}$ é calculado a partir dos parâmetros turbulentos.

$$\mu_{aço_{eff}} = \mu_{aço_0} + \mu_{aço_T} \quad (13)$$

$$\mu_{aço_T} = C_\mu \rho_{aço} \frac{K_{aço}^2}{\varepsilon_{aço}} \quad (14)$$

A Figura 2 mostra o domínio do modelo fluido-dinâmico, onde estão indicadas também, as condições de contorno empregadas. O modelo fluido-dinâmico foi construído de forma a ter como volume de controle, o aço líquido e a escória sobrenadante. O domínio representa a região interior do molde curvo e a válvula submersa.

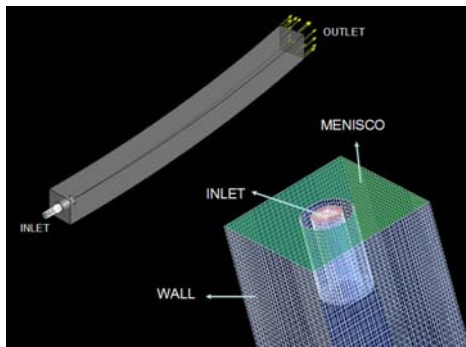


Figura 2. Modelo fluido-dinâmico com condições de contorno

- INLET: entrada de aço usando vazão de entrada, calculada com base na velocidade de lingotamento;
- OUTLET: vazão prescrita na saída
- WALL: não escorregamento nas paredes;
- MENISCO: parede com escorregamento;
- O domínio foi iniciado de forma a considerar a fase escória inicial de 1cm de espessura.

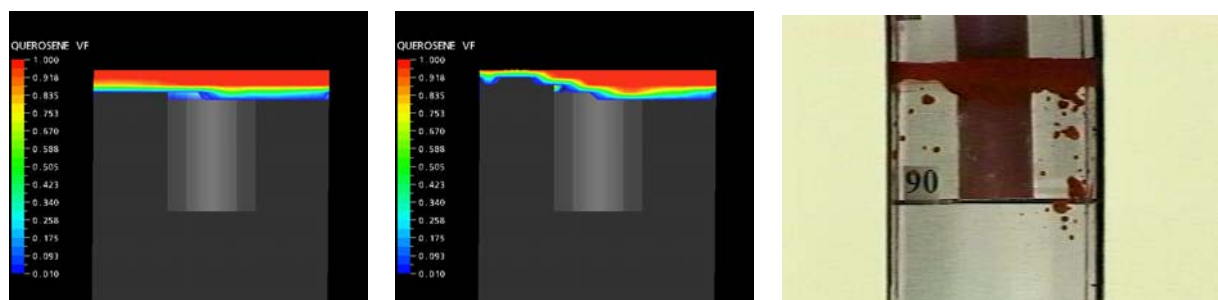
Casos de estudo

Considerou-se uma válvula com diâmetro (32mm) e profundidade de submersão (90mm) fixa, analisando-se dois valores de velocidade de lingotamento: 2 m/min , que é considerado um valor usual e $4,25\text{m/min}$, apontado por Freitas como a velocidade crítica onde se detecta o início de arraste para estas condições de operação avaliadas. Os estudos iniciaram com a simulação do sistema ÁGUA – QUEROSENE depois da validação com o modelo físico, o sistema AÇO – ESCÓRIA com e sem efeitos eletromagnéticos.

DISCUSSÕES

Modelo ÁGUA – QUEROSENE: validação com o modelo físico

O modelo construído simulando o sistema água/querosene (Figuras 3(a) e 3(b)), tem como principal finalidade validar o modelo numérico onde foi possível fazer um estudo comparativo do comportamento da camada de escória. A Figura 3 mostra os resultados em modelo numérico (a e b), e ainda o resultado em modelo físico (c) que indica o início do arraste da camada de escória.



(a) CASO1: 2m/min

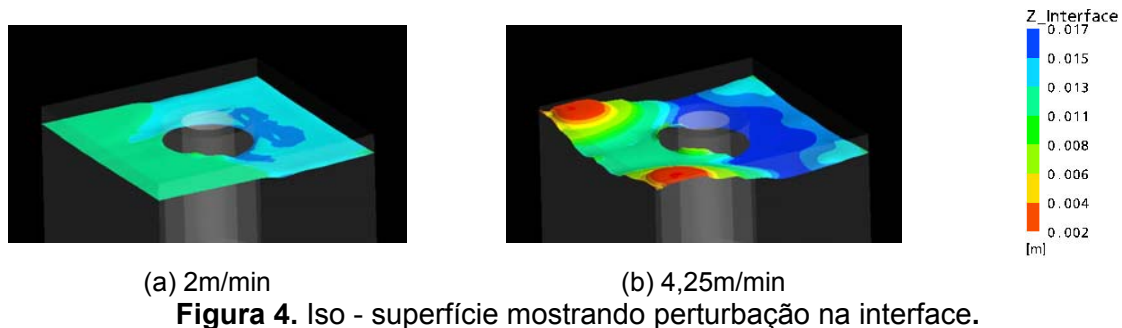
(b) CASO2: $4,25\text{m/min}$

(c) modelo físico – $4,25\text{m/min}$

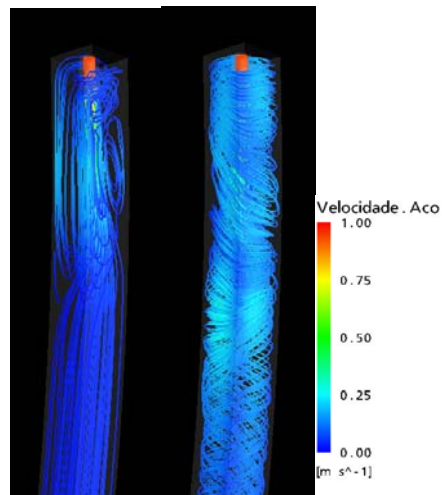
Figura 3. Validação do modelo numérico.

Fazendo-se uma análise das Figuras 3(b) e 3(c), pode-se verificar uma razoável semelhança entre os resultados. A curvatura do molde se desenvolve para a parte inferior, para a esquerda (sentido horário). Podemos perceber que a escória sofre uma maior perturbação quando se aumenta a velocidade de lingotamento. A concordância com o modelo físico se verifica pela mesma configuração da camada sobrenadante para os casos (b) e (c), onde a parte mais a esquerda da figura é menos espessa que o lado oposto. Isto se deve justamente a forma curva do molde, que faz com que o jato de aço que sai da válvula, quando de choca contra a parede

interna, modifique a forma do escoamento fazendo com que parte dele se torne ascendente, perturbando o menisco. A Figura 4 (a) e (b) mostra uma iso – superfície de fração volumétrica de querosene, que mostra como se comporta a interface para as vazões de estudo. Nestas figuras percebe-se mais claramente como a interface é afetada com o aumento da vazão.



Modelo AÇO – ESCÓRIA: escoamento sem e com agitação eletromagnética.



A Figura 5 mostra as linhas de corrente para cada caso. Como descrito na literatura, quando se insere no domínio as forças de Lorentz, o tipo de escoamento no interior do molde muda completamente. O caso que não recebeu agitação (Figura 5(a)) apresenta um escoamento onde parte da massa que entra pela válvula submersa escoo diretamente para a saída, e outra tem um período de permanência maior na região superior do molde, devido a uma recirculação que ali se forma. Essa assimetria do escoamento ocorre devido à curvatura do molde. Já no caso com agitação eletromagnética (Figura 5(b)) o escoamento é preferencialmente rotacional. Ao sair da válvula, o jato de aço entra em contato com o campo de força de giro e se modifica, se desenvolvendo rotacional até a saída do domínio.

Da mesma forma que o escoamento, o comportamento do menisco também é diferente para os casos com e sem agitação. A forma da interface entre o metal e a escória está apresentada na Figura 6, na forma de iso – superfícies de fração volumétrica de escória igual a 0,5. Estas superfícies estão coloridas conforme a variação da coordenada z, que indica a elevação da superfície. Como visto anteriormente, o agitador modifica o campo de escoamento e isso também se reflete no formato do menisco. Quando não se faz a ação do agitador, percebe-se o soerguimento da interface na parede onde está a curvatura interna do molde. Já nos casos com agitação se percebe que o movimento de giro faz com que ocorra uma elevação maior nos encontros das faces do molde, e as menores mais próximas a parede da válvula.

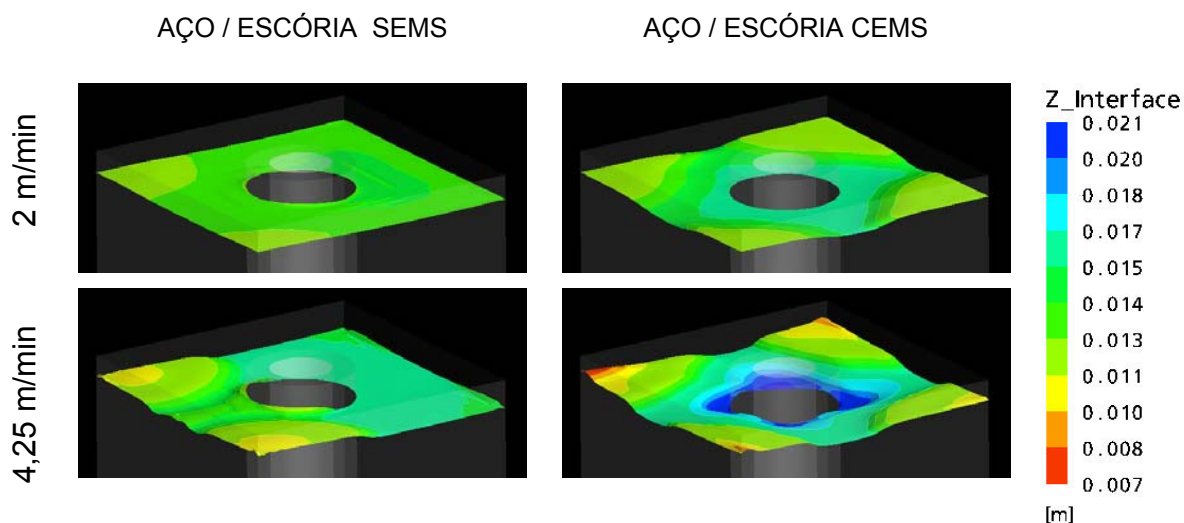


Figura 6. Elevações no menisco

A energia cinética de turbulência também foi calculada no menisco. Analisando o modelo AGUA-QUEROSENE, para o caso em que a literatura aponta como velocidade de lingotamento crítica, a energia cinética de turbulência máxima foi de $0,0057 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Na Figura 7, que mostra os valores de energia cinética turbulenta na interface, pode-se observar que independente da agitação eletromagnética, todos os valores superam o apontado como crítico no modelo físico. A energia cinética turbulenta indica o grau de flutuação da velocidade na interface, apontando assim uma propensão ao arraste da escória.

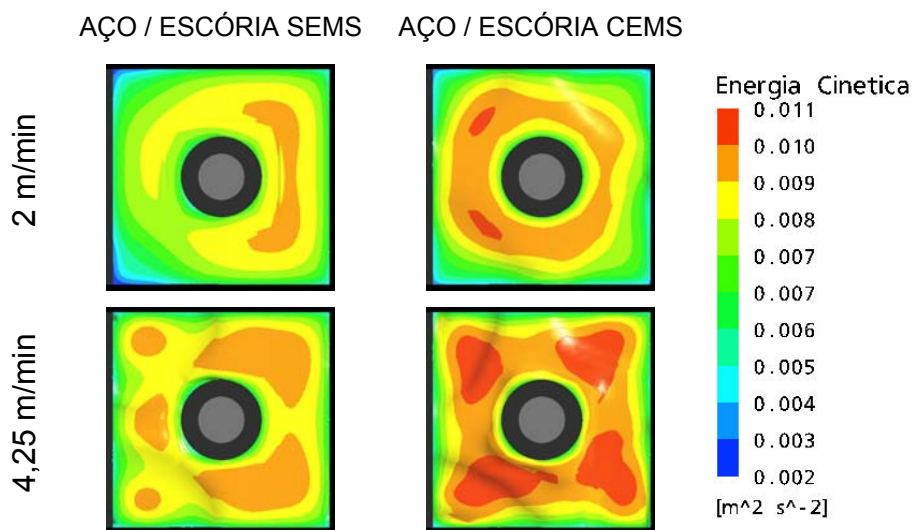


Figura 7. Contornos de enérgica cinética turbulenta.

A Figura 8 abaixo, mostra os vetores que representam as velocidades do aço no menisco. Verifica-se que os casos que apresentam agitação eletromagnética apresentam velocidades bem mais elevadas que o caso sem agitação.

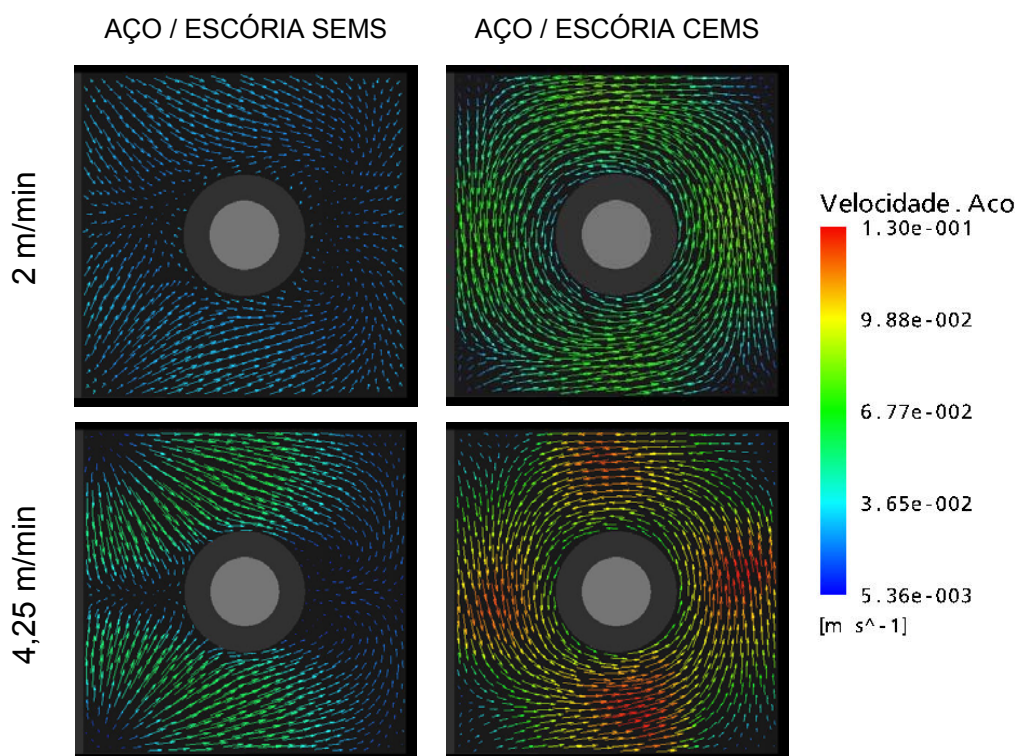


Figura 8. Vetores velocidade de aço no menisco.

Para os modelos deste trabalho observou-se uma variação da velocidade na região de menisco de 0,032 m/s a 0,059 m/s (SEMS) e 0,078 m/s a 0,13 m/s (CEMS), para as velocidades de 2,0 e 4,25 m/min, respectivamente. Percebe-se que para os casos CEMS as velocidades já começam a superar as velocidades ditas críticas de arraste no menisco.

CONCLUSÕES

Neste trabalho pode-se validar o modelo numérico fluido-dinâmico, de forma bastante satisfatória fazendo-se uso de comparações com resultados de modelo físico, realizados no LASID/UFRGS.

Esta validação tornou possível a comparação dos modelos fluido-dinâmicos, com e sem efeitos de agitação eletromagnética, evidenciando suas diferenças de comportamento, tanto de escoamento quanto de perturbações no menisco. Os resultados apontaram um significativo aumento na velocidade de aço na interface metal – escória, uma vez que as velocidades no menisco praticamente dobram quando se comparam casos com e sem agitação eletromagnética.

Cabe salientar que os modelos aqui apresentados são iniciais, e pretende-se, em trabalhos futuros, levar em consideração outras variáveis que aqui não foram apontadas, como diferentes viscosidades de escória.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a Capes pelo apoio financeiro prestado.

REFERÊNCIAS

- 1 FREITAS Estudo do escoamento e do arraste de escória no molde de lingotamento contínuo. **Dissertação de Mestrado – PPGEM / UFRGS**, Porto Alegre - Brasil.
- 2 FREITAS et al. Estudo do arraste de escória no molde através de modelamento físico e matemático. **XXX Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais**, 1999, p. 333-342.
- 3 TRINDADE Estudo do escoamento e do arraste de escória no molde de lingotamento contínuo. **Tese de Doutorado – PPGEM / UFRGS**, Porto Alegre - Brasil.
- 4 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**, 1995, **Proceedings**, v. , 1995, p. 79-88.
- 5 TAKEUCHI et al. Advances of Applied MHD Technology for Continuous Casting Processes. **Nippon Steel Technical Report**, nº 61, p. 29-37, 1994.
- 6 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.
- 7 FAVRE et al. Control of Nozzle Erosion and Slag Entrapment in Billet Casting with Electromagnetic Stirring. In: **3rd European Conference on Continuous Casting**, 1998, **Proceedings**, Livro 2, p. 595-604.
- 8 FUJISAKI, K., NAKAGAWA, J-i., MISUMI, H. Fundamental Characteristics of Molten Metal Flow Control by Linear Induction Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, V. 30, nº 6, p. 4764-4766, 1994.
- 9 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.
- 10 TOLEDO et al. Agitación electromagnética en la colada continua de acero. **Rev. Metal. Madrid**, V. 31, nº 1, p. 23-30, 1995.
- 11 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, nº 7, p. 680-689, 1998.
- 12 ROBIGLIO et al. Diseño y Modelado Numerico del EMS en Siderca. **XII Seminario de Aceria – IAS**, 1999, p. 410-419.
- 13 TRINDADE et al. Os efeitos da agitação eletromagnética no molde para diferentes velocidades de lingotamento. **13° Seminario de Aceria e 3° Seminario de Redução do IAS**, 2001. Buenos Aires - Argentina.