

CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO AGITADOR ELETROMAGNÉTICO DO MOLDE (M-EMS) E SEUS EFEITOS NO ESCOAMENTO *

*Eduardo Netto de Souza¹
Leonardo Barboza Trindade²
José Ernesto de Azevedo Nadalon³
Bruno Pessoa Ramos⁴*

Resumo

O agitador eletromagnético no processo de lingotamento contínuo tem se mostrado útil na melhoria de qualidade das estruturas de solidificação, inibindo a formação de estruturas colunares, aumentando desta forma, a fração de estruturas equiaxiais, promovendo redistribuição de soluto e atenuações de defeitos através de movimentos induzidos no líquido pelo campo magnético. Baseado nas características do agitador eletromagnético do molde (M-EMS) de uma máquina de lingotamento de tarugos, foram realizadas simulações fluidodinâmicas (CFD) sob influência do campo eletromagnético, visando analisar o comportamento do escoamento e da temperatura. Um segundo objetivo foi avaliar o efeito do agitador sobre a trajetória das inclusões e como poderia promover a melhoria da qualidade subsuperficial das estruturas de solidificação. Foram testadas diferentes frequências e correntes de operação do M-EMS, bem como o posicionamento das válvulas submersas com diferentes configurações de furos de saída. Os resultados mostraram a percentagem de partículas sólidas removidas do domínio e a influência do agitador na extração de calor do molde, de forma a tornar mais homogênea a distribuição de temperatura durante o processo de solidificação.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; M-EMS; Inclusões; Dinâmica dos fluidos.

CHARACTERIZATION AND NUMERICAL SIMULATION OF THE ELETROMAGNETIC STIRRING OF THE MOLD AND ITS EFFECTS ON THE FLOW

Abstract

The Electromagnetic Stirring has been shown to be useful in the quality of solidification structures, inhibiting the formation of columnar structures, promoting the solute redistribution and defects attenuation through electromagnetic forces induced in the liquid phase. Based on the design of M-EMS of a billet-casting machine, simulations of fluid flow (CFD) and temperature under influence of electromagnetic field were performed. As a second aim, the stirrer effect on the inclusion trajectory and how it could promote the subsurface quality of the solidified structures was evaluated. Different frequencies and current of M-EMS, as well nozzles geometries, were tested. The results showed the tendency displacement of the particle, the fraction of solid particles removed from domain and the influence of M-EMS in the heat extraction from the mold, improving the temperature distribution during the solidification process.

Keywords: Continuous Casting; M-EMS; Inclusions, Fluid Dynamics.

¹ *Doutor em Engenharia, Pesquisador do Centro de P&D – Villares Metals S.A., Sumaré, SP.*

² *Doutor em Engenharia Metalúrgica, STE – Science Technology & Engineering, Porto Alegre, RS.*

³ *Mestre em Engenharia Metalúrgica, STE – Science Technology & Engineering, Porto Alegre, RS.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Diretor de Produção, Villares Metals S.A., Sumaré, SP.*

1 INTRODUÇÃO

Nos instantes iniciais no lingotamento contínuo, o processo de solidificação ocorre dentro do molde sob a influência do agitador eletromagnético (M-EMS), promovendo uma agitação, por meio das correntes induzidas geradas pelo campo magnético. O agitador atua no metal líquido de modo a evitar a formação de estruturas colunares, homogeneizar a distribuição de temperatura e composição química, atenuando dessa forma, a formação de compostos segregados e, por conseguinte, tende a melhorar a qualidade da casca solidificada. Além disso, o escoamento de metal líquido pode promover a remoção de inclusões e bolhas de gás na interface metal/pó fluxante. O agitador eletromagnético no molde promove um fluxo rotacional atuando na frente de solidificação de modo a modificar a estrutura do material e amenizar a segregação [1]. A **Figura 1** mostra um esquema de um M-EMS mostrando os efeitos mecânicos atuantes na região do metal líquido e na frente de solidificação.

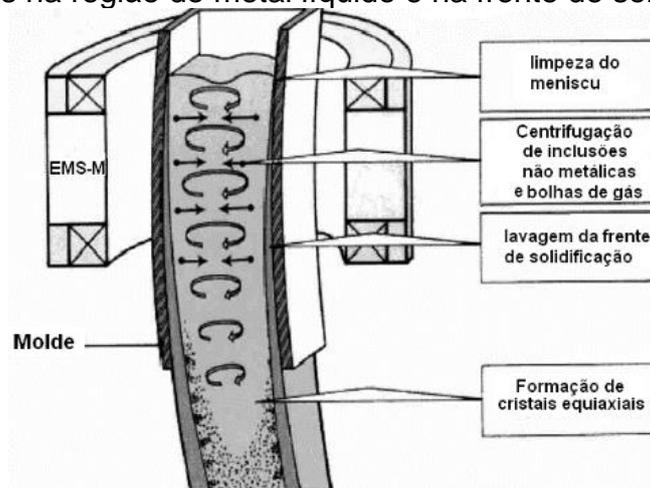


Figura 1. Efeito do mecanismo do EMS-M na qualidade subsuperficial do tarugo[1].

Os efeitos da atuação do EMS dependem muito do material a ser lingotado. Os aços carbono apresentam um comportamento em que as estruturas colunares tendem a ser maiores, à medida que aumenta o superaquecimento e o %C, exceto nos casos dos peritéticos, que apresentam comportamento anômalo em função da transformação da ferrita delta [2]. Para melhorar este aspecto, durante o processo de solidificação, objetiva-se obter maior fração de estruturas equiaxiais.

O posicionamento dos agitadores eletromagnéticos ao longo do veio tem diferentes efeitos nas estruturas de solidificação [3]. O gráfico da **figura 2** mostra, de forma qualitativa, os efeitos dos agitadores no Molde (M-EMS) e no veio (S-EMS) na formação de estruturas equiaxiais. Observa-se que, quanto maior o superaquecimento, menor é a formação de estruturas equiaxiais e, que os efeitos dos agitadores eletromagnéticos são importantes na formação destas estruturas, principalmente quando se trata do efeito do M-EMS. Segundo Kunstreich [1], quanto maior é a corrente do agitador, maior é a formação da zona de estruturas equiaxiais, conforme mostra a **Figura 3**.

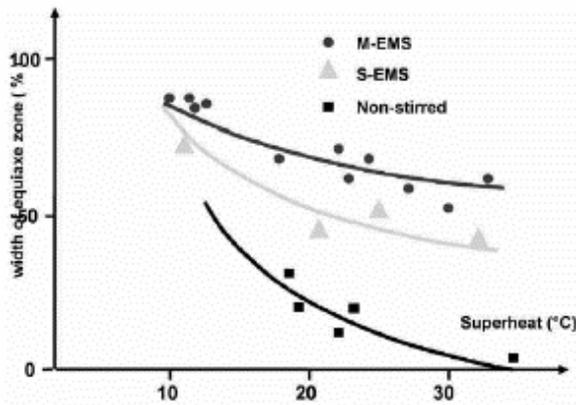


Figura 2. Variação no tamanho da zona equiaxial devido à presença de agitador eletromagnéticos no veio e no molde[1].

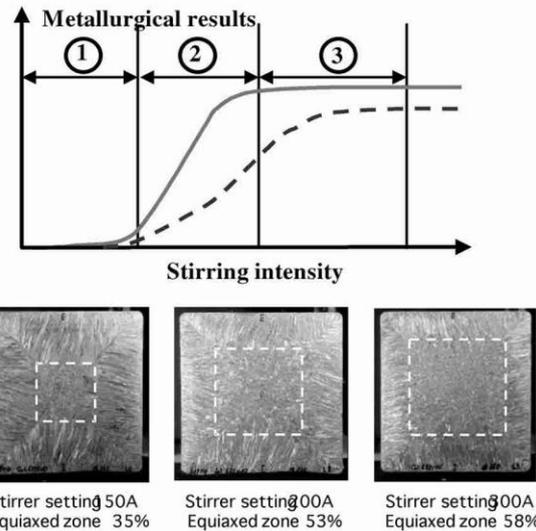


Figura 3. Relação qualitativa de formação da zona colunar em função da intensidade de corrente para um tarugo Qd160mm do aço AISI409 [1].

Com relação às configurações das válvulas submersas, Aboutalebi [4] realizou estudos utilizando modelagem com CFD para análise do efeito do escoamento no arraste de pó fluxante com diferentes posicionamentos de válvulas submersas, conforme mostra a **Figura 4**. Outros pesquisadores utilizaram modelos físicos para avaliar o comportamento do fluido [4,5]. Nadalon [6] realizou estudos de arraste de escória sob efeito do agitador eletromagnético em moldes de seção circular, utilizando-se de dinâmica dos fluidos computacional (CFD).

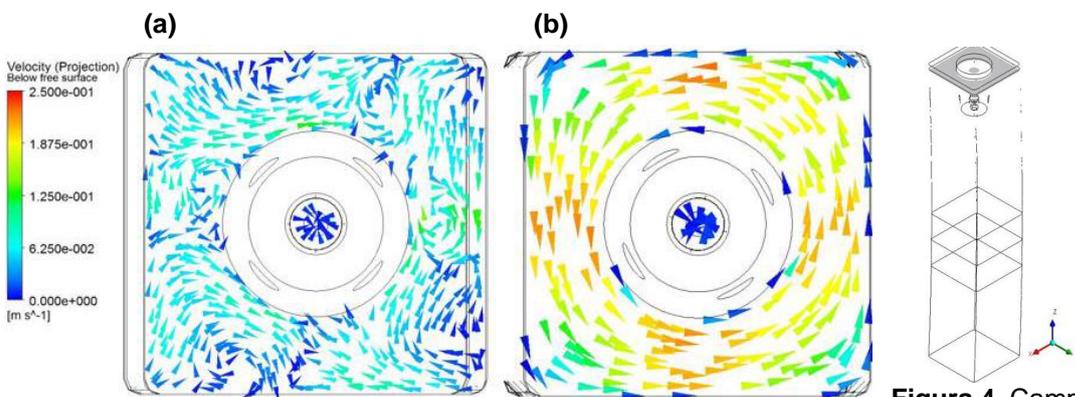


Figura 4. Campo de

velocidades na seção transversal para diferentes ângulos de incidência de jato da Válvula Submersa de 4 furos. (a) Ângulo de 0° (perpendicular aos cantos do molde). (b) Ângulo rotacionado em 15° sentido horário [4].

O objetivo geral do trabalho é verificar o comportamento do escoamento do aço com diferentes intensidades do M-EMS, utilizando modelos eletromagnéticos, fluidodinâmicos e térmicos acoplados, simulando a remoção e aglomeração inclusionária no lingotamento contínuo da Villares Metals sob efeito das variáveis inerentes com diferentes configurações de posicionamento da válvula submersa. Os resultados mostraram a percentagem de partículas sólidas removidas do sistema e a influência do agitador no fluxo de calor em função da intensidade de corrente do M-EMS.

2 DESENVOLVIMENTO

Para atingir o objetivo da modelagem das variáveis influentes no escoamento no molde, foram realizadas as seguintes etapas:

- Levantamento das condições operacionais e de projeto do lingotamento contínuo e equipamento de agitação eletromagnética;
- Desenvolvimento do modelo numérico do agitador eletromagnético;
- Desenvolvimento do modelo fluidodinâmico do escoamento no molde sob influência do agitador eletromagnético;
- Validação dos perfis de densidade de fluxo magnético através de medições com gaussímetro;
- Análise do escoamento com foco nos mapas de vetores de velocidade, de temperatura e trajetória de inclusões.

A modelagem numérica do agitador foi realizada através do software Opera-3D. Esse software resolve as equações de Maxwell e gera como resultado os campos de fluxo magnético e forças de Lorentz.

As forças de Lorentz são inseridas no modelo fluidodinâmico como termos-fonte das equações de momentum. O modelo fluidodinâmico foi desenvolvido no software Ansys/CFX, que resolve as equações de Navier-Stokes e de turbulência. Mesmo o molde tendo uma geometria bastante simples, a agitação eletromagnética e a vazão na saída da válvula submersa tornam o escoamento bastante turbulento. Para resolver o problema, foi escolhido o modelo de turbulência conhecido por modelo k- ϵ [7]. Foram analisados os campos de velocidade em algumas regiões, como no topo do molde, região de interesse no que diz respeito à possibilidade de ocorrência de arraste de escória. Também serão apresentados os resultados de uma modelagem Lagrangeana para o estudo de deslocamento e remoção de partículas inseridas ao escoamento previamente calculado, tendo como referência o trabalho de Trindade et al [8].

2.1 Modelagem do Agitador Eletromagnético (M-EMS)

O resumo das propriedades físicas dos materiais necessárias para a modelagem eletromagnética está na **Tabela 1**.

Tabela 1. Propriedades físicas dos materiais.

Material	Condutividade Elétrica (σ_e) [S/m]	Permeabilidade Magnética Relativa (μ_e)
Ferro (núcleo)	5.00e ⁵	1000
Aço líquido	7.14e ⁵	1
Cobre (molde)	4.00e ⁷	1

Casos Analisados

As simulações executadas tiveram o objetivo de validar o modelo eletromagnético baseado em medições que já haviam sido executadas no equipamento em planta. As condições escolhidas tiveram por objetivo atender dois grupos de comparação:

- Variação de frequência de operação – 3, 4, 5, 6 e 7 Hz – mantendo fixo o valor de corrente de excitação das bobinas – 150A;
- Variação da corrente de excitação – 150, 300 e 400A – mantendo fixo o valor da frequência de operação – 7Hz.

Ao final da simulação foi possível verificar os valores máximos de densidade de fluxo magnético – medidos e calculados, de modo que houve boa concordância.

2.2 Modelagem do Escoamento no Molde do Lingotamento Contínuo

Após a simulação do equipamento eletromagnético, fez-se a simulação do escoamento do aço no interior do molde, com o acoplamento do campo das forças de Lorentz. O estudo foi planejado para verificar o comportamento do agitador no escoamento de um aço martensítico.

Na **Figura 7**, estão representadas as válvulas que foram testadas nas modelagens previstas neste trabalho. Os resultados serão apresentados para uma válvula de um furo e outra com quatro furos laterais. Também se decidiu testar o efeito da profundidade de submersão da válvula de um furo, avaliando 3 diferentes profundidades de submersão 90, 70 e 150 mm.

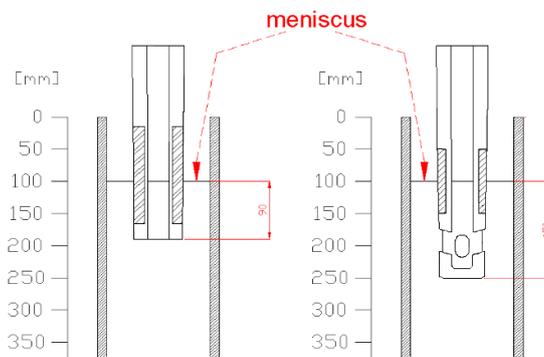


Figura 7. Geometria das válvulas submersas 1 furo (esquerda) e 4 furos (direita).

A **Tabela 2** mostra os casos simulados com objetivo comparativo entre a intensidade de agitação, tipo de válvula e profundidade da válvula submersa (PSV).

Tabela 2. Casos simulados - modelo fluidodinâmico.

	Agitação	Tipo de válvula	PSV *
Caso 1	0 A	1 furo	90 mm
Caso 2	200 A	1 furo	90 mm
Caso 3	300 A	1 furo	90 mm
Caso 4	400 A	1 furo	90 mm
Caso 5	0 A	4 furo	150 mm
Caso 6	200 A	4 furo	150 mm
Caso 7	300 A	4 furo	150 mm
Caso 8	200	1 furo	70 mm
Caso 9	200	1 furo	110 mm

Os casos foram escolhidos para fazer as seguintes comparações, separando em três grupos que reúnem características similares de análise:

- GRUPO 1 – Aumento da agitação eletromagnética - usando a válvula de um furo: com a PSV de 90 mm, testar o efeito do aumento da intensidade de agitação eletromagnética sobre o escoamento e na eficiência de remoção do calor de superaquecimento (CASOS 1, 2, 3 e 4);

- GRUPO 2 – Aumento da agitação eletromagnética - usando a válvula de 4 furos: com a PSV de 150 mm, testar o efeito do aumento da intensidade de agitação eletromagnética sobre o escoamento e na eficiência de remoção do calor de superaquecimento (CASOS 5, 6 e 7);
- GRUPO 3 – Efeito da profundidade de submersão da válvula de um furo: usando uma mesma condição de agitação, testar três valores de profundidade de submersão para a válvula de um furo, avaliando o efeito sobre o escoamento e remoção de superaquecimento (CASOS 2, 8 e 9);

As análises que seguem têm a finalidade de verificar o comportamento do aço no interior do molde, com vistas ao escoamento do metal líquido. O deslocamento de partículas sólidas e a transferência de calor, sob o efeito de agitação eletromagnética.

Para análise do escoamento, usaram-se alguns visualizadores. Inicialmente com base nas linhas de corrente é possível visualizar as linhas de fluxo do escoamento. Mais informações podem ser somadas com a visualização do campo vetorial em planos que mostram as principais regiões do molde (seções transversais e longitudinais, topo do molde, etc.).

As perdas térmicas são avaliadas com base em mapas de temperaturas nos planos escolhidos para comparação, bem como através do fluxo de calor pelas paredes na região do molde.

2.3 Resultados

2.3.1 Caracterização do Escoamento

A **Figura 8a** mostra as linhas de corrente do escoamento para os quatro casos que comparam o aumento da corrente para a configuração com válvula de um furo. Já a **Figura 8b** mostra as linhas de corrente do escoamento para válvula de 4 furos.

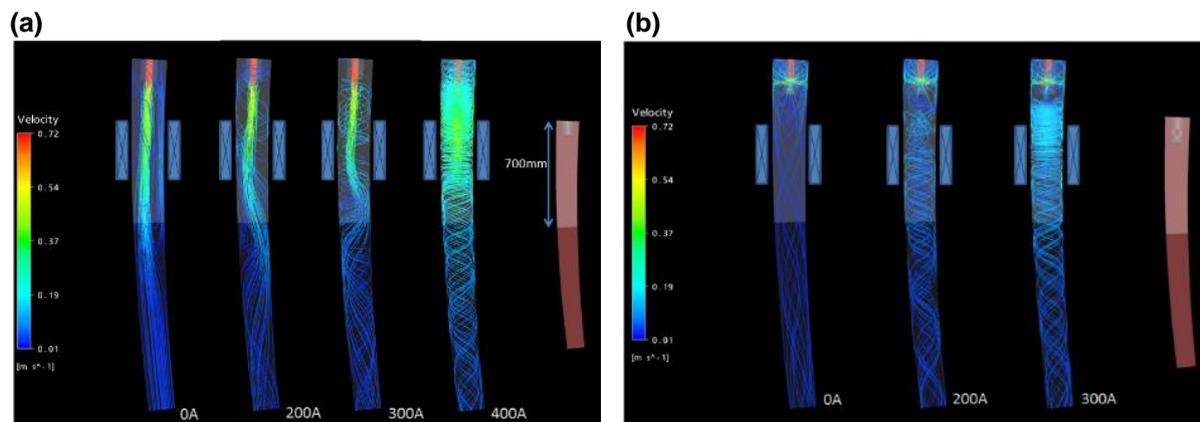


Figura 8. Linhas de corrente - Grupo 1. Aumento da agitação magnética. (a) usando válvula de 1 furo. (b) usando válvula de 4 furos.

Na **Figura 8a** as linhas de corrente são úteis na identificação do movimento rotacional no interior do molde. No caso de 0 A (sem uso de agitação) é possível perceber um típico escoamento dentro do molde. Devido à curvatura do molde, existe a formação de uma recirculação no raio interno de curvatura, fazendo com que uma porção de aço líquido retorne em direção ao topo do molde, mas percebe-se que a maior parte do escoamento segue em direção à saída do domínio. Quando

se aciona o uso da agitação, mesmo para a corrente mais baixa (200A), já é possível notar que na região do agitador algumas linhas de correntes se mostram rotacionais, propagando-se até a saída do domínio.

Comparando-se todos os casos de agitação percebe-se que o aumento da intensidade de corrente aumenta o efeito da intensidade rotacional no interior do tarugo. Percebe-se que para intensidades de agitação mais baixas, as maiores velocidades são promovidas pelo jato de aço proveniente da válvula submersa. Com o aumento da intensidade de agitação, o jato passa a ter velocidades inferiores às promovidas pelo agitador eletromagnético. Na **Figura 8b**, visualiza-se os resultados para os testes com a válvula de 4 furos. O fato do jato não estar direcionado à saída do molde e sim em direção perpendicular à face do molde, acarreta em um movimento também rotacional, mesmo que de intensidade menor que o promovido pelo agitador. É interessante perceber que mesmo para o caso sem agitação, as linhas de correntes evidenciam esse movimento rotacional no aço do interior do molde. Com a inserção do efeito do agitador, o movimento é potencializado. Na **Figura 9a**, está a comparação dos escoamentos para os casos com variação de profundidade de submersão de válvula de 1 furo. Esta comparação nos mostra que, em termos de escoamento, esta variável não mostra diferenças. Tanto visualmente, quando em termos quantitativos de valores de velocidades, não há diferença entre os resultados. Na **Figura 9b**, mostra os vetores de campo de velocidades para diferentes intensidades de corrente.

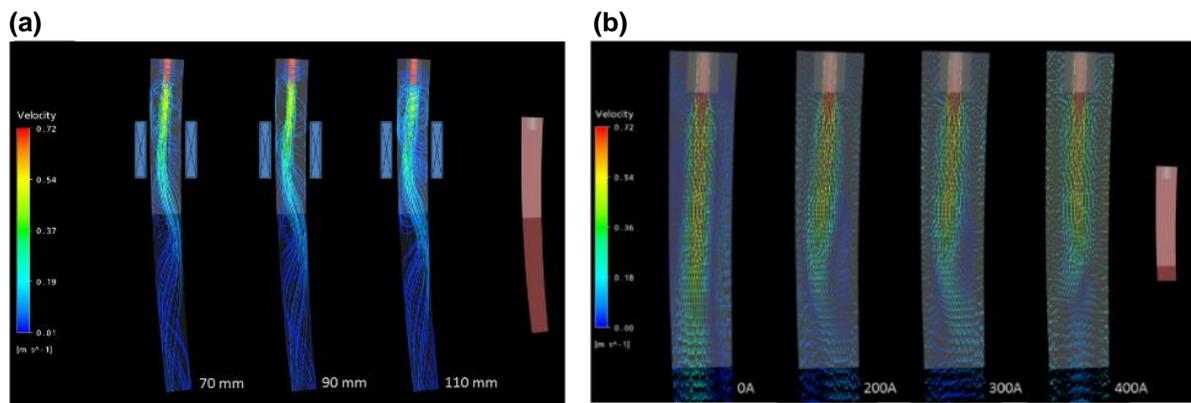


Figura 9. Linhas de corrente - Grupo 1. Aumento da agitação magnética. (A) usando válvula de 1 furo. (B) usando válvula de 4 furos.

Pode-se perceber com maior clareza a redução do alcance de profundidade do jato de entrada de aço no molde, com o aumento da intensidade de agitação eletromagnética. Para o mesmo plano, foi plotado o campo de velocidade para a comparação das válvulas de 4 furos, mostrada na **Figura 10**.

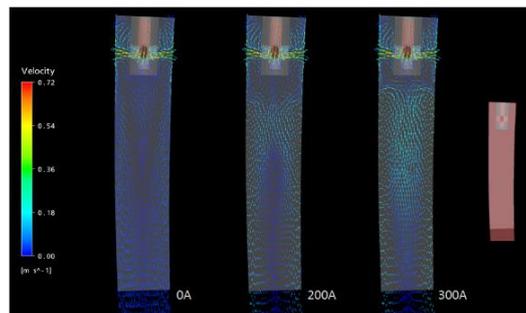


Figura 10. Vetores de velocidade - Grupo 2 – Aumento da agitação magnética usando válvula de 4 furos.

Além da saída dos 4 jatos contra as paredes do molde, fica visível que o escoamento no molde sem agitação eletromagnética tem velocidades muito baixas. Da mesma forma da válvula de 1 furo, não houve variação significativa para válvulas de 4 furos em diferentes profundidades. Analisando-se no corte transversal do molde na região do menisco, onde a velocidade pode ser determinante na ocorrência de arraste da camada de escória líquida que se forma no topo do molde, percebe-se, que para a agitação mais baixa já é possível perceber o movimento rotacional (Figura 11a – Válvula de 1 furo; Figura 11b – 4 furos).

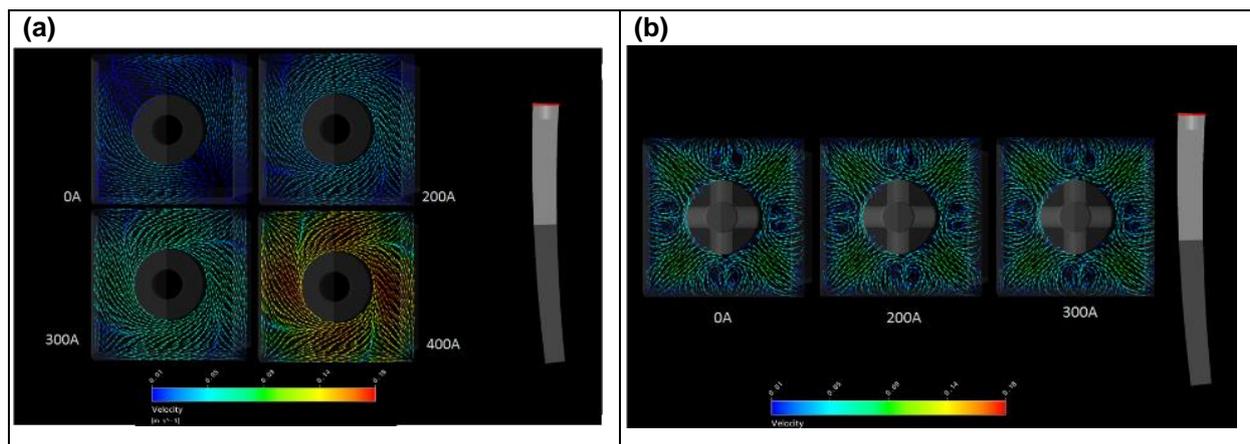


Figura 11. Corte transversal do molde. Região do menisco. (a) Válvula de 1 furo. (b) válvula de 4 furos.

Estudos desenvolvidos por Xiao [10] apontam que a velocidade na interface pode se tornar crítica a ponto de instabilizar a interface, emulsificando gotas de escória que podem ser arrastadas para o aço em solidificação. Segundo este autor, o número de Weber (We) – adimensional que correlaciona forças inerciais e forças de tensão interfacial – pode ser representado pela fórmula abaixo:

$$We = \frac{v^2 \rho_{aço}}{\sqrt{\gamma g (\rho_{aço} - \rho_{escória})}} \quad (1)$$

Onde v é a velocidade do aço na interface (no caso deste estudo no topo do molde), γ a tensão interfacial entre os líquidos, g a aceleração da gravidade e ρ a densidade de cada um dos líquidos.

Supondo uma escória hipotética com densidade de 2500 kg/m³, e uma tensão interfacial de 1,04 N/m, pode-se calcular um We teórico e tentar prever o comportamento da interface, verificando se para as velocidades atingidas no menisco há risco de instabilidade.

A literatura descreve que, para casos de moldes e interfaces líquidas no topo, o We máximo deve ser da ordem de 12. Os cálculos indicam valores da ordem de 1,12 para o caso com maior agitação, 400A com válvula de um furo. Este resultado indica que, para as escórias definidas como comparação, as práticas de agitação testadas pelo modelo não oferecem riscos no que tange a possibilidade de arraste de escória do menisco. O plano transversal da região do centro do molde mostra um escoamento bem mais intenso, conforme mostra a Figura 12. É nessa região que ocorre o torque máximo provocado pelo agitador, grandeza importante no

desenvolvimento do escoamento e no melhor desempenho do equipamento. Também se pode perceber o efeito do jato proveniente da válvula de um furo (Figura 12b), governando o escoamento, com a visualização da intensidade do escoamento mais elevado no centro do molde. Mesmo para o caso com maior intensidade de agitação, é possível ver que o centro do tarugo ainda carrega informações da velocidade proveniente da válvula submersa. A velocidade máxima junto às paredes do molde é da ordem de 0,45 m/s para a corrente de 400 A. A Figura 12a mostra que o agitador para válvula de 1 furo, o agitador se torna mais efetivo a partir de 300. Já no caso dos escoamentos nas válvulas de 4 furos, pode-se verificar que não existe influência da geometria da válvula submersa.

O escoamento é todo ditado pelo agitador eletromagnético, como visto na **Figura 12b**.

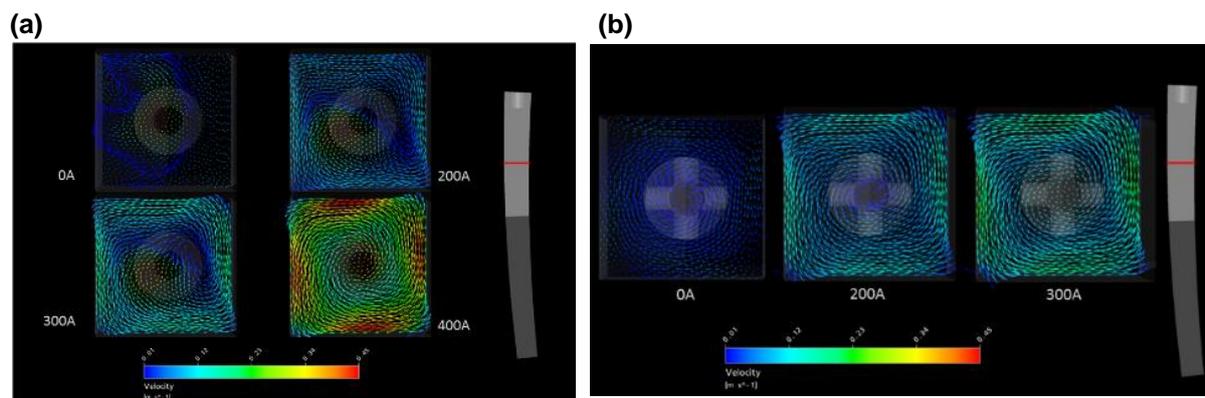


Figura 12. Vetores – Plano transversal no centro do M-EMS. **(a)** Válvula de 1furo. **(b)** válvula de 4 furos.

2.3.2 Perda de calor no molde

A passagem do aço pelo molde tem a função de extrair calor para a formação da frente de solidificação gerando a casca solidificada. A forma como este calor é extraído do aço é determinante na formação de sua estrutura cristalina, o que se reflete na qualidade interna e superficial do tarugo. O aumento da extração de calor com o aumento da intensidade de agitação se reflete na remoção do calor de superaquecimento, e também na distribuição de temperatura do longo da seção e do comprimento do tarugo, como mostram as próximas figuras. A **Figura 13** mostra como o mapa de temperatura se transforma com a inserção a agitação eletromagnética. Percebe-se a válvula de 4 furos mantém a temperatura na região do menisco mais elevada.

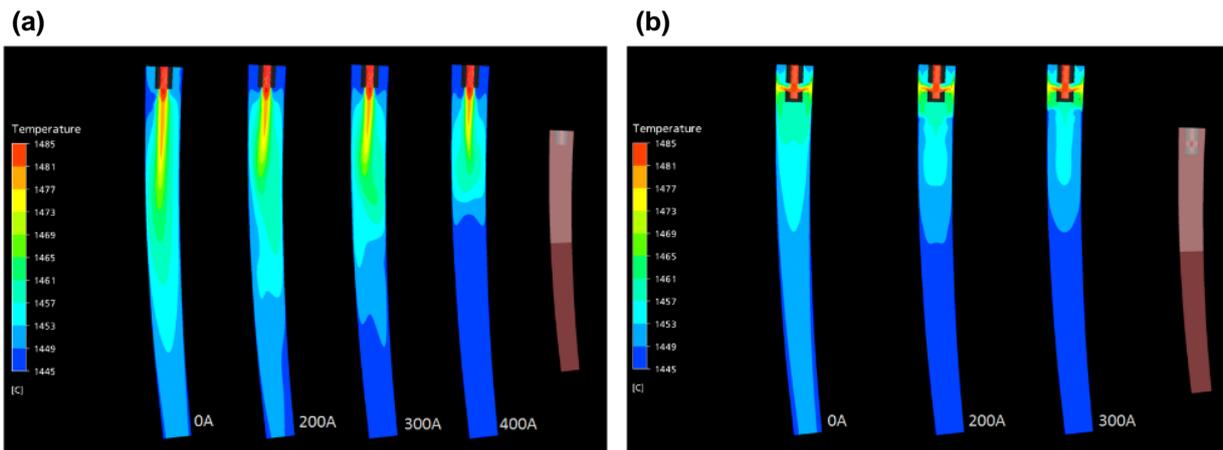


Figura 13. Mapa de Temperatura em função da intensidade magnética. (a) válvula com 1 furo. (b) Válvula com 4 furos.

2.3.3. Modelo Lagrangeano – Remoção de Inclusões

A parte final deste estudo fez uso de uma modelagem de partículas – *Lagrangeana*, onde, com base em um escoamento já resolvido numericamente, são inseridas partículas em estado sólido de diâmetro constante que se deslocam no escoamento. Para este estudo foram simuladas 10000 partículas com diâmetros de 10, 50, 100 e 200 μm . Com vistas a analisar a possível remoção de inclusões pela camada de escória, define-se uma condição de colisão 100% inelástica na região do topo do molde – escória de perfeita absorção, e para todas as outras paredes condição completamente reflexiva. As partículas são inseridas pela mesma região de entrada do aço e são impelidas pela velocidade desenvolvida pelo escoamento. Os resultados são apresentados por meio de figuras que mostram a posição e as linhas de deslocamento percorridas por algumas das partículas de todo o universo inserido. A **Figura 14** apresenta uma primeira análise, baseada em verificar o comportamento das trajetórias das partículas de cada um dos quatro diâmetros testados, para os dois tipos de válvula. Para todas as comparações foram usadas as condições de 200A de agitação. Percebe-se que a principal influência se deve ao fato de as partículas serem carregadas pelo escoamento e assim governadas pelos jatos de saída das válvulas: a de 1 furo, leva as partículas para o centro do molde minimizando o efeito de agitação; a válvula de 4 furos facilita a remoção pelo topo, uma vez que as partículas são liberadas muito próximas ao menisco e as que descem entram mais facilmente no efeito do escoamento rotacional.

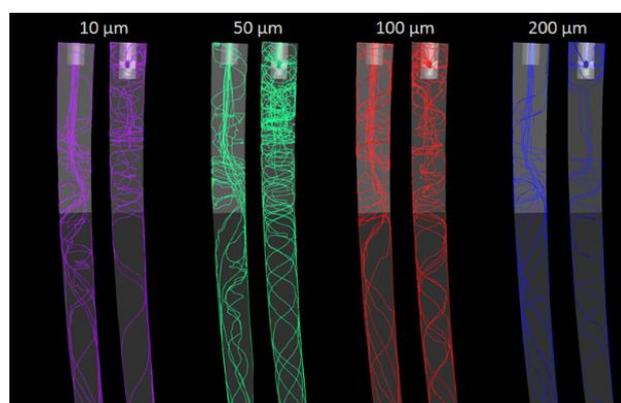


Figura 14. Trajetória de partículas de 10, 50, 100 e 200 μm para válvulas de 1 furo e de 4 furos – Condição de operação: 200 A.

Pode-se analisar o efeito da agitação sobre a disposição das partículas, comparando diferentes intensidades de corrente. Analisando a **Figura 15a**, que mostra a disposição no caso sem agitação, percebe-se o mesmo comportamento observado anteriormente, mostrado entre os dois grupos de válvulas. No caso do Grupo 1 (Válvula de 1 furo), a preferência é pela localização na face curva e no caso do Grupo 2 (válvula de 4 furos), a disposição é mais periférica. No caso do Grupo dois, mesmo com a ausência de agitação eletromagnética, percebe-se a tendência de giro. Como já visto anteriormente, isso se deve ao tipo de escoamento gerado pela válvula 4 furos.

No caso da agitação de 300 A (**Figura 15b**), para a válvula de 1 furo, também é possível notar as partículas tendendo à periferia. Estas análises de inclusões feitas até aqui foram baseadas em características qualitativas da disposição geométrica das partículas. Devido ao fato de ter se definido uma região de “remoção” das inclusões (partículas que atingem o menisco passam a ter sua velocidade anulada), é possível fazer uma análise quantificando o número de partículas que deixam o domínio.

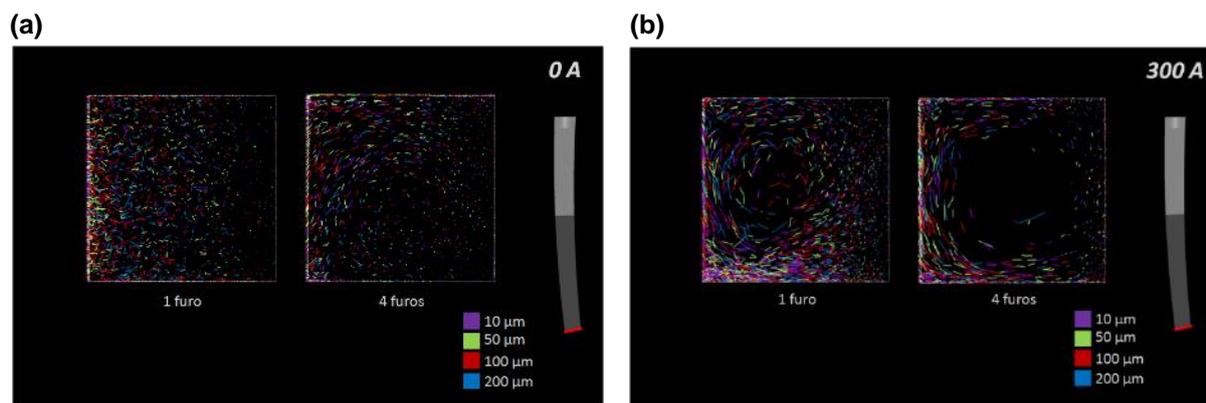


Figura 15. Efeito da agitação nas partículas inclusionárias no veio para válvula de 1 furo e de 4 furos. (a) 0 A. (b) 300 A.

A tentativa é correlacionar o diâmetro das inclusões com o porcentual removido variando a intensidade de agitação empregada. Como se pode ver na **Figura 16a**, em termos quantitativos, o caso sem agitação (1 furo) mostra que as partículas de maior diâmetro (200 μm) tendem a aderir ao topo, com remoção da ordem de 35%, sendo que as partículas menores têm remoção menor do que 5%. Quando se compara o efeito da agitação eletromagnética sobre a remoção, percebe-se que aumenta para as partículas de menor diâmetro, na ordem de 15 a 25%, porém não se altera a remoção das partículas de maior diâmetro.

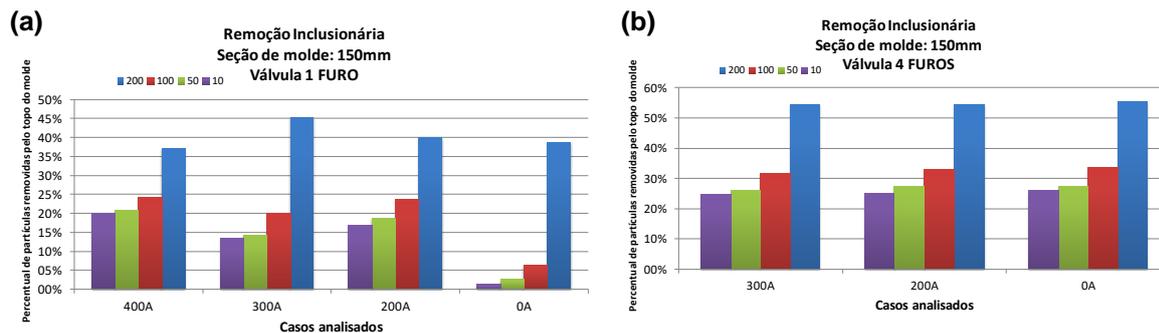


Figura 16. Remoção inclusionária. (a) Válvula de 1 furo -Grupo 1. (b) Válvula de 4 furos – Grupo 2.

Na análise dos casos Grupo 2 – Válvula com 4 furos (**Figura 16b**), percebe-se que a remoção pelo topo acontece de forma bem mais efetiva, fato que se explica novamente, pela proximidade da entrada do jato ao menisco. Neste caso, a intensidade de agitação eletromagnética não se mostra relevante na remoção inclusionária.

3 CONCLUSÕES

Através do uso de modelamento foi possível caracterizar o equipamento de agitação eletromagnética produzindo de forma satisfatória o funcionamento do equipamento, verificado com comparação dos resultados com medições realizadas pelo fabricante do equipamento. Com base nesta modelagem, um modelo fluidodinâmico foi desenvolvido para representar o escoamento do aço no interior do molde, acoplado as forças eletromagnéticas. Foram testados alguns casos, combinando geometrias diferentes (1 e 4 furos) numa mesma geometria de seção transversal do molde. Juntamente com a modelagem do escoamento foi calculado também o modelo térmico que permitiu analisar a remoção de calor no molde e pelas paredes do tarugo. Neste estudo mostrou-se que o uso de agitação eletromagnética aumenta e extração de calor do molde tornando mais homogênea a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal. Acoplado ao modelo de escoamento também se empregou uma metodologia de cálculo de partículas sólida – modelo Lagrangeano. Esta modelagem serviu para determinar a porcentagem de partículas removidas do domínio, com o uso de diferentes tipos de válvulas e variando a intensidade de agitação.

Com base nas simulações numéricas, diante das condições de estabelecidas, verificou-se que:

- O agitador eletromagnético se torna mais efetivo a partir de 300 A para válvulas de 1 furo.
- O uso da válvula submersa de 4 furos não se mostra relevante na remoção inclusionária, independentemente da intensidade de agitação eletromagnética, devido ao escoamento imposto no domínio.
- As partículas inclusionárias tendem a dispersar em direção a interface metal/molde, não ocorrendo aglomeração no centro do veio.
- A intensidade da agitação magnética é preponderante na remoção de temperatura, diminuindo o comprimento metalúrgico durante o processo de

lingotamento, capaz de melhorar a qualidade do produto no processo de lingotamento contínuo.

REFERÊNCIAS

- 1 Kunstreich S. Eletromagnetic stirring for continuous casting– (Part 2). La Revue de Metalurgie. 2003; 1043-1061.
- 2 Garcia A. Solidificação fundamentos e aplicações. Campinas: Editora Unicamp; São Paulo; 2001.
- 3 Committee on Technology Continuous casting of Steel 1985 – A second Study. International Iron and Steel Institute. Brussels; 1986.
- 4 Aboutalebi M. The effect of the direction of SEN exit ports on fluid flows in a square billet casting mold. 9th ECCC- European Conference of Continuous Casting, Viena; 2017: 811-820.
- 5 Lei R et al. Water modelling on multiphase fluid flow in a continuous casting mold. 9th ECCC- European Conference of Continuous Casting, Viena; 2017: 868-874.
- 6 Nadalon, E. Modelagem numérica da interface metal-escória em moldes de seção circular sob efeito de agitação eletromagnética no lingotamento contínuo de aço. Dissertação de mestrado, PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- 7 Ansys/CFX User Manual. 2012.
- 8 Trindade et al. Numerical Modeling of Inclusion Removal in Electromagnetic Stirred Steel Billets. Steel Research Int. 78, No. 7, 2009.
- 9 Quan Y et al. Study of transient flow on particle transport in continuous casting steel caster molds: part 1. Fluid Flow. Metallurgical and materials transactions B, vol 35B, 2004: 685-702.
- 10 Z. Xiao, Y. Peng and C. Liu: Chin. J. Mater. Sci. Technical, 3 (1987), 187.