



# VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA NUMÉRICA PARA PREDIÇÃO DE ARRASTE DE ESCÓRIA EM MOLDES CIRCULARES NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS ESPECIAIS<sup>1</sup>

*José Ernesto de Azevedo Nadalon<sup>2</sup>  
Leonardo Barboza Trindade<sup>3</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>4</sup>  
Oswaldo Alves Ferreira Neto<sup>5</sup>  
Priscila Paulina de Oliveira<sup>6</sup>  
Rubens de Paula Machado<sup>7</sup>*

## Resumo

A agitação do aço líquido promovida pelos agitadores eletromagnéticos (EMS), além de favorecer a flotação inclusionária, aumenta a extração de calor no molde, o que proporciona maior zona equiaxial de solidificação. Porém, uma agitação excessiva pode arrastar a escória do topo do molde, potencializando a formação de defeitos no tarugo. Este trabalho visa validar uma metodologia numérica de predição das condições de agitação críticas para a ocorrência de arraste no molde durante o lingotamento contínuo (LC). O estudo é baseado em um modelo físico, que simula o comportamento da interface líquido-líquido no interior de um molde circular sob efeito de condições de agitação, similares às promovidas pelo EMS. Foram avaliadas as deformações da interface aço-escória, bem como as condições críticas de velocidade que evidenciam início de arraste de escória. A comparação entre os modelos, numérico e físico, apresentou boa concordância, indicando que a metodologia numérica pode ser empregada para reproduzir as condições de prática operacional da planta.

**Palavras-chave:** Arraste de escória; Agitação eletromagnética; Lingotamento contínuo; Modelagem física; Simulação numérica.

## VALIDATION OF A NUMERICAL PROCEDURE TO THE PREDICTION OF SLAG ENTRAPMENT IN THE CIRCULAR MOULDS IN THE SPECIAL STEEL CONTINUOUS CASTING

### Abstract

The liquid steel stirring by the electromagnetic stirrer (EMS), in addition to the inclusions flotation, enhances the heat extraction in the mould, promoting an increasing in the equiaxed solidification area. However, an excessive stirring can drag the slag from the top of the mould, causing the formation of defects in the billets. This study aims to validate a numerical procedure to predict the critical velocity condition for the occurrence of slag entrapment in the mould during the continuous casting. Based on a physical model, that simulates the behavior of a liquid-liquid interface under effect of a rotational stirrer, similar to those provided by EMS. The deformation of the interface was evaluated, as well the critical speed in the interface before the slag entrapment occurs. The comparison between the models, numerical and physical, showed good agreement, which means that the procedure can be used to reproduce the conditions of practice operating in the steel plant.

**Key-words:** Slag entrapment; Electromagnetic stirring; Continuous casting; Numerical simulation; Physical model.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Civil, Doutorando em Engenharia Metalúrgica, PPGEM/UFRGS.*

<sup>3</sup> *Físico, Dr. Eng. Metalúrgica – Diretor da Science, Technology & Engineering – STE*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalúrgico, Dr. –Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID*

<sup>5</sup> *Engenheiro de Qualidade de Produto, Pesquisa e Desenvolvimento – V&M Brasil.*

<sup>6</sup> *Engenheira de Pesquisa e Desenvolvimento – V&M Brasil.*

<sup>7</sup> *Coordenador de Processo de Aciaria – V&M Brasil.*



## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento do aço líquido no molde pode causar perturbações no menisco que facilitam o desprendimento de gotas de escória líquida da interface aço-escória. Essas perturbações podem ser potencializadas com o uso de agitadores eletromagnéticos (EMS). O comportamento da interface metal-escória em moldes de tarugos está intimamente ligado à ocorrência de arraste de pó-fluxante fundido para o interior da peça em solidificação.

Estudos apontam que o uso de EMS no processo de lingotamento contínuo (LC) altera o escoamento do aço no molde, tornando-o rotacional.<sup>(1)</sup> É esta característica rotacional que aumenta a velocidade do aço junto à interface, facilitando o arraste de escória. Alguns trabalhos já publicados mostram como o uso de ferramentas numéricas pode auxiliar na compreensão destes fenômenos de interface quando do uso de agitação eletromagnética em moldes.<sup>(2-4)</sup>

O objetivo deste trabalho é apresentar a *validação da* modelagem numérica empregada em estudos de arraste de escória no molde, na planta da *V&M do Brasil*, comparando os resultados com observações feitas em modelo físico.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Modelo Físico

A Figura 1 mostra o modelo em acrílico com o agitador mecânico acoplado.



(a) Modelo em acrílico do molde se seção circular



(b) Detalhe superior modelo onde é possível ver o agitador mecânico usado

**Figura 1:** Modelo físico do molde em acrílico, com o agitador mecânico.

O modelo busca reproduzir as condições de escoamento que ocorrem no interior do molde de seção circular. No topo da caixa de acrílico foi colocada uma estrutura cilíndrica representando a válvula submersa com dimensões e posicionamento conforme o equipamento em planta. Para fins de simplificação, o efeito da agitação foi alcançado usando um agitador mecânico de bancada. Foi empregada uma hélice do tipo âncora que proporciona um escoamento rotacional semelhante ao gerado pelo agitador eletromagnético. O posicionamento da haleta foi determinado com o objetivo de que o torque máximo produzido pelo agitador mecânico ocorresse na mesma região, relativa ao topo do molde, em que o agitador eletromagnético atua na prática.

O modelo a frio usa como fluidos de simulação água e querosene pigmentado, que representam respectivamente o aço e a escória. Para isso, o



modelo se vale da similaridade fluidodinâmica entre os fluidos simulados em suas temperaturas de trabalho.<sup>(5)</sup> O nível de água e a espessura da camada de querosene respeitam as condições reais de operação. As características simuladas pela modelagem físicas estão na Tabela 1.

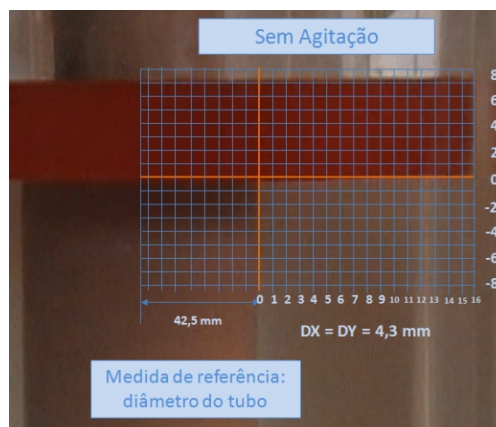
**Tabela 1:** Características geométricas do modelo

Seção do molde (mm)	230
Comprimento do molde (mm)	700
Diâmetro da válvula submersa (mm)	85
Posição da hélice – relativa ao topo do molde (mm)	450
Submersão da válvula submersa (mm)	100
Velocidade de rotação (RPM)	200 / 300 / 400
Borda livre (mm)	70
Espessura da camada de querosene (mm)	30

O foco de interesse deste estudo é o comportamento da interface líquido/líquido, de forma a verificar a rotação limite para o início do desprendimento de gotas de querosene, que podem ser arrastadas para dentro do escoamento da água. Para tanto, foram capturadas imagens do modelo em operação para posterior análise da deformação média, em cada um dos três valores de rotação (Tabela 1) a que a hélice foi submetida. Foi usada uma câmera digital posicionada em frente ao modelo de forma a capturar em vídeo os fenômenos transientes de oscilação da interface. Foram selecionadas algumas imagens (*frames*) representativas de um instante no tempo, em cada uma das agitações testadas. Além de avaliar a deformação, foi possível constatar também a velocidade crítica de giro, para a qual se verifica o arraste da camada de querosene.

Usando as imagens instantâneas, foi possível mapear a deformação relativa da linha da interface com relação à posição inicial de repouso. O mapeamento é construído com base em uma malha cartesiana que é discretizada com deslocamentos verticais e horizontais com passos constantes, como mostra a

Figura 2. As imagens instantâneas de cada velocidade de agitação, aplicadas nesse mapa cartesiano, possibilitam a obtenção das curvas de deslocamento relativo da interface.



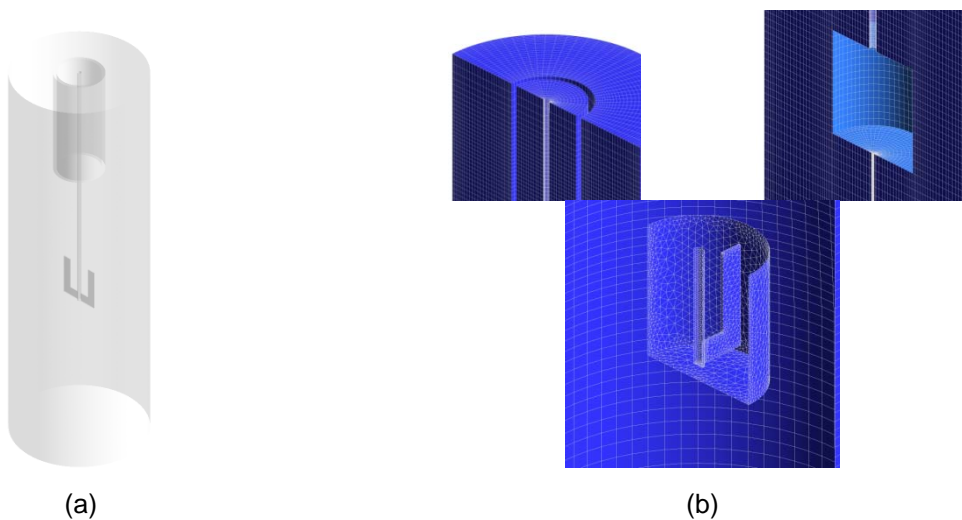
**Figura 2:** Diagrama cartesiano empregado na análise de deformação da interface.



### 2.2 Modelo Numérico

A modelagem numérica visa reproduzir os ensaios em modelo físico, de forma a verificar se o modelo matemático e a metodologia numérica empregados são capazes de representar a deformação verificada na condição real de funcionamento do agitador mecânico.

Para a construção do modelo numérico é necessário que todas as características geométricas do experimento físico sejam usadas, para simular exatamente as mesmas condições de teste em laboratório. Com base nas dimensões e características já citadas na Tabela 1, uma geometria computacional foi desenvolvida e posteriormente discretizada em volumes finitos, gerando a malha computacional. O domínio de cálculo e os detalhes da malha gerada podem ser vistos na Figura 3.



**Figura 3:** Geometria (a) e malha (b) do domínio de cálculo para o modelo numérico.

Este problema tem como principais características fluidodinâmicas ser turbulento e transiente. Estes são dois parâmetros importantes na decisão de qual modelo deve ser empregado para a solução numérica. Pensando nessas características, usando o software ANSYS CFX 11, optou-se pelo modelo de turbulência, *SSG – Reynolds Stress Model* calculado de forma transiente. Para tratar o fenômeno de interface, se fez uso de um modelo de superfície livre chamado *Free Surface Model*. O sistema analisado teve uma simulação de aproximadamente 10 s (tempo real) para cada uma das rotações, de forma poder ser comparado com as simulações em modelo físico. Maiores informações sobre estes modelos podem ser encontradas no manual do software.<sup>(6)</sup>

As simulações seguiram as mesmas características que foram executadas na modelagem física. Além das características geométricas já apresentadas na Tabela 1, as características físicas dos fluidos estão na Tabela 2.



**Tabela 2:** Características físicas dos fluidos simulados

Variável	ÁGUA	QUEROSENE	AR
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	997	791	1,185
Viscosidade [Pa.s]	8,90E-04	2,25E-03	1,82E-05
Tensão Interfacial [N/m]	0,045 (água/querosene)		
	0,072 (querosene/ar)		

Após executadas essas simulações alguns resultados foram analisados: campo de velocidades, visando a verificação do escoamento proporcionado pelo agitador mecânico; mapa de fração volumétrica para evidenciar a interface entre os fluidos; e a plotagem da deformação relativa da interface. Estes gráficos foram comparados com os resultados gerados pela modelagem física. As evidências de arraste do modelo físico foram comparadas com as análises feitas com base nos resultados do modelo numérico, de números adimensionais como *Weber* (*We*) e também pelo cálculo de velocidade crítica de arraste definido pela literatura.<sup>(7)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Comparação entre as Modelagens Física e Numérica

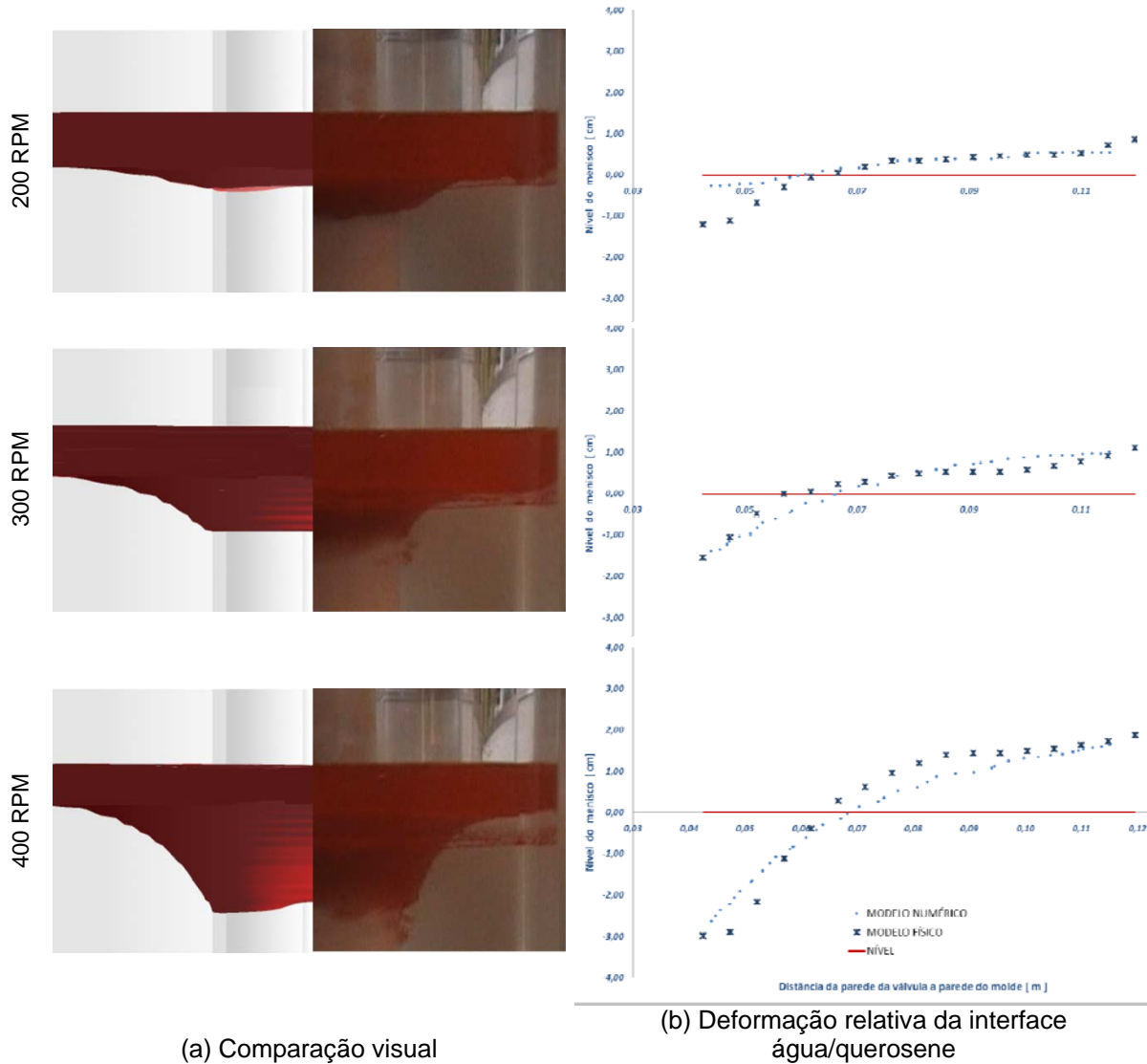
A Figura 4 apresenta o comportamento da interface entre a água e o querosene nas rotações testadas. A análise inicial dos resultados dos modelos é feita visualmente, por meio de comparação direta das imagens geradas por cada uma das metodologias descritas, visto na Figura 4-a. Evidencia-se a tendência de aumento da deformação da interface com o aumento da velocidade de giro da hélice.

Como descrito anteriormente, com base nas imagens capturadas, tornou-se possível quantificar os deslocamentos verificados no modelo físico. Os resultados da modelagem numérica também possibilitam mensurar a deformação, através do mapeamento da interface. A Figura 4-b mostra a comparação entre os gráficos de deformação de cada um dos modelos.

A deformação para a rotação de 200 RPM é bem tênue. Percebe-se um pequeno deslocamento com relação à posição inicial, aproximadamente 1 cm. Para esta rotação, os resultados do modelo numérico se mostram um pouco diferentes dos mostrados pela modelagem física, onde a interface se deforma bem mais junto a parede da válvula. Isto se deve às condições de operação do agitador mecânico usado, que para rotações baixas, apresenta variações de giro.

No caso de 300 RPM, ainda não se percebe o desprendimento efetivo de gotas de querosene, mas já se verifica uma deformação bem mais acentuada, da ordem de 3 cm. Neste caso, os modelos concordam bem na comparação entre as interfaces deslocadas.

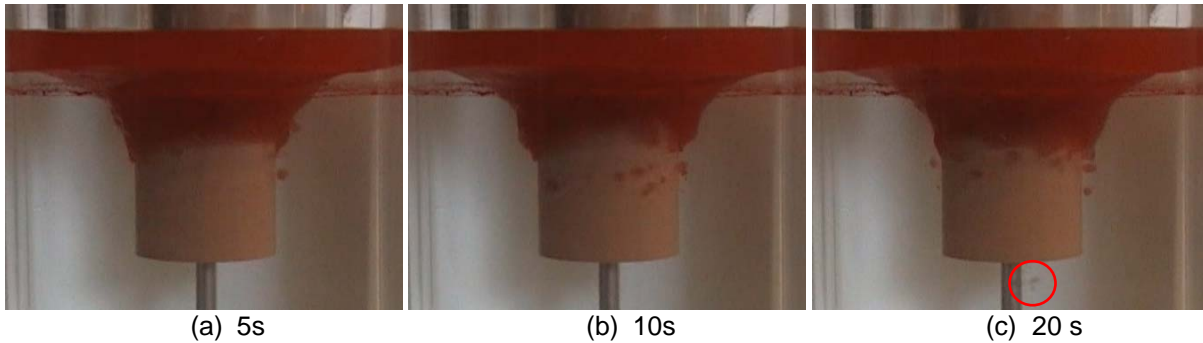
A rotação de 400 RPM apresenta deformação da ordem de 5 cm, e também se verifica uma boa concordância entre os modelos físico e numérico. O ensaio físico mostra o início do arraste para esta rotação.



**Figura 4:** Comparação qualitativa e quantitativa da deformação da interface nos modelos físico e numérico.

Na comparação das imagens acima, não fica evidente a ocorrência do arraste para a agitação de 400 RPM. Isto se deve ao fato de as imagens selecionadas para a análise qualitativa e quantitativa da deformação não captarem, naquele instante de tempo, o desprendimento de alguma gota de querosene. Quando se analisa de forma a não dar destaque a interface, mostrando um plano mais aberto da imagem, podemos ver o final do tubo representando a válvula submersa. Na Figura 5, observam-se imagens da válvula de forma mais ampla, representantes de diferentes instantes de tempo da simulação física, mostram as gotas de querosene sendo arrancadas da camada superior e arrastadas para o interior do escoamento, evidenciando o arraste.

A Figura 5-(a) mostra que nos instantes iniciais já nota-se uma grande gota se desprendendo da camada superior. Aos 10 s (Figura 5-b), o número de gotas aumenta significativamente e depois de 20 s, já é possível notar gotas sendo levadas abaixo da válvula submersa, como apontado na Figura 5-c.

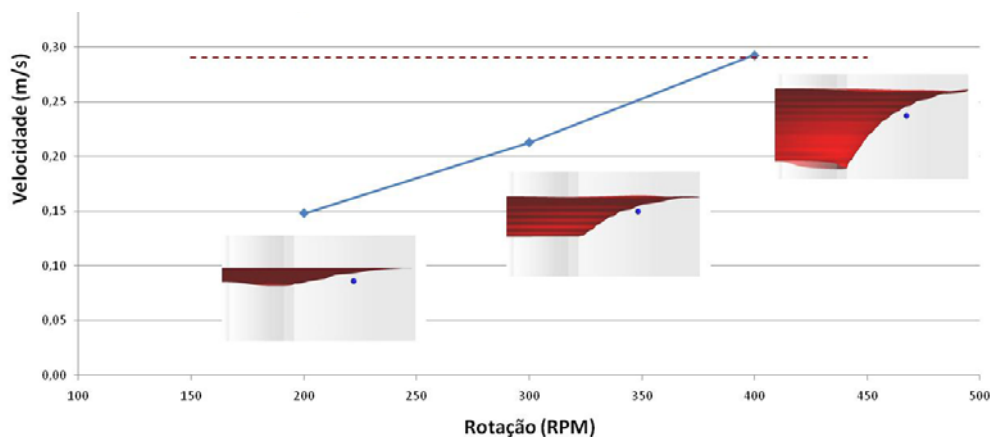


**Figura 5:** Evidência da ocorrência de arraste para a agitação de 400 RPM, em três diferentes instantes do ensaio em modelo físico.

Uma análise das imagens e perfis médios no tempo aponta para uma boa concordância entre os modelos. No entanto, os resultados numéricos apresentam uma interface coesa, onde não é possível verificar o desprendimento de gotas. Por outro lado, o modelo numérico é capaz de dar informações bastante importantes acerca da possibilidade de arraste. O arraste da camada de querosene é função da velocidade do fluido e de outras variáveis. Segundo Felbauer,<sup>(7)</sup> a ocorrência de arraste está associada à tensão interfacial e à diferença de velocidade entre os fluidos, conforme indica a equação (1):

$$V_{crit} = \left[ \frac{48 \cdot g \cdot \gamma \cdot \Delta\rho}{\rho_{slag}^2} \right]^{1/4} \quad (1)$$

Usando os resultados do modelo numérico é possível analisar a possibilidade de arraste da camada de querosene. Com os valores da Tabela 2, aplicados à fórmula de *Feldbauer*, resulta uma velocidade crítica na interface igual a **0,29 m/s**. A Figura 6 mostra os valores de velocidade calculados pelo modelo numérico, em um ponto bem próximo da interface.



**Figura 6:** Valores de velocidade de água na interface com o querosene.

A Figura 6 mostra que, para os valores de rotação analisados pelo modelo numérico, no caso 400 RPM a velocidade na interface é muito próxima da crítica. Ao mesmo tempo, as imagens transientes mostram que para rotações acima de 400 RPM há desprendimento de gotas da camada de querosene.



O arraste de querosene não foi verificado no modelo numérico provavelmente por ser uma limitação do modelo de interface *Free Surface*, que tende a “segurar” mais a interface. Acredita-se que este modelo não resolve bem as duas fases quando elas estão na forma dispersa, ou seja, gotas de querosene na água ou vice-versa. Isto não invalida os resultados do modelo, pois em outros aspectos o modelo se mostra bem coerente, como será oportunamente mostrado.

Ainda na tentativa verificar situações limites para a ocorrência de arraste entre as fases, também se pode usar comparações do número de *Weber* (*We*), que correlaciona forças inerciais e forças de tensão interfacial, podendo ser calculado pela equação 2:

$$We = \frac{v_{\text{água}}^2 \cdot \rho_{\text{água}}}{(\gamma \cdot (\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{querosene}}))^{1/2}} \quad (2)$$

Usando a equação 2, é possível verificar o *We* na superfície de interface entre os fluidos, e compará-los com o valor crítico que, segundo a literatura,<sup>(7)</sup> para a ocorrência de arraste é definido como sendo 12. Estes resultados podem ser visualizados na Figura 7:

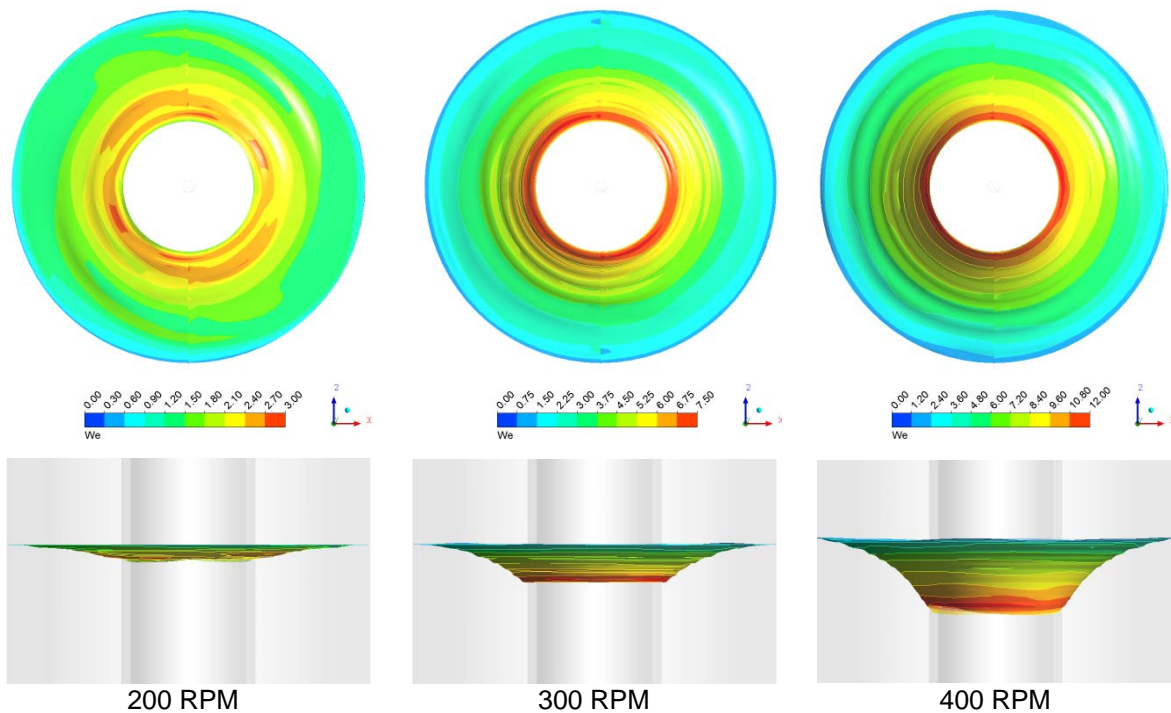


Figura 7: Mapas de *We* na interface água/querosene.

Com a ajuda desses mapas, é possível verificar que o *We* crítico só é atingido para a rotação de 400 RPM, o que corrobora com os resultados apresentados até agora que mostraram que a essa deve ser a rotação limite para que não ocorra o arraste da camada de querosene.

Estes resultados mostram que tanto o modelo físico quanto o numérico apresentam as mesmas características principais: evidenciam o escoamento rotacional, apresentam deformação da interface que varia com o aumento da rotação da hélice do agitador e que é possível associar uma rotação máxima, traduzida em uma velocidade de giro na interface, a possibilidade ou não de arraste da camada de querosene.





## 4 CONCLUSÕES

O modelo físico usado neste trabalho é capaz de mostrar o início de arraste da camada de querosene (escória) quando da variação da intensidade de agitação do sistema. Além disso, foi possível a aquisição de imagens que serviram como base de comparação com os resultados da modelagem numérica do mesmo sistema.

Com relação ao modelo numérico, observou-se a boa concordância dos perfis de deformação relativa apresentados pelo modelo físico. Mesmo que o modelo adotado não seja o mais adequado para a visualização efetiva do desprendimento das gotas de querosene, a comparação de outras variáveis pode ser um bom indicativo de validação. Tanto a comparação dos valores de velocidade crítica na interface, quanto os valores de  $We$  apontam para que o uso de rotações da ordem de 400 RPM apresente maior probabilidade de ocorrência de arraste. Este resultado concorda com os resultados obtidos pela simulação física.

Após a análise, estes resultados também concordam de forma bem satisfatória a modelagem numérica empregada. Com a validação, esta metodologia poderá agora ser empregada para avaliar a possibilidade de arraste de escória em um molde de lingotamento contínuo, sob efeito de agitação eletromagnética, em escala industrial.

## REFERÊNCIAS

- 1 NADALON, J. E. A. Modelagem Numérica da Interface Metal-Escória em Moldes de Seção Circular Sob Efeito de Agitação Eletromagnética no Lingotamento Contínuo de Aço, Dissertação (mestrado), PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- 2 NADALON, J. E. A. Modelagem Numérica da Interface Metal-Escória Sob Efeito de Agitação Eletromagnética no Lingotamento Contínuo de Aço, In: Seminário de Aciaria - Internacional, ABM, Porto Alegre, 2006.
- 3 HANQUE, J. N. *et al.* Modeling Turbulent Flow wit Free-Surface in Unbaffled Agitated Vessel, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Volume 45, p. 2881-2891, 2006
- 4 VERZICCO, R. *et al.* Flow in an Impeller Stirred Tank Using an Immersed Boundary Method, Center of Turbulence Research, Annual Reference Briefs 2000, p. 251-261
- 5 FREITAS, S. L. Estudo do Escoamento e do Arraste no Molde de Lingotamento Contínuo, Dissertação (mestrado), PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- 6 ANSYS CFX MANUAL – Solver Manual. Ansys Technology, Release CFX 11.
- 7 FELDBAUER, S.; CRAMB, A. W. Insights into Slag in the Mold of a Continuous Caster, In: PTD CONFERENCE, 13., 1995, Nashvill, TN. p. 327-339, 1995.