

# MODELAMENTO FÍSICO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA CAMADA DE ESCÓRIA NUMA PANELA AGITADA COM GÁS<sup>1</sup>

Leonardo Barboza Trindade<sup>2</sup>  
Júlio Aníbal Morales Pereira<sup>3</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>4</sup>

A presença de uma camada de escória é usual nas operações de fabricação do aço. Durante o tratamento de agitação do aço líquido desenvolve-se na superfície do banho uma área não coberta pela escória denominada “olho”, pela qual reações indesejáveis irão ocorrer com o ar (reoxidação). Simultaneamente, na interface banho-escória, se desenvolvem fenômenos de emulsificação que auxiliam na aceleração das reações de refino, mas que em altas vazões de gás pode ser uma fonte de geração de inclusões.

Foram realizados ensaios em modelo físico usando água, ar e querosene para simular o aço, argônio e escória, respectivamente. Paralelamente, foram feitas simulações numéricas desse escoamento com o objetivo de comparar os resultados calculados com os experimentais. A abertura do olho na camada de querosene foi dimensionada em função da vazão de gás e das diferentes espessuras dessa camada. Os resultados mostraram uma relação linear entre a vazão de ar e o diâmetro de olho. Com o aumento na espessura da camada de escória, observou-se uma diminuição no diâmetro do olho.

A boa concordância entre o modelo físico e a simulação numérica permitirá que se possa construir um modelo numérico em escala plena do escoamento na panela. Esse modelo permitirá que se possa quantificar os fenômenos de emulsificação e arraste de escória com as propriedades físicas dos fluidos utilizados na prática.

Palavras-chaves: Modelamento físico, simulação numérica de fluidos (CFD), agitação por gás na panela.

---

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao XXXV SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, a ser realizado de 17 a 19 de maio de 2004 em Salvador – BA - Brasil.

<sup>2</sup> Físico, Dr., Pesquisador do LASID/CT/UFRGS, bolsista do CNPq

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Pesquisador do LASID/CT/UFRGS, bolsista do CNPq

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr-Ing, Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS

## 1. Introdução

A agitação do aço líquido através da injeção de gás argônio pode originar, na superfície do banho, uma área não coberta pela escória denominada “olho”. O controle da abertura do olho na camada de escória é de grande interesse industrial, particularmente para aços especiais, pois é neste local que reações indesejáveis entre o metal e o ar (reoxidação) poderão ocorrer. Por outro lado, essa abertura de olho também pode ser usada para a adição de ligas, evitando perdas para a escória. Para aços produzidos pelo processo VOD, a abertura de olho aumenta a eficiência das reações de descarburização (1-2). Dessa forma, o conhecimento e controle da abertura do olho na camada de escória, são cruciais para garantir a qualidade do aço produzido e a eficiência dos processos metalúrgicos.

Como já foi relatado na literatura (1-2), a abertura de olho na camada de escória depende da vazão de argônio, da espessura de escória, das propriedades físicas do aço e da escória. Estudos em modelos experimentais a frio têm sido realizados com o intuito de se compreender e controlar tal fenômeno. Obviamente, tais estudos não levam em consideração as reais propriedades físicas do aço e da escória, fazendo que com que seus resultados sejam difíceis de serem transportados para a realidade industrial.

A ferramenta de simulação numérica de escoamento (CFD) pode ser uma das soluções para resolver os fenômenos que não são abrangidos pelos modelos físicos. Existe uma série de trabalhos e estudos mostrando a utilização dessa ferramenta nos problemas de siderurgia e áreas afins.

Do ponto de vista de mecânica dos fluidos, o escoamento na panela se caracteriza por ser trifásico (aço-escória-argônio), tridimensional, transiente e turbulento. Essa combinação de fatores torna esse problema extremamente complexo e de difícil solução. Poucos trabalhos tratam desse problema, e em geral, são aproximados para duas dimensões (3-5).

O objetivo desse trabalho é analisar o escoamento aço-escória-argônio em uma panela siderúrgica em escala 1:3. Esse estudo será feito usando um modelo físico construído em acrílico e um modelo numérico empregando a formulação Euler-Euler (6) para o tratamento das fases líquidas. Como primeira aproximação, o modelo numérico simulará as mesmas condições e fluidos empregados no modelo experimental a fim de validar as aproximações e modelos matemáticos empregados. Os fluidos serão água, querosene e ar para simular o aço, escória e argônio, respectivamente

A análise do escoamento consistirá em calcular e medir o diâmetro de abertura do olho na escória em função de variáveis típicas da prática industrial: vazão de argônio e espessura da camada de escória.

## 2. Modelo matemático do escoamento trifásico

As seguintes aproximações foram consideradas para o modelo numérico:

- (a) O escoamento foi resolvido no estado estacionário;
- (b) Foram consideradas as forças de empuxo e arraste sobre as bolhas de gás;
- (c) Os diâmetros de bolha foram calculados de acordo com o valor de vazão (7), com um diâmetro médio de 20 mm;

## Escoamento estacionário multifásico

O escoamento multifásico, tridimensional, turbulento e estacionário foi representado pela equação da continuidade e pela equação de Navier-Stokes para cada uma das fases. A turbulência foi resolvida pelo modelo  $k-\varepsilon$  homogêneo. A água e o querosene foram tratados como fases líquidas e contínuas, ao passo que o ar foi tratado como uma fase gasosa e dispersa. O acoplamento entre os campos de velocidade foi feito por um modelo de arraste, enquanto que o campo de pressões é igual para as duas fases. Toda a formulação para escoamento multifásico pode ser encontrada na literatura (6).

## Condições de contorno

Injeção de gás: A partir da vazão de gás e da área do *plug* de injeção, foi calculado um perfil uniforme de velocidade para a fase gasosa. As fases líquidas têm fração volumétrica zero no *plug* de injeção. Para a turbulência foram considerados valores de baixa intensidade, ou seja, abaixo de 1%. A pressão nesta região é extrapolada a partir do valor na região de superfície de forma a garantir a vazão de ar especificada.

Paredes: Devido ao uso do modelo homogêneo de turbulência, foi aplicada a condição de não escorregamento para todas as fases e a região próxima à parede foi tratada usando a lei logarítmica da parede.

Superfície: A superfície foi considerada plana e com tensão de cisalhamento nula para as fases líquidas. A saída de gás pelo topo da panela é feita pelo uso da condição de contorno chamada *Degassing Boundary*.

A fase querosene foi inserida no modelo através de uma função degrau. A função degrau varia conforme a altura de querosene considerada no modelo.

## Geometria e malha do modelo numérico

Dimensões do modelo numérico em escala reduzida e parâmetros operacionais:

Altura inicial de água ( <b>h</b> ):	676,33 mm
Diâmetro maior ( <b>D<sub>maior</sub></b> ):	760,35 mm
Diâmetro menor ( <b>D<sub>menor</sub></b> ):	693,09 mm
Vazões ( <b>Q</b> )	12 l/min e 39 l/min
Espessuras de querosene ( <b>ΔS</b> )	16 mm e 40 mm

A Figura 1 mostra, em detalhe, a geometria e a malha computacional empregada no modelo numérico e a Figura 2 as frações volumétricas iniciais dos fluidos água (em azul) e querosene (em vermelho).

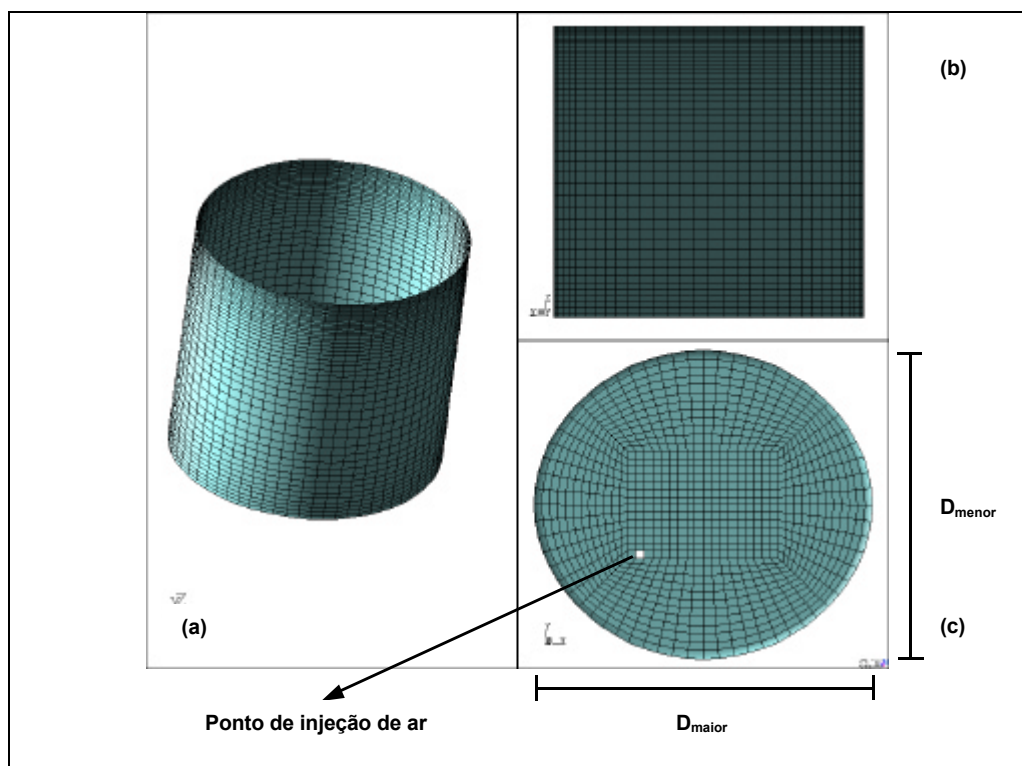


Figura 1 – Geometria e malha do modelo em três vistas: (a) perspectiva (b) vista lateral da panela e vista pelo fundo da panela. Na vista de fundo observa-se o ponto de injeção de ar.

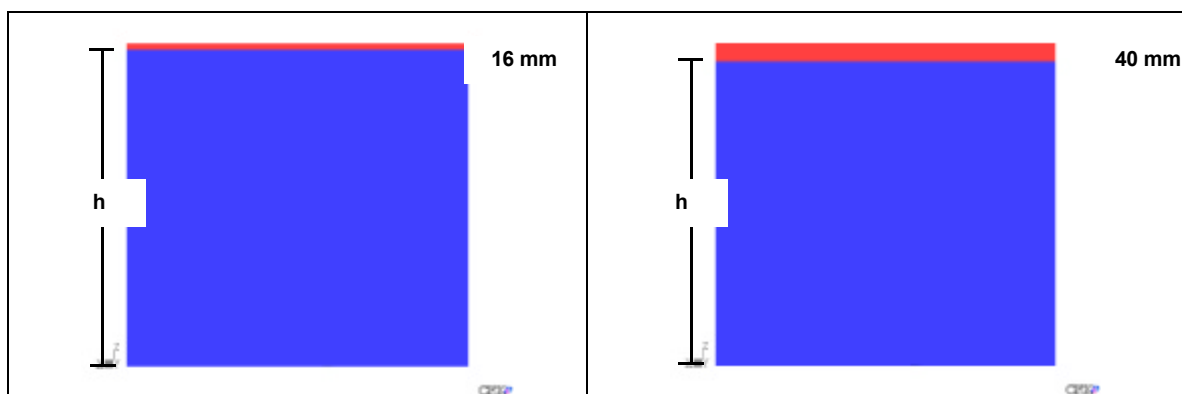


Figura 2 – Espessura inicial da camada de querosene, em vermelho. O fluido em azul representa a água.

### Procedimento numérico

Os resultados de simulação foram calculados em regime estacionário até a completa convergência das variáveis. O modelo foi construído e resolvido com o uso do pacote computacional CFX-5.6.

## Propriedades dos fluidos

Tanto para o modelo físico como para o modelo numérico foram utilizados os mesmos fluidos e as propriedades físicas são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos fluidos.

Propriedade	Valor (S. I.)
$\rho_{\text{água}}$	998 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{ar}}$	1,284 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{queros}}$	780 kg/m <sup>3</sup>
$\mu_{\text{água}}$	1,00 x 10 <sup>-3</sup> kg/m/s
$\mu_{\text{ar}}$	1,725 x 10 <sup>-5</sup> kg/m/s
$\mu_{\text{queros}}$	2,5 x 10 <sup>-3</sup> kg/m/s
$\sigma_{\text{água-ar}}$	0,072 N/m
$\sigma_{\text{água-queros}}$	0,03 N/m
$\sigma_{\text{queros-ar}}$	0,028 N/m

### 3. Modelo Físico

A Figura 3 mostra a representação esquemática da configuração experimental utilizada para o estudo do comportamento do tamanho do olho na camada de querosene.

O modelo físico da panela foi construído em acrílico (escala 1:3) e usa água a temperatura ambiente para simular o aço. O banho é agitado através da injeção de ar comprimido pelo fundo da panela na posição de injeção de gás PI. Para simular a escória industrial, uma camada de querosene pigmentado foi adicionada sobre a superfície da água.

#### Determinação do tamanho do olho

A variação do tamanho do olho foi avaliada para a posição de injeção de gás excêntrica (PI) em função de diferentes vazões de gás e espessuras de camada de escória.

As vazões de gás utilizadas no modelo físico foram 7, 12, 17, 22, 26 e 39 NI/min e uma espessura de camada de querosene de 16, 30 e 40 mm.

Para a análise quantitativa, a superfície do banho foi filmada por um período de 1 minuto sob agitação. Um total de (05) cinco imagens foram capturadas e processadas por meio de um software comercial Image Tools, de modo a obter-se um valor médio do tamanho do olho.

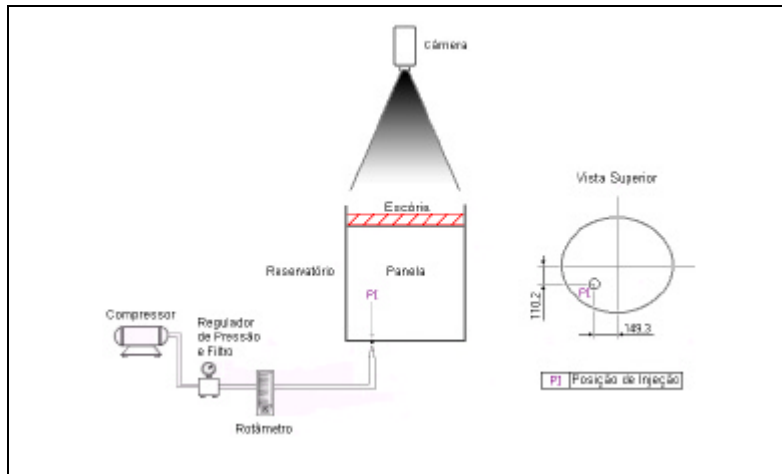


Figura 3 – Configuração experimental para a determinação do tamanho do olho.

#### 4. Resultados e discussão

A Figura 4a-b apresenta uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados experimentais da variação do tamanho do olho em função da vazão de gás e diferentes espessuras da camada de querosene. Como se pode observar, o tamanho do olho aumenta com o aumento da vazão de gás e tende a diminuir com o aumento da camada de querosene. Esses resultados estão coerentes com os publicados por outros investigadores (1,3,5).

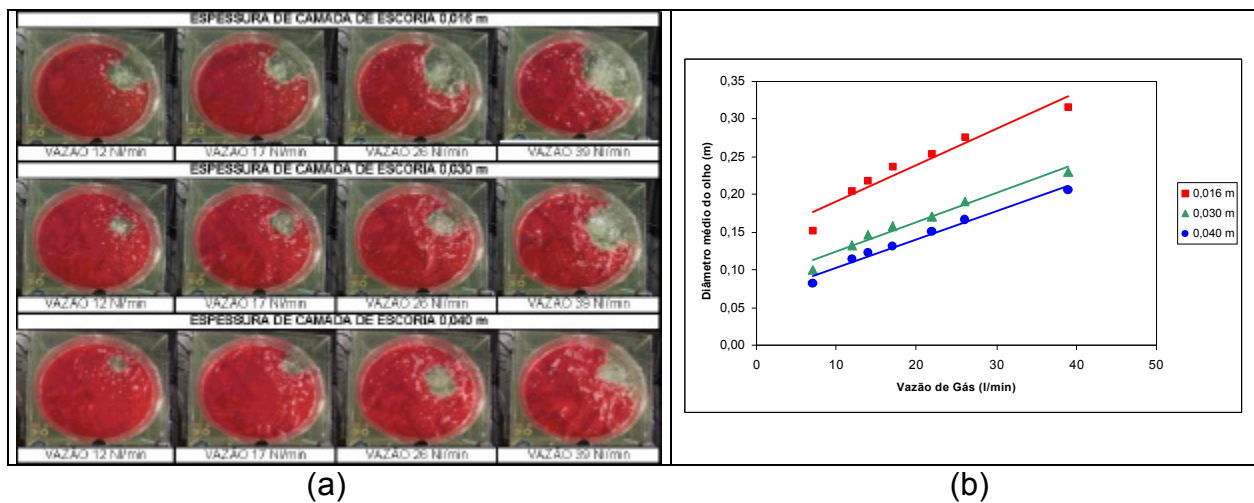


Figura 4-Tamanho do olho: (a) Vista superior do modelo físico e (b) tamanho do olho em função da vazão de gás e diferentes espessuras de querosene medidos via modelo físico.

É importante salientar que os resultados mostrados na Figura 4a-b são uma média no tempo, uma vez que se trata de um fenômeno dinâmico.

## Modelo físico x Modelo numérico

As simulações numéricas foram desenvolvidas para alguns casos do modelo físico a fim de validar a formulação matemática e o procedimento numérico. Foram escolhidos dois valores de vazão e duas espessuras de querosene, conforme citado no item 2.

Inicialmente são apresentados os resultados de simulação onde se observa em detalhe os vetores de velocidade do fluido água, a fração volumétrica de ar e a interface água-querosene (Figura 5).

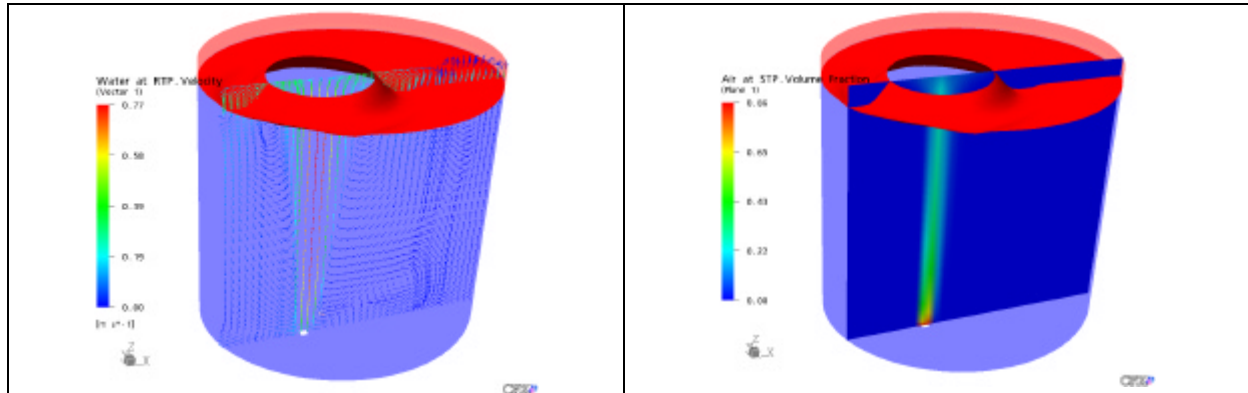


Figura 5 – (a) Vetores de velocidade da fase água e (b) fração volumétrica de ar com camada de querosene de 40 mm. Vazão de ar: 39 l/min.

A Figura 5 mostra claramente a abertura de olho na camada de querosene e sua relação com o escoamento e fração volumétrica de ar. A região de maior concentração de ar também é chamada de “pluma” e nessa região se observam as maiores velocidades do fluido.

A comparação entre os dois modelos foi feita através de figuras e gráficos de abertura de olho versus vazão e espessura de querosene. A Figura 6 abaixo apresenta a variação de diâmetro do olho em função da vazão e da espessura de querosene para os dois modelos.

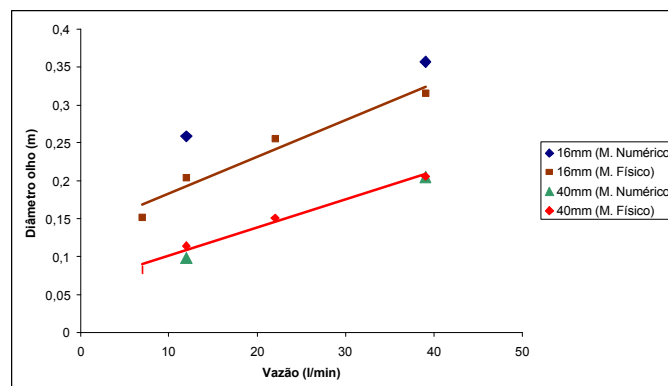


Figura 6 – Diâmetros médios medidos e calculados numericamente em função da vazão de ar e da espessura de querosene.

Comparando os diâmetros médios do olho para os dois modelos, observou-se uma boa concordância, principalmente para a maior espessura de querosene. A explicação está na maior instabilidade que ocorre em pequenas espessuras devido à maior probabilidade de se romper a camada de querosene. Assim como no modelo físico, no modelo numérico também se observou um aumento de diâmetro do olho com o aumento de vazão e com a diminuição da espessura de querosene. A Figura 7 mostra os mesmos resultados na forma de fotos obtidas sobre a panela.

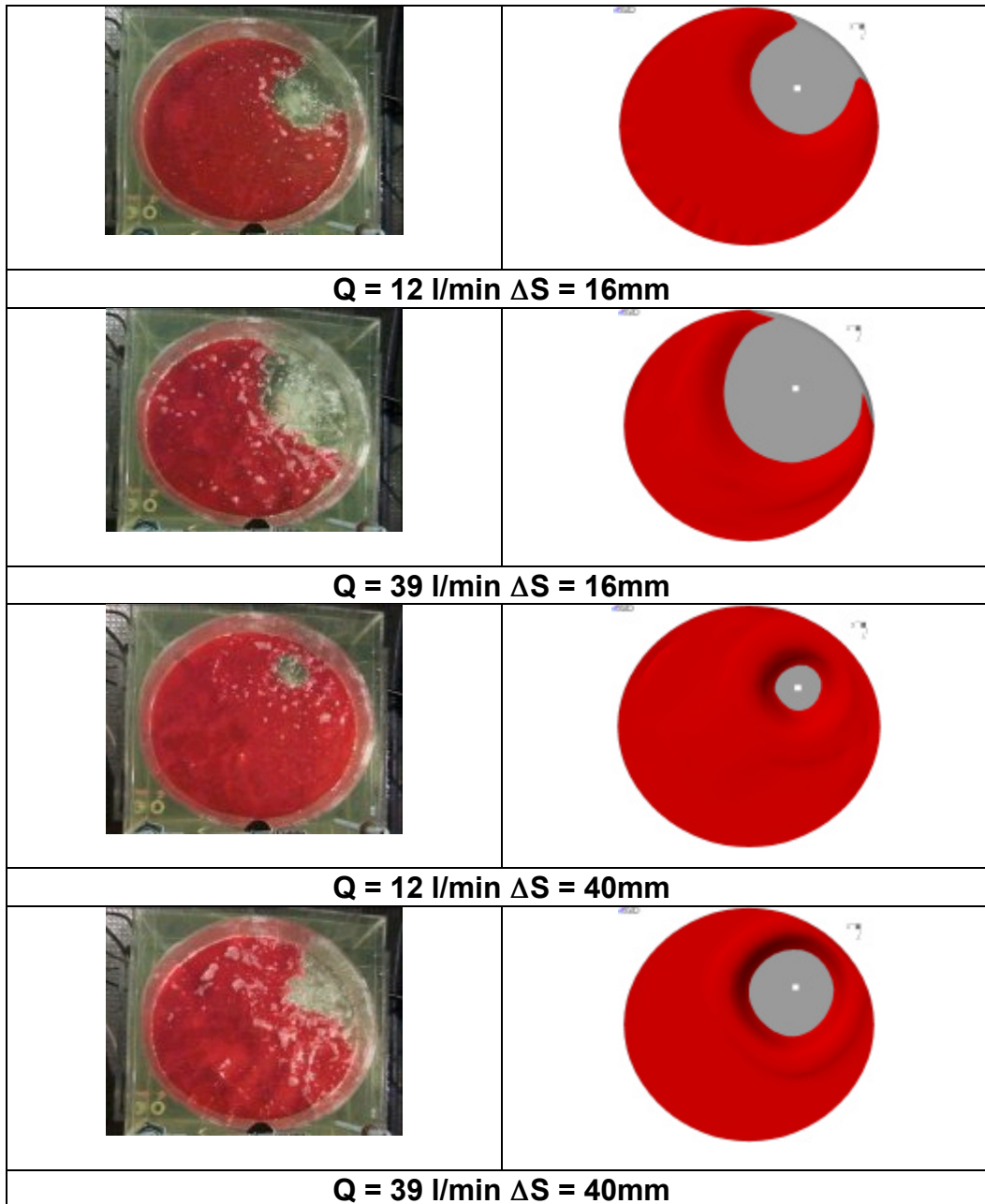


Figura 7 – Fotos do “olho” na camada de querosene para o modelo físico e modelo numérico. Abaixo de cada foto são mostradas as condições de operação: vazão (Q) e espessura de querosene ( $\Delta S$ ).



Através da Figura 7 observa-se que o modelo numérico apresenta uma interface água-querosene mais suave e menos instável. Isso se deve principalmente ao fato do modelo numérico ter sido calculado em regime estacionário e porque o mesmo não considera as reais instabilidades e deformações das bolhas de ar.

O modelo numérico não considera forças importantes decorrentes da interação água-ar e querosene-ar que são: *Lift Force* e a *Virtual Mass Force* (8).

## Conclusões

Através da análise dos resultados dos dois modelos, pode-se concluir que:

- Quanto maior a vazão maior o diâmetro do olho;
- Quanto maior a espessura de querosene menor o diâmetro do olho;
- Existe uma relação linear entre o aumento de vazão e o diâmetro do olho.

Os modelos apresentaram resultados muito próximos na representação do mesmo fenômeno. Essa semelhança nos resultados, apesar das aproximações numéricas e das pequenas diferenças observadas, possibilita que se possa desenvolver um modelo numérico com as condições reais de uma panela de aço.

Algumas medidas de olho na camada de escória já foram obtidas na prática industrial e servirão como validação do modelo numérico.

O modelo numérico trifásico servirá futuramente como uma ferramenta para se avaliar a composição química do aço junto com os modelos termodinâmicos.

## Agradecimentos

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

## Bibliografia

- (1) YONEZAWA K. e SCHWERDTFEGER K. **Metall. Trans. B**, V. 30B, June, p. 411-418, 1999.
- (2) SUBAGYO, BROOKS e IRONS. **ISIJ Int.**, V. 43, n°. 2, p. 262-263, 2003.
- (3) HAN J. W., et al. **ISIJ Int.**, V. 41, n°. 10, p. 1165-1173, 2001.
- (4) JONSSON L. e JÖNSSON P. **ISIJ Int.**, V. 36, n°. 9, p. 1127-1134, 1996.
- (5) GUO D. e IRONS G. A. **Metall. Trans. B**, V. 33B, June, p. 377-384, 2002.
- (6) PFLEGER D., et al. **Chemical Engineering Science**, V. 54, p. 5091-5099, 1999.
- (7) ZHANG L. e TANIGUCHI S. **ISS Transactions**, September, p. 55-79, 2001.
- (8) DEEN N. G. et al. **Chemical Engineering Science**, V. 56, p. 6341-6349, 2001.

# PHYSICAL MODELLING AND NUMERICAL SIMULATION OF THE SLAG LAYER BEHAVIOR IN A GAS-STIRRED LADLE <sup>1</sup>

Leonardo Barboza Trindade<sup>2</sup>  
Júlio Aníbal Morales Pereira<sup>3</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>4</sup>

In the steelmaking refining process it is common to use a slag layer covering the steel bath. During the steel stirring by argon, an area not covered by the slag, called “spout eyes”, develops on the bath surface where undesired side reactions with air can occur. Simultaneously, at the interface bath-slag, emulsification phenomenon that help the refining reactions develops, but in high flow rates it can give origin to inclusions.

Experiments were carried out in a physical model using water, air and kerosene to simulate the steel, argon and slag, respectively. At the same time, numerical simulations of this fluid flow were developed to compare with the experimental results. The spout eye on the kerosene layer was measured and calculated as function of the gas flow rate and the thickness of the layer. The results show a linear relationship between the gas flow rate and spout eye diameter. As the thickness of the layer increases the eye diameter decreases.

The good agreement between the physical model and the numerical simulations will create conditions to build a numerical model of a real ladle. With this model it will be possible to quantify the emulsification phenomenon and the slag entrapment that occur in the industrial practice.

**Key words:** Physical modelling, Computational Fluid Dynamics (CFD), gas-stirred ladle.

---

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao XXXV SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, a ser realizado de 17 a 19 de maio de 2004 em Salvador – BA - Brasil.

<sup>2</sup> Físico, Dr., Pesquisador do LASID/CT/UFRGS, bolsista do CNPq

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Pesquisador do LASID/CT/UFRGS, bolsista do CNPq

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr-Ing, Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS