



## **MODELAMENTO MATEMÁTICO E FÍSICO DO ESCOAMENTO NO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI**

### **Leonardo B Trindade**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Siderurgia, Cx. P. 15021 - 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil

### **André M Wollmann**

Gerdau Aços Finos Piratini, Charqueadas, RS, Brasil

### **Marco T M B de Vilhena**

### **Antônio C F Vilela**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEM, LASID, Porto Alegre, RS, Brasil

***Resumo.** Tanto o modelamento matemático como o modelamento físico têm sido utilizados para estudar o escoamento do aço líquido em distribuidores de lingotamento contínuo. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos com estes modelos para o distribuidor tipo Delta-T da Gerdau Aços Finos Piratini. Foi analisado o perfil de escoamento através da visualização de planos de laser para validar o modelo numérico e também estudado os efeitos de modificadores de fluxo (barreiras) através dos tempos de residência e dos vetores de velocidade. Com este estudo configurou-se um modificador de fluxo que melhora a flotação de inclusões no distribuidor analisado.*

***Palavras-chave:** Modelamento físico e matemático, Distribuidor e Lingotamento contínuo*

## **1. INTRODUÇÃO**

A Gerdau Aços Finos Piratini é uma planta de aços especiais. Ela produz cerca de 250.000 toneladas de produtos longos por ano via lingotamento contínuo, o que representa 95% da sua produção atual, de acordo com Soares et al (1998).

O Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul realiza estudos na área de lingotamento contínuo, envolvendo modelos físicos e numéricos do distribuidor e do molde. Trabalhos nesta área foram publicados por Trindade et al (1998) e Freitas et al (1999).

Com objetivo de otimizar a flotação de inclusões no distribuidor de lingotamento contínuo, iniciaram-se estudos de modelamento físico e matemático do escoamento no distribuidor.

Este trabalho tem como objetivo validar um modelo numérico através de planos de laser e apresentar alguns dos resultados de determinação dos tempos de residência realizados no

modelo físico. Também são analisados os resultados, através dos dois modelos, da influência de um modificador de fluxo no perfil do escoamento e sua influência na flotação de inclusões.

## 2. MODELO FÍSICO

O distribuidor modelado tem formato Delta-T e trabalha com três veios como mostra a “Fig. 1”.

O modelo foi construído em escala 1:1 e com paredes de acrílico. Trabalhou-se com água à temperatura ambiente como fluido de simulação. Os testes que serão descritos a seguir foram realizados respeitando as condições padrões de velocidade de lingotamento e volume de líquido no distribuidor da Gerdau Aços Finos Piratini.

Maiores detalhes sobre a construção hidráulica do modelo podem ser obtidos em um trabalho publicado anteriormente por Wollmann et al (1998).

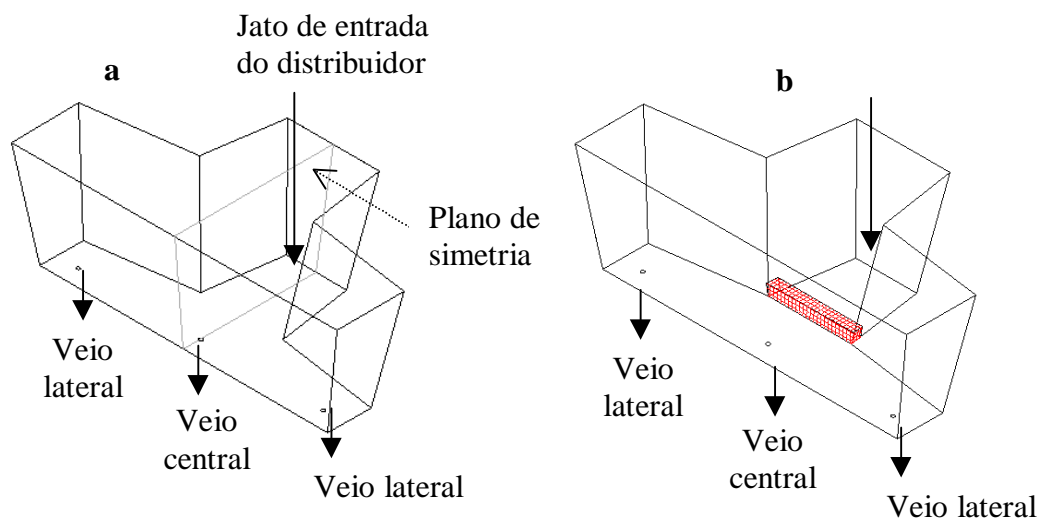


Figura 1 - Desenho em três dimensões do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini: a) distribuidor sem barreira e b) distribuidor com a barreira analisada.

Para determinar a distribuição dos tempos de residência (curvas DTR), a técnica de injeção de traçadores utilizada foi a de injeção em pulso, citada por Szekely & Ilgbusi (1989). As injeções do traçador foram realizadas através de um sistema pneumático conectado próximo ao jato de entrada do distribuidor, conforme Wollmann et al (1998). O traçador utilizado foi uma solução a 2.8 % de HCl.

A concentração de HCl foi medida indiretamente através de sensores de condutividade posicionados no veio central e em um dos veios laterais. Cabe salientar que considerou-se como único o comportamento de distribuição dos tempos de residência para ambos os veios laterais. Isto deve-se as condições de simetria do distribuidor analisado, de acordo com a “Fig. 1a”.

Todos os ensaios DTR foram realizados mantendo um nível constante de fluido no distribuidor, ou seja, a vazão de entrada é igual a soma das vazões de saída.

## 3. MODELO MATEMÁTICO

Um modelo de elementos finitos foi utilizado para resolver numericamente as equações de Navier-Stokes, bem como as equações k-ε do modelo de turbulência. As constantes utilizadas no modelo são as mesmas consideradas por Launder e Spalding (1976). O software

Ansys 5.4/Flotran foi utilizado para a modelagem deste problema, tendo em vista a complexa geometria do distribuidor.

### 3.1 Condições de contorno

Nas paredes do distribuidor foram consideradas as condições de não escorregamento, ou seja, todas as componentes de velocidade são nulas. Nos planos de simetria e na superfície livre, as componentes perpendiculares de velocidade são iguais a zero. A parte submersa da válvula longa foi considerada completamente cheia de fluido e na entrada foi considerado um perfil uniforme de velocidade calculado pela vazão e pela área da válvula. Este procedimento mostrou-se mais apropriado com a realidade de acordo com os perfis de velocidade obtidos no modelo físico. Por fim, nas áreas de saída (veios) foi colocado o valor de pressão igual a zero como referência, conforme o sugerido pelo manual do Ansys 5.4 CFD Flotran Analysis Guide, permitindo a saída do fluido, uma vez que o software calcula o balanço de massa.

### 3.2 Estratégia de solução

O modelo utilizou 500 iterações para atingir uma convergência em torno de 0.1 % e um tempo computacional de aproximadamente 5 horas. Foi considerado um fator de relaxação de 0.2 para a pressão e 0.5 para as outras variáveis envolvidas no problema. As simulações foram executadas em uma estação de trabalho *Origin da Silicon Graphics* pertencente ao Centro de Supercomputação – CESUP da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 3.3 Independência de malha

Os modelos aqui apresentados utilizaram uma malha com cerca de 30000 elementos, uma vez que uma malha mais fina, 50000 elementos, não apresentou diferenças significativas nos resultados, o que diminuiu de forma considerável o tempo computacional.

### 3.4 Validação com o modelo físico

A validação do modelo numérico com o modelo físico foi feita através dos perfis de velocidade obtidos através de planos de laser. A obtenção destes planos e o sistema ótico com o uso do laser foram objeto de estudo da dissertação de mestrado de Leandro Gonçalves e Silva (1997). Foram obtidos planos em regiões de interesse no modelo físico e estes mesmos planos foram construídos no modelo numérico utilizando um software especializado, o Ensign6.1.

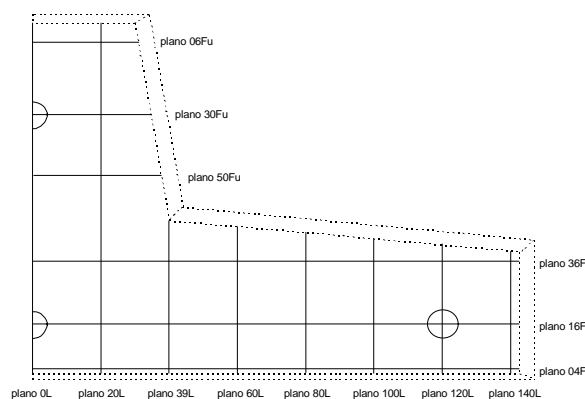


Figura 2. Planos de corte em metade do distribuidor

Como exemplo, os planos 0L, 39L e 16Fr são apresentados nas figuras 3, 4 e 5, respectivamente, para os dois modelos. A localização destes pode ser visualizada na “Fig. 2”.

### Modelo físico

### Modelo numérico

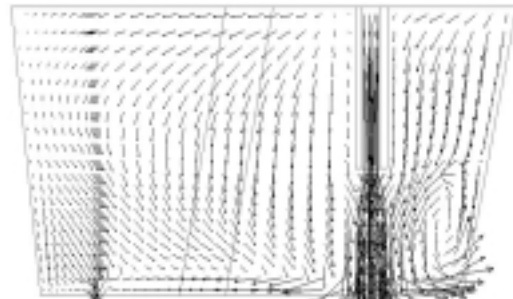
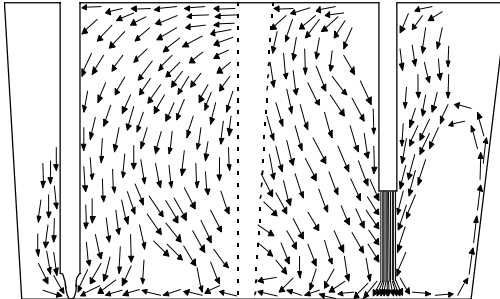


Figura 3 - Plano 0L

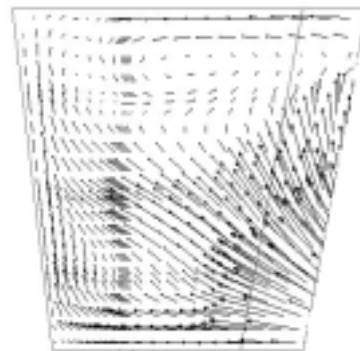
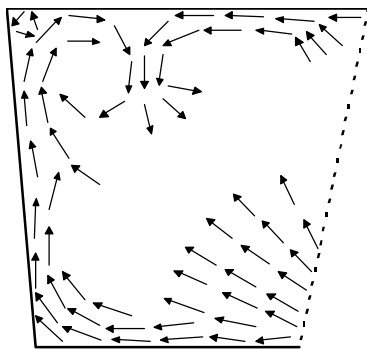


Figura 4 - Plano 39L

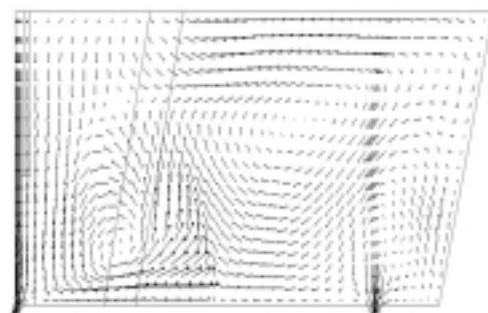
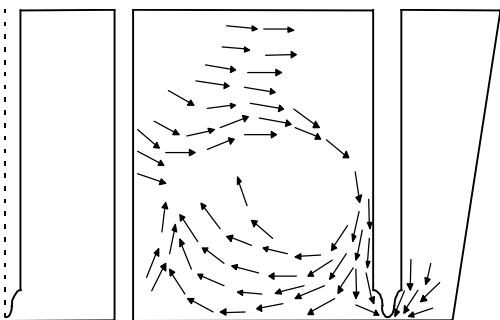


Figura 5 - Plano 16 Fr

Pela comparação dos perfis de velocidade entre os dois modelos, pode-se observar uma grande semelhança entre as direções e sentidos dos vetores e posição dos vórtices.

As regiões onde não aparecem vetores no modelo físico, indicam escoamento perpendicular ou instável. No modelo numérico estas regiões podem ser visualizadas, considerando é claro, as limitações dos resultados obtidos através de um modelo numérico, onde o escoamento é tratado como estacionário e descrito por um modelo de turbulência.

De um modo geral, para se ter uma noção do perfil de escoamento do distribuidor, os resultados foram considerados satisfatórios. Atualmente está sendo desenvolvida uma técnica que permite calcular não somente a direção e sentido dos vetores como também o módulo destes.

#### 4. BARREIRA: RESULTADOS E DISCUSSÕES

A “Fig. 6a” mostra os perfis de velocidade no plano central do distribuidor sem barreiras. Observa-se a presença de uma parte do fluido que entra no distribuidor, movimenta-se pelo fundo e sai sem dar chance para que as inclusões nele contidas flocem até a superfície. O volume de fluido caracterizado por este fluxo é chamado de volume de curto-circuito.

Pela “Fig. 6b” percebe-se que a barreira elimina o curto-circuito.

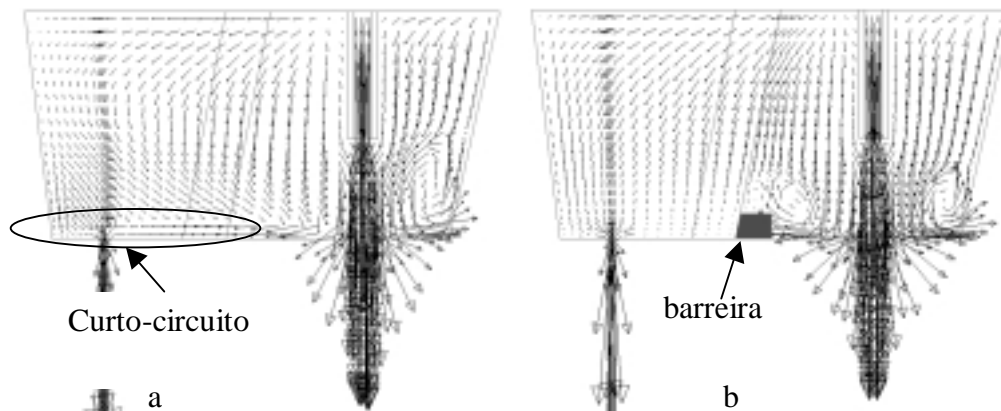


Figura 6 - Modelo matemático. Visualização dos vetores velocidade no plano de simetria do distribuidor: a) distribuidor sem barreiras; b) distribuidor com barreira.

A “Fig. 7a” mostra curvas DTR para o distribuidor sem barreira e a “Fig. 7b” mostra curvas DTR para o distribuidor com a barreira em análise. Nota-se, para ambos os casos, que existe uma diferença entre as curvas DTR dos veios laterais e a curva DTR do veio central.

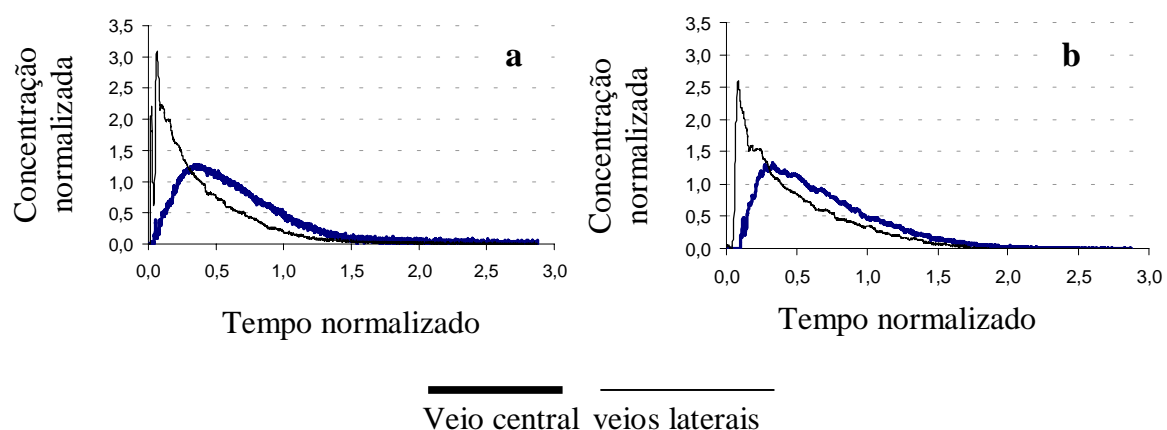
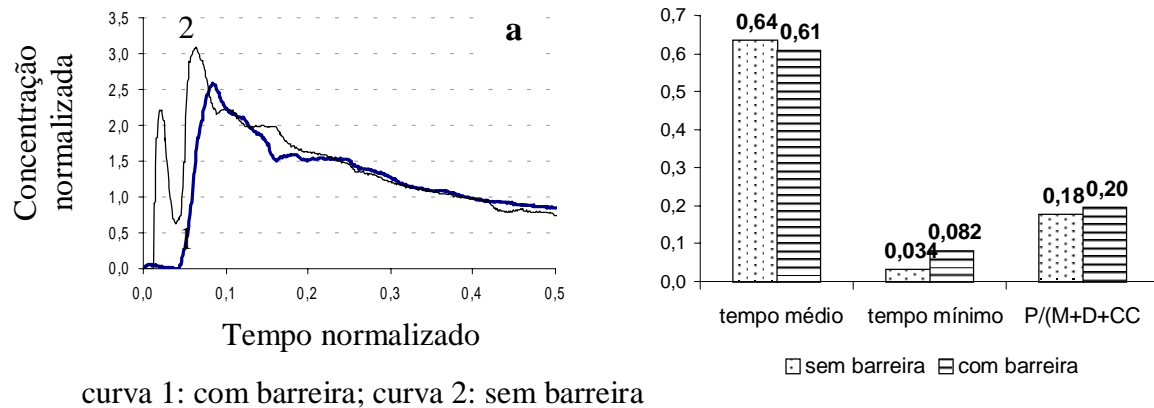


Figura 7 - Curvas de distribuição dos tempos de residência (curvas DTR): a) modelo físico sem modificadores de fluxo; b) modelo físico com barreira.

Para o distribuidor sem barreiras, “Fig. 8a” – curva 2, o primeiro pico de concentração de traçador identifica a presença de um volume de curto-circuito. Assim como consta no modelo matemático, a barreira (“Fig. 8a” - curva 1) elimina o curto-circuito.

A “Fig. 8b” mostra o efeito da barreira sobre os tempos de residência e volumes característicos do distribuidor. Considerações sobre esses temas podem ser obtidas no trabalho de Szekely & Ilegbusi (1989).

A presença da barreira facilita a flotação de inclusões pois aumenta o tempo de residência mínimo em 141% e aumenta a relação entre volume pistonado e os demais volumes em 10%. No entanto, ao observar-se o parâmetro de tempo médio de residência percebe-se que a redução de 4% dificulta a flotação das inclusões.



curva 1: com barreira; curva 2: sem barreira

Figura 8 - a) curvas de distribuição dos tempos de residência para o veio central e b) efeito da barreira sobre: tempo mínimo de residência (normalizado), tempo médio de residência (normalizado) e proporção de volume pistonado (P) em relação aos volumes de mistura (M), morto (D) e de curto-circuito (CC).

## 5. CONCLUSÕES

Ao final desse trabalho pôde-se concluir que, com auxílio do modelamento físico e matemático, é possível identificar condições de fluxo que favoreçam a flotação de inclusões no distribuidor de lingotamento contínuo.

Também constatou-se que:

- O volume de curto-circuito pode ser eliminado com o emprego de uma barreira bastante simples posicionada entre o veio central e o jato de entrada de aço;
- O modificador de fluxo analisado aumenta o tempo mínimo de residência e aumenta a participação do volume pistonado no distribuidor, o que auxilia na flotação das inclusões. No entanto, ele reduz o tempo de residência médio, o que tende a dificultar a flotação de inclusões;
- Mesmo com o modificador de fluxo a curva DTR do veio central difere das curvas DTR dos veios laterais.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao Centro de Supercomputação da UFRGS pelo apoio na área computacional e aos bolsistas de iniciação científica pela ajuda na construção do modelo numérico e realização dos ensaios no modelo físico.

Os autores também agradecem ao CNPq, FAPERGS e Gerdau Aços Finos Piratini pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Ansys 5.4 CFD Flotran Analysis Guide, Swanson Analysis Systems Inc.
- Freitas, S. L., Trindade, L. B., François, M. G., Vilela, A. C. F., Soares, R. B., 1999, Estudo do Arraste de Escória no Molde através de Modelamento Físico e Matemático, XXX Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Maio 10-12, Belo Horizonte.
- Lauder B. E., Spalding D. B., 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol 3, pp. 269-289.
- Silva, L. G., Wollmann, A. M, François, M. G., Heck, N. C., Ferreira, V. C. S., Vilela, A. C. F., 1997, Visualização das linhas de fluxo no distribuidor do lingotamento contínuo através de técnicas fotográficas e planos de laser, 11<sup>o</sup> Seminário de Aceria do IAS, Novembro 25-28, Buenos Aires, pp. 189-198.
- Soares, R. B., Vilela, A. C. F., 1998, Mould Powders - A Review and the Billet Casting, 3<sup>rd</sup> European Conference on Continuous Casting.
- Szekely, J.; Ilegbusi, O.J., 1989, The Physical and Mathematical Modeling of Tundish Operations, Springer Verlag.
- Trindade, L. B., Vilhena, M. T. M. B., François, M. G., Vilela, A. C. F., 1998, Modelamento Matemático do Molde de Lingotamento Contínuo: Escoamento de Água e Aço, 53<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, Setembro 13-17, Belo Horizonte.
- Wollmann, A. M. et al, 1998, Estudos de fluxo no distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini, In Anais: 29<sup>o</sup> Seminário Sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM, Maio, São Paulo, pp.295-309.

## MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF THE FLUID FLOW IN A CONTINUOUS CASTING TUNDISH OF GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI

***Abstract.** The mathematical as well as the physical modeling have been used to study the molten steel fluid flow in continuous casting tundish. In this work the results obtained with these models for Delta-T tundish of Gerdau Aços Finos Piratini are presented. The fluid flow profile in a physical model was analyzed through laser sheet visualization to validate the numerical model and also studied the dams and weirs effects through residence time and velocity vectors. With this study a flow modifier that improves the inclusion flotation in analyzed tundish was configured.*

**Keywords:** Mathematical and physical modeling, tundish and continuous casting