

APLICAÇÃO DE UM MODELO FÍSICO PARA O PROJETO DO DISTRIBUIDOR DA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TIRAS “TWIN-ROLL” DO IPT

José Eduardo Spinelli

Carlos Alexandre dos Santos

João Pedro Valls Tosetti

Jaime Alvares Spim Júnior

Amauri Garcia

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: spinelli@fem.unicamp.br, alex@fem.unicamp.br, jptti@ipt.br, spim@ct.ufrgs.br, amaurig@fem.unicamp.br

Resumo

No projeto de um distribuidor (*tundish*), os fatores primordiais que devem ser observados para otimização do processo são as características do fluxo de metal líquido, o qual auxilia na flotação de inclusões e ajuda na homogeneização do líquido e da temperatura; a capacidade volumétrica, e a geometria simples, a qual facilita o manuseio, recuperação e aumento da vida útil do distribuidor. A geometria do sistema e, o posicionamento de obstáculos (diques e barreiras) à passagem do metal líquido e em particular os campos de velocidade do líquido, exercem influência direta na qualidade do produto final. Para esse estudo, é prática comum utilizar-se de modelos físicos e/ou modelos matemáticos para simular as condições do processo. O presente trabalho emprega um modelo físico, construído em acrílico e em escala 1:1 do distribuidor do equipamento de tiras finas do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas-SP), para a análise de parâmetros como detecção de regiões turbulentas e, zonas “mortas” de fluxo, para auxiliar o projeto do *tundish* utilizado no equipamento. Estudou-se o posicionamento de diques, variando a distância e a quantidade destas, além do posicionamento de barreiras na região inferior do distribuidor. Os resultados permitiram a determinação da melhor configuração para o distribuidor.

Palavras-chave: Twin Roll, Modelo Físico, Campos de Fluxo

1. INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo de tiras pelo processo Twin Roll é um processo único de fabricação, partindo diretamente do metal líquido para o produto final, tiras de espessura entre 0,5 a 5 mm. O metal passa por três etapas de resfriamento, as quais: rolos, região de resfriamento secundário e radiação livre. Entre as seqüências de operação realizados no processo, destacam-se como principais: 1. alimentação de metal líquido no distribuidor, 2. fluxo de metal líquido do distribuidor para a cavidade formada entre os rolos, utilizando como transporte injetores ou válvula submersa, 3. formação da tira sólida, 4. resfriamento da tira

após a saída dos rolos por meio de *sprays* borrifadores d'água e 5. região de radiação livre ou resfriamento ao ambiente com posterior bobinamento.

No processo, o distribuidor refere-se ao recipiente intermediário entre a panela vinda do forno e o molde ou rolos onde o metal começará a solidificar. O conceito básico de usar-se um distribuidor é o de alimentar e distribuir metal fundido para diversos moldes no equipamento, mas além dessa função ele pode ser utilizado para separar as inclusões no banho, homogeneização da temperatura, ou até mesmo realizar modificações na composição química da liga (Morales, 1999; Sahai, 1996; De Santis, 1996).

A Tabela 1 apresenta algumas especificações do comportamento do distribuidor para aumentar a qualidade do produto final.

Tabela 1. Funções do distribuidor e benefícios econômicos (Singh, 1993).

Objetivos	Reservatório	Distribuidor	Fluxo de aço constante	Limpeza da liga	Tratamento metalúrgico
Necessidade	Otimizar a capacidade	Controlar o superaquecimento	Nível de metal constante	Separar inclusões	Controle da mistura, temperatura e do tempo de residência
Ganhos	Seqüência de operação	Controle microestrutural e redução de break-outs	Redução de defeitos superficiais, velocidade constante de lingotamento e controle do resfriamento	Diminuição de inclusões e aumento da qualidade	Modificação de inclusões e controle químico da liga

O distribuidor tem influência significativa no desempenho e qualidade do produto final, sendo uma de suas principais características a capacidade volumétrica, fluxo de metal líquido e o revestimento refratário responsável em manter a temperatura o mais uniforme e constante possível. O uso de revestimentos internos para reduzir os ataques do aço líquido na parede dos distribuidores tem crescido, resultando em melhorias no desempenho dos distribuidores, principalmente no que diz respeito a vida útil. Um dos parâmetros importantes que devem ser controlados nesta etapa do processo é a altura do nível de metal líquido no distribuidor, pois esta influencia na velocidade de lingotamento, ou mais precisamente na velocidade do jato que sai da válvula. Geralmente este controle é realizado através de uma balança que registra a massa total do distribuidor e metal, ou por meio de controle visual realizado por um operador, ou ainda por irradiação de raios γ utilizando-se de fontes radioativas como Cobalto 60, entre outras. Para equipamentos com controles automáticos de nível de metal, uma das principais dificuldades encontradas é a flutuação do fluido na cavidade, o que acarreta oscilação nas medidas obtidas, podendo alterar o nível em função de leituras errôneas. A geometria do sistema, o posicionamento de obstáculos a passagem do metal líquido (diques e barreiras) e a velocidade do mesmo têm sido estudados visando melhorar a capacidade de separação de inclusões não-metálicas e a homogeneização do metal líquido dentro do banho, resultando em aumento de qualidade do produto final, em função da limpeza do aço e da homogeneização de temperatura. Para esse estudo, é prática comum utilizar-se de modelos físicos.

Em relação aos modelos físicos, geralmente são construídos em acrílico e utiliza-se como fluido para simular o metal líquido a água, com corante adicionado, para visualizar o fluxo desde a entrada no recipiente até a vazão para o molde, possibilitando desta forma determinar as condições para redução de turbulências e regiões 'mortas' (onde não ocorre a circulação do

líquido), além do fato de permitir a reconfiguração do projeto e da geometria, visando um fluxo de alimentação que direcione o metal de entrada para a base da escória flutuante no banho. Este tipo de fluxo tem como vantagem reter inclusões não-metálicas, assim que o fluxo passa pela escória (Joo, 1993 A; Sinha, 1993).

O presente trabalho emprega um modelo físico, construído em acrílico e em escala 1:1 do distribuidor do equipamento de tiras do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas – SP), para a análise de parâmetros como detecção de regiões turbulentas e zonas ‘mortas’ de fluxo e, direcionamento de jato. Estudou-se o posicionamento de diques, variando a distância e a quantidade destes, além do posicionamento de barreiras na região inferior do distribuidor.

2. MODELO FÍSICO

O objetivo da modelagem física é representar o sistema a ser modelado pela mudança do material de trabalho, e muitas vezes da escala de operação. O novo material a ser utilizado no modelo deve ser representativo, de forma que as características fluido dinâmicas sejam iguais ou semelhantes a do material modelado. Deste modo é possível obter resultados realísticos de um protótipo que, por exemplo, utilize aço líquido com temperaturas superiores a 1500°C, através de medidas em um modelo que, por exemplo, utilize água a temperatura ambiente, de modo muito mais barato, eficiente e seguro. Os princípios da modelagem física, podem ser compreendidos de modo simplificado através das equações diferenciais que governam o fluxo de fluido, calor e massa.

Considerando o fluxo de um fluido na condição isotérmica, pode-se descrever o problema em termos das equações de Navier-Stokes (movimento) e da continuidade, dadas por:

Equação da continuidade:

$$\nabla v = 0 \quad (1)$$

Equação de movimento:

$$\rho \cdot \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \cdot \nabla^2 v + \rho \cdot g \quad (2)$$

onde: ρ = densidade [kg/m³];

v = velocidade escalar [m/s];

μ = viscosidade estática ou absoluta [kg/m.s];

P = Pressão no fluido [kg/m.s²];

g = aceleração da gravidade [terrestre $\cong 9,81$ m/s²].

V = velocidade característica [m/s];

t = tempo característico [s];

L = comprimento característico [m];

A equação a seguir, corresponde a equação de Navier-Stokes na forma adimensionalizada:

$$\frac{Dv^*}{Dt^*} = -\nabla^* P^* + \left(\frac{\mu}{L \cdot V \cdot \rho} \right) \nabla^{*2} v^* + \left(\frac{g \cdot L}{V^2} \right) \quad (3)$$

Note nesta equação que o fator de escala, descrito pelas variáveis de velocidade, tamanho e propriedades físicas, estão concentradas em dois grupos adimensionais. Estes grupos

aparecem freqüentemente em problemas de engenharia e, como homenagem receberam os nomes de dois importantes pioneiros da mecânica de fluídos:

$$Re = \left(\frac{L \cdot V \cdot \rho}{\mu} \right) \Rightarrow \text{Número de Reynolds (razão entre forças inerciais e viscosas)} \quad (4)$$

$$Fr = \left(\frac{V^2}{g \cdot L} \right) \Rightarrow \text{Número de Froude (razão entre forças inerciais e potenciais)} \quad (5)$$

Se os dois sistemas (protótipo e modelo) possuem as mesmas dimensões chaves, ou seja, o número de Reynolds e o número de Froude são iguais, então a mesma equação (Equação (3)), será aplicada para ambos os casos.

Se os dois sistemas possuírem a mesma geometria (geometricamente semelhantes) então ambos terão a mesma conduta em termos fluido dinâmico.

Existindo uma equivalência adimensional nos campos de velocidade, temperatura, pressão, concentração, entre os dois processos, então é válido afirmar que um deles é uma representação fiel do outro, ou seja, existe similaridade entre as variáveis que possuem equivalência adimensional. Este é o critério geral da similaridade entre um modelo físico e um protótipo os quais requerem que existam razões constantes entre as variáveis correspondentes. Os estados de similaridade normalmente incluem: Similaridade Geométrica; Similaridade Térmica; Similaridade Química; Similaridade Mecânica Estática; Similaridade Mecânica Cinemática e Similaridade Mecânica Dinâmica;

2.1. Desenvolvimento Experimental

O modelo físico desenvolvido no IPT foi construído em acrílico, e fixado à uma estrutura de aço para melhor desenvolvimento dos ensaios e melhor apresentação, conforme mostra a Figura 1. Foi acoplado ao sistema um rotâmetro para as medidas de vazão, além de um circuito fechado de circulação de água movido por uma bomba de volúta e com um reservatório. Um sistema de cremalheira foi desenvolvido para comando do varão e para fechar e abrir os rolos um sistema de porca-parafuso. As dimensões do tundish são vistas na Figura 2.

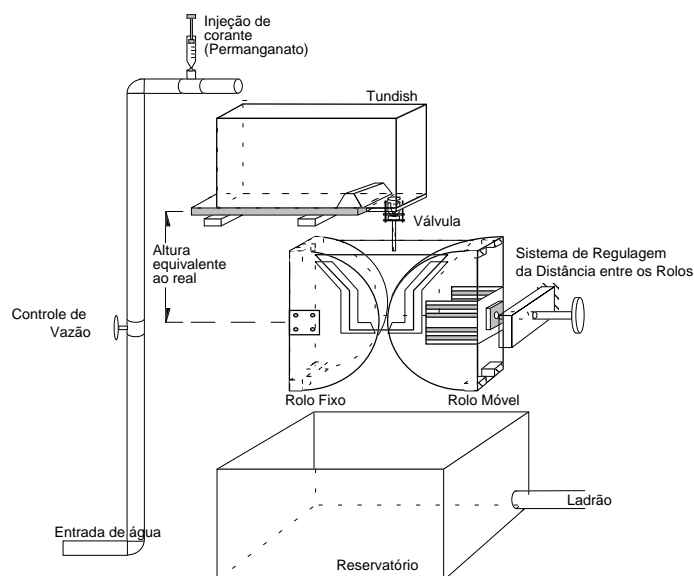


Figura 1. Esboço global do modelo físico de acrílico para simulação do processo

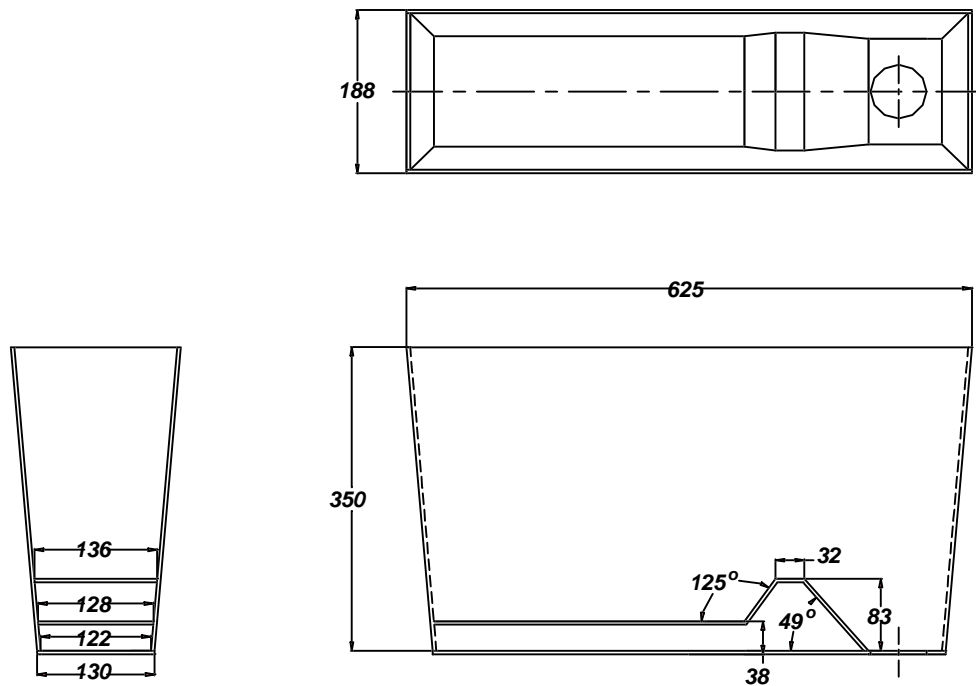


Figura 2. Dimensões do *tundish* de acrílico, para o modelo físico do processo

Foram testados diferentes configurações de diques e barreiras sendo dois tipos de diques com diferentes comprimentos (22,5 cm e 17,5 cm) e dois tipos de barreiras com diferentes alturas (7,5 cm e 5 cm), na qual a menor barreira assemelhasse a original, conforme Figura 2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que seguem foram levantados segundo a seguinte metodologia:

- 1.) Fluxo de mistura no *tundish*, respeitando a direção preferencial da superfície do metal líquido. Deste modo, deseja-se que o material que entra no *tundish* passe pela escória retida na superfície, onde desta forma pode-se garantir a retenção de inclusões e partículas de menores densidades;
- 2.) Menor tempo para a mistura completa da água com corante (permanganato), pois deste modo pode-se garantir maior homogeneidade em relação aos gradientes térmicos no interior do *tundish*.

Os resultados dos tempos de mistura e as observações em relação as regiões de zona morta ou regiões de persistência de turbulência, são dados na Tabela 2. A Figura 3 mostra algumas fotos referentes aos ensaios no modelo frio e suas respectivas condições.

Os resultados observados neste trabalho serão posteriormente implementados no *tundish* real do equipamento de produção de tiras (Twin-Roll) do IPT/SP e, os resultados verificados serão comparados com as condições da microestrutura observada no produto. Estes resultados serão apresentados em trabalhos posteriores.

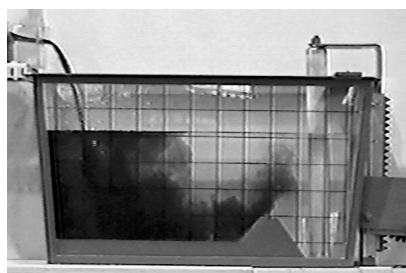
A Tabela 2 responde ao seguinte padrão: Barreira 1 = 5 cm; Barreira 2 = 7,5 cm; Dique 1 = 17,5 cm; Dique 2 = 22,5 cm. As distâncias de posição tem como referência a lateral esquerda do *tundish*.

Tabela 2. Resultados de Ensaio no modelo físico do tundish – Twin-Roll/IPT-SP.

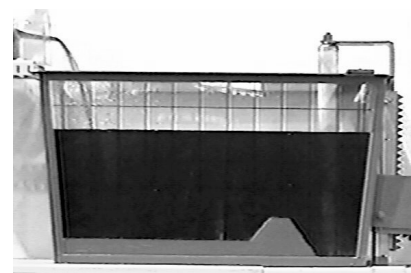
<i>Condições de Ensaio</i>					<i>Observações</i>
Barreira	Dist. [cm]	Dique	Dist. [cm]	T. de mistura [s]	
-----	-----	Tipo 1	25	13	Sem Zona Morta ou turbulência acentuada, mas fluxo direcionado ao centro da haste do tampão.
-----	-----	Tipo 1	20	13	Sem Zona Morta ou turbulência acentuada, e fluxo direcionado a superfície do tampão.
-----	-----	Tipo 1	15	19	Sem Zona Morta ou turbulência acentuada, e fluxo direcionado a superfície do tampão.
-----	-----	Tipo 2	25	25	Zona Morta acentuada na superfície entre o tampão e o dique.
-----	-----	Tipo 2	15	34	Sem Zona Morta ou turbulência acentuada, mas fluxo direcionado ao centro da haste do tampão.
Tipo 1	10	----- -	-----	53	Zona Morta persistente na superfície do tampão.
Tipo 1	15	----- -	-----	38	Zona Morta persistente no comprimento do tampão.
Tipo 1	20	----- -	-----	20	Mistura homogênea, sem turbulência aparente e fluxo direcionado a superfície do tundish.
Tipo 2	10	----- -	-----	57	Zona Morta persistente na superfície do tampão.
Tipo 2	15	----- -	-----	39	Mistura homogênea e fluxo direcionado a superfície do tundish.
Tipo 2	20	----- -	-----	23	Mistura homogênea e fluxo direcionado a superfície do tundish.
Tipo 1	10	Tipo 1	25	29	Zona Morta persistente entre o dique e o tampão.
Tipo 1	15	Tipo 1	25	80	Zona Morta acentuada no comprimento do tampão e na superfície entre o tampão e o dique.
Tipo 1	10	Tipo 1	25	48	Zona Morta na superfície entre o dique e o tampão.
Tipo 1	15	Tipo 2	27,5	120	Zona Morta acentuada na região do tampão.



Condição atual – após 3 s



Condição atual – após 5 s



Condição atual – após 30 s



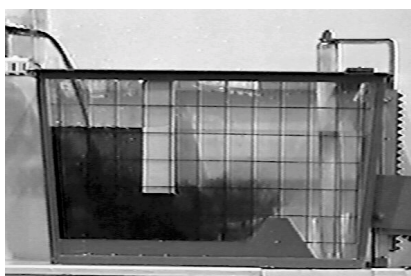
Dique Tipo 1 – 15 cm
Resultado após 5 s



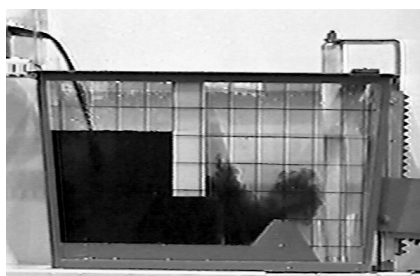
Dique Tipo 1 – 20 cm
Resultado após 5 s



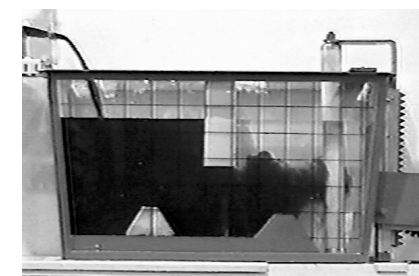
Dique Tipo 1 – 25 cm
Resultado após 5 s



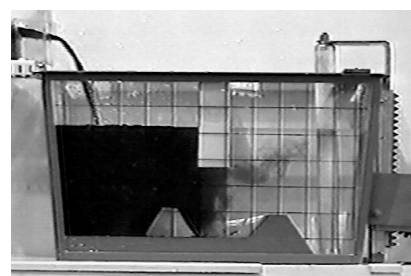
Dique Tipo 2 – 15 cm
Resultado após 5 s



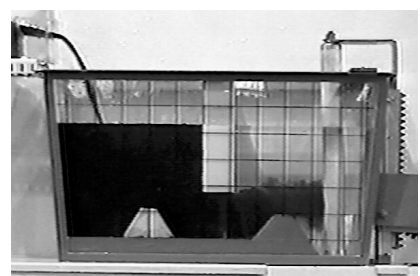
Dique Tipo 2 – 20 cm
Resultado após 5 s



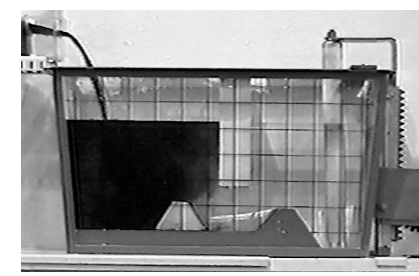
Barreira Tipo 1 – 10 cm
Dique Tipo 1 – 25 cm
Resultado após 5 s



Barreira Tipo 1 – 15 cm
Dique Tipo 1 – 25 cm
Resultado após 5 s



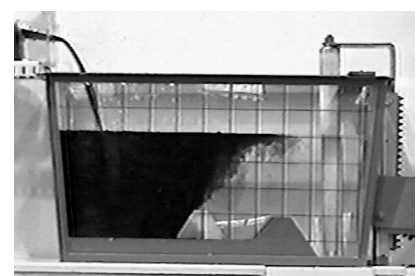
Barreira Tipo 1 – 10 cm
Dique Tipo 2 – 25 cm
Resultado após 5 s



Barreira Tipo 1 – 15 cm
Dique Tipo 2 – 27,5 cm
Resultado após 5 s



Barreira Tipo 1 – 15 cm
Resultado após 5 s



Barreira Tipo 1 – 20 cm
Resultado após 5 s

Figura 3. Fluxo da condição de diferentes configurações: atual, com diques, com barreiras, com diques e barreiras.

4. CONCLUSÕES

Os resultados observados na modelagem física são consistentes e obedecem a realidade física observada na prática. Os custos e o tempo para a construção do modelo físico são bastante baixos quando se trata de realizar diversas observações em diferentes condições no equipamento metalúrgico real, no caso o tundish. Os resultados verificados neste trabalho permitiram realizar modificações sensatas e dinâmicas em um equipamento já em funcionamento, permitindo desta forma sugerir, inclusive, melhorias na qualidade do produto a um custo relativamente pequeno.

5. AGRADECIMENTOS

É importante agradecer às tradicionais instituições de fomento, como a FAPESP e o CNPq, pelo apoio irrestrito e contribuição para com os pesquisadores. Citando-se também que o sucesso do trabalho passa também pelo apoio de pessoal e uso de estrutura do IPT e da UNICAMP.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Santis, M., Ferretti, A., 1996, “Thermo-fluid-dynamics Modelling of the Solidification Process and Behavior of Non-metallic Inclusions in the Continuous Casting Slabs”, ISIJ International, Vol. 36, Rome, Italy, pp. 673-680.
- Joo, S., Guthrie, R. I. L., 1993, “Inclusion Behavior and Heat Transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations: Part I. Aqueous Modeling”, Metallurgical Transactions B, Vol. 24B, pp. 755-765,
- Morales, R. D., López-Ramírez, S., Palafox-Ramos, J, and Zacharias, D., 1999, “Numerical and Modeling Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer of Liquid Steel in a Tundish with Different Flow Control Devices”, ISIJ International, Vol. 39, Mexico D. F., pp. 455-462.
- Sahai, Y., Emi, T., 1996, “Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes”, ISIJ International, Vol. 36, Japão, pp. 667-672.
- Singh, S., Koria, S. C., 1993, “Physical Modelling of Steel flow in Continuous Casting Tundish”, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 20, Kanpur, India, pp. 221-230.
- Sinha, S.K., Godiwalla, K.M., Sivaramakrishnan, C.S., 1993, “Fluid Flow Characterization in Twin Strand Continuous Casting Tundish Water Model”, Ironmaking & Steelmaking, Vol. 20, pp. 485-492.