

Modelagem física do sistema de alimentação do processo *Twin Roll* para lingotamento contínuo de tiras de aço inoxidável

José Eduardo Spinelli

Eng. Mecânico, Mestre e Doutorando em Engenharia Mecânica, FEM/DEMA/UNICAMP
E-mail: spinelli@fem.unicamp.br

Carlos Alexandre dos Santos

Doutor em Engenharia Mecânica, Pós-Doutorando FAPESP, FEM/DEMA/UNICAMP e DEMA/EESC
E-mail: alex@fem.unicamp.br

Amauri Garcia

Doutor, Professor Titular, FEM/DEMA/UNICAMP
E-mail: amaurig@fem.unicamp.br

Jaime Alvares Spim Junior

Doutor, Professor EM/LAFUN/UFRGS
E-mail: spim@vortex.ufrgs.br

Resumo

Entende-se, por modelagem de processo, o desenvolvimento de uma representação quantitativa ou qualitativa dos fenômenos físicos associados ao processo. O tipo e a forma do distribuidor, o controle do fluxo e o posicionamento de obstáculos são importantes fatores no projeto do sistema de alimentação de metal líquido para o lingotamento contínuo de tiras de aço. Nesse trabalho, são realizadas simulações do processo *Twin Roll* de lingotamento contínuo de tiras de aços, utilizando, como referência tecnológica, o equipamento-piloto instalado nas dependências do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Foi construído um simulador a frio do distribuidor do equipamento (em escala 1:1), com componentes feitos de acrílico, com água como fluido de simulação e com permanganato de potássio como corante. O simulador contribuiu para melhorias de produtividade e para a limpeza do produto.

Palavras-chave: *Twin roll*, modelagem física, distribuidor, sistema de alimentação.

Abstract

It can be understood by process modeling the development of a quantitative or qualitative representation of the physical phenomena associated to the process. Important factors in the design of a metal feeding system for thin strip casting of steels are size and shape of tundish, type and location of flow control devices. In this article, simulations concerning the Twin Roll continuous caster of steels process at IPT (Technologic Research Institute) are performed. In order to optimize steel flow a 1:1 water model was designed and constructed with components made of acrylic, water as the simulation fluid and potassium permanganate as a pigment. The use of an appropriate arrangement of turbulence inhibiting dams and weirs can provide an output fluid flow pattern suitable for input to a thin strip caster. The simulator has contributed to improve the productivity and cleanliness of the strip casting of steel.

Keywords: *Twin roll*, physical modelling, tundish, liquid feeding.

Artigo recebido em 20/05/2002 e aprovado em 10/07/2002.

1. Introdução

A chapa de aço é certamente o principal produto siderúrgico consumido pelas indústrias de transformação. Sendo assim, a tecnologia de lingotamento tem sofrido sucessivos desenvolvimentos nos últimos 20 anos, buscando a produção de chapas de maneira mais direta e com custo reduzido. Implementam-se sempre a produtividade, o rendimento e a qualidade. O processo evoluiu do lingotamento convencional para o contínuo e sempre se buscou a diminuição da espessura dos lingotes, surgindo o lingotamento de placas, placas finas e tiras (com espessuras inferiores a 5mm).

De acordo com Spinelli et al.(2000), a tecnologia para obtenção direta de tiras a partir de aço líquido é resultado de massivos investimentos em pesquisa, geralmente multiinstitucionais, e freqüentemente envolvendo apoio governamental. Tudo se inicia nos anos 80, com enorme desenvolvimento de escalas-piloto e protótipos, principalmente para aços inoxidáveis. Os desafios atuais consistem em corridas mais prolongadas, seqüenciais e confiáveis, com otimização da qualidade do produto.

O lingotamento contínuo de tiras é um processo alternativo *Near Net Shape*, caracterizado por reduzir o custo energético de produção e o consumo de materiais, por melhorar a qualidade metalúrgica do produto final e por aprimorar a eficiência de processamento. Uma das tecnologias para a produção direta de tiras é conhecida na literatura técnica por *Twin Roll*, a qual consiste de uma produção, em estágio único, de tiras finas, que podem ser bobinadas normalmente no estágio seguinte (ver Figura 1). Combina, portanto, os efeitos da solidificação rápida e os da laminação a quente em um único estágio operacional. Esse processo, que já é bastante utilizado, é reconhecidamente eficiente para o processamento de alumínio e vem atraindo vigoroso interesse das indústrias de aço, conforme Schwerdtfeger et al.(1998) e Santos et al.(2000).

Segundo Mizoguchi et al.(1996) e Costa Neto et al.(1997), o sistema de alimentação do metal líquido é considera-

do uma condição crítica para a operação corrente do processo, pois este deve garantir a mínima variação da temperatura do metal na poça líquida, proporcionar uma forma de controle fácil e imediato, assegurar o controle do nível de metal líquido no distribuidor, otimizar as condições do fluxo e arraste de impurezas, flutuações e turbulência na superfície do líquido e, ainda, prever outras operações como condições de vazamento e superaquecimento.

2. Modelagem Física do Distribuidor

Para Morales et al.(1999), 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 se usar um distribuidor foi o de alimentar e distribuir metal fundido para diversos moldes no equipamento, mas, além dessa função, ele pode ser utilizado para separar inclusões no banho, homogeneizar a temperatura, ou até mesmo realizar modificações na composição química da liga.

A geometria do sistema, o posicionamento de obstáculos à passagem do metal líquido (diques e barreiras) e a velocidade do mesmo têm sido estudados visando a 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.

No caso de análises específicas ao distribuidor, projetos do posicionamento de diques e barreiras, além de especificações sobre as válvulas de vazamento e posições dos pontos de enchimento da panela, são facilmente dimensionados com modelos físicos. O objetivo da modelagem física é representar o sistema a ser modelado pela mudança do material de trabalho e, muitas vezes, pela mudança 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 à do material mo-

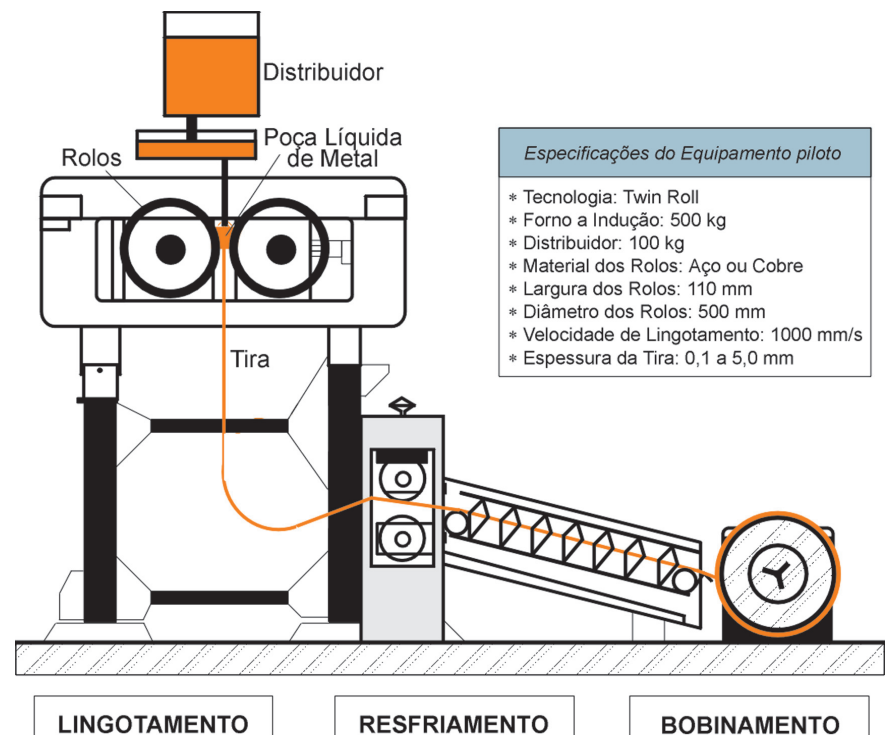


Figura 1 - Processo *Twin Roll* para produção de tiras de aço.

delado. Desse modo, é possível obter resultados realísticos de um protótipo que, por exemplo, utilize aço líquido com temperaturas superiores a 1500°C, por meio de medidas em um modelo que, por exemplo, utilize água à temperatura ambiente, de modo muito mais barato, eficiente e seguro.

Os 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, dessa 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 a um fluxo de alimentação que direcione o metal da entrada para a base da escória flutuante no banho. Joo et al. (1993) estabeleceram que esse tipo de fluxo tem, como vantagem, reter inclusões não-metálicas, assim que o fluxo passa pela escória.

É muito importante indicar os parâmetros a serem respeitados no desenvolvimento de um modelo físico. Os principais fatores que influem nos campos de fluxo atingidos são: a turbulência (equação de Navier-Stokes); forças devido à inércia; forças devido à gravidade; forças devido ao atrito-cisalhamento.

As equações diferenciais (fluxo de fluido) e de transferência de calor e massa dão origem aos princípios de modelagem. É necessário considerar-se o fluxo de um fluido de massa específica e viscosidade constante e isotérmico. As equações a seguir descrevem esse fluxo e foram trabalhadas por Mazumdar et al. (1995).

Equação da conservação de massa de um fluido incompressível:

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

Equação do movimento para fluido newtoniano (Navier-Stokes):

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho \cdot g \quad (2)$$

onde:

ρ = massa específica [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 [9,81 m/s²].

A partir da última equação, multiplicando os termos por $L/\rho \cdot V^2$, e reorganizando a equação, Szekely et al. (1988) chegaram aos seguintes números adimensionais:

$$N_{Re} = \frac{L \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (3)$$

$$N_{Fr} = \frac{V^2}{g \cdot L} \quad (4)$$

onde:

N_{Re} = número de Reynolds;

N_{Fr} = número de Froude;

V = corresponde a velocidade do jato de entrada no distribuidor;

L = dimensões lineares.

O número de Reynolds representa a razão entre forças inerciais e viscosas e o número de Froude representa a razão entre forças inerciais e potenciais.

Sen et al. (1998) estabeleceram a comparação entre os números adimensionais calculados para o modelo de água (escala 1:1) e o protótipo, que trabalha com aço inoxidável AISI 304. Veja a Tabela 1.

3. Procedimento Experimental

Para análise prática das simulações em modelos físicos, alguns aspectos são

ressaltados, tais como linhas de fluxo e tempo de residência, por exemplo. Linhas de fluxo são curvas imaginárias tomadas através do fluido para indicar a direção da velocidade em diversas seções do escoamento no sistema fluido. Já o tempo de residência expressa o tempo de permanência do fluido (ou de uma suposta partícula) dentro do distribuidor. Com essas ferramentas e através de análises de imagens, é possível a determinação de volumes característicos de fluxo. O mais explorado deles é o volume morto, que é aquela fração do volume total que possui velocidade tão baixa que pode ser considerada estagnada. É uma zona indesejada, já que reduz, significativamente, o tempo médio de residência, gerando perda de temperatura e segregação de elementos químicos.

O distribuidor da máquina de lingotamento contínuo de tiras possui capacidade aproximada para 100 kg de aço e o controle da vazão é promovido através do deslocamento de uma válvula-tampão (varão) assentada em uma sede. O modelo físico é constituído de: distribuidor, válvula-tampão, válvula submersa e cavidade formada entre os rolos. Utiliza-se permanganato de potássio (KMnO₄) diluído em água como corante e adicionado ao sistema a partir da abertura superior do distribuidor (lado oposto ao da colocação da válvula submersa).

Analisou-se a influência da colocação da barreira e dos diques com diferentes configurações no distribuidor em relação ao fluxo de metal líquido, sendo observados a mistura do fluxo, o tempo de residência no distribuidor e a existência de zonas mortas.

Tabela 1- Comparação dos números adimensionais.

Adimensionais	N_{Re}	N_{Fr}	
Final do Vazamento	Água	1.32x10 ⁴	1.410
	Aço	1.64x10 ⁴	1.410
Entrada do Tundish	Água	8.82x10 ²	0.007
	Aço	1.16x10 ³	0.008
Saída do Tundish	Água	1.70x10 ³	0.078
	Aço	2.22x10 ³	0.087

A definição das alturas dos obstáculos baseou-se em testes similares de configuração realizados por Camplin et al. (1990) no equipamento-piloto da BHP Steel (Austrália), quando se convencionaram as melhores geometrias para alturas de 0,3 vezes o nível "h" médio do metal líquido dentro do distribuidor, isso para barreiras, e 0,7.h para diques, o que pode ser visto na Figura 2. Os resultados foram obtidos pela filmagem das simulações no modelo físico, determinando-se a melhor configuração para o distribuidor.

As seqüências ensaiadas para posicionamento e combinação entre a barreira (1) e os diques (2 e 3) constam na Tabela 2, sendo que a 1ª seqüência não aparece listada, já que se refere à condição atual do equipamento, sem diques e barreiras. A distância mencionada refere-se ao espaço (em mm) deixado entre o obstáculo e a lateral esquerda do distribuidor (referência).

4. Resultados e Discussões

Os resultados apresentados a seguir foram levantados segundo a seguinte metodologia:

- Fluxo de mistura no distribuidor, adotando como direção preferencial a superfície do metal líquido. Desse modo, deseja-se que o material que entra no distribuidor passe pela escória retida na superfície, onde se pode garantir a retenção de inclusões e partículas de menores massas específicas.
- Menor tempo para a mistura completa da água com corante (permanganato), pois, desse modo, pode-se garantir maior homogeneidade em relação aos gradientes térmicos no interior do distribuidor.

A condição atual (Figura 3) refere-se à situação do distribuidor isento de qualquer tipo de obstáculo ao movimento de fluido. A segunda seqüência (Figura 4) mostra resultados com barreiras 1 colocadas, respectivamente, a 150 mm e 200 mm da lateral. Vê-se que o efeito

resultante em termos de mistura obtida é praticamente o mesmo. A terceira seqüência de resultados (Figura 5) refere-se à colocação simples do dique 2 em variadas posições. Vê-se que a posição correspondente ao dique colocado a 200 mm provoca a incidência de menor zona morta, conseqüentemente provocando uma maior mistura no líquido. A quarta seqüência (Figura 6) mostra a colocação de diques 3. Novamente, observa-se que a melhor mistura é obtida com o dique posicionado a 200 mm da esquerda do distribuidor. A quinta seqüência mostra (Figura 7) a colocação simultânea da barreira 1 e do dique 2, respectivamente a 100 mm e 250 mm, e a 150 mm e 250 mm da lateral esquerda do distribuidor. Vê-se,

claramente, que a primeira configuração provoca uma melhor mistura no fluido. A sexta seqüência mostra (Figura 8) a colocação de barreiras 1 e diques 3, colocados respectivamente a 100 mm e 250 mm e a 150 mm e 275 mm da lateral.

Com base nas seqüências, observou-se que a melhor configuração é aquela referente à segunda seqüência (Figura 4), qual seja, barreiras 1 colocadas a 150 mm ou a 200 mm da lateral. Esse arranjo permitiu a melhor mistura, maximizando o tangenciamento do fluido na superfície onde se posiciona a escória. Essa configuração já foi incorporada ao distribuidor do equipamento.

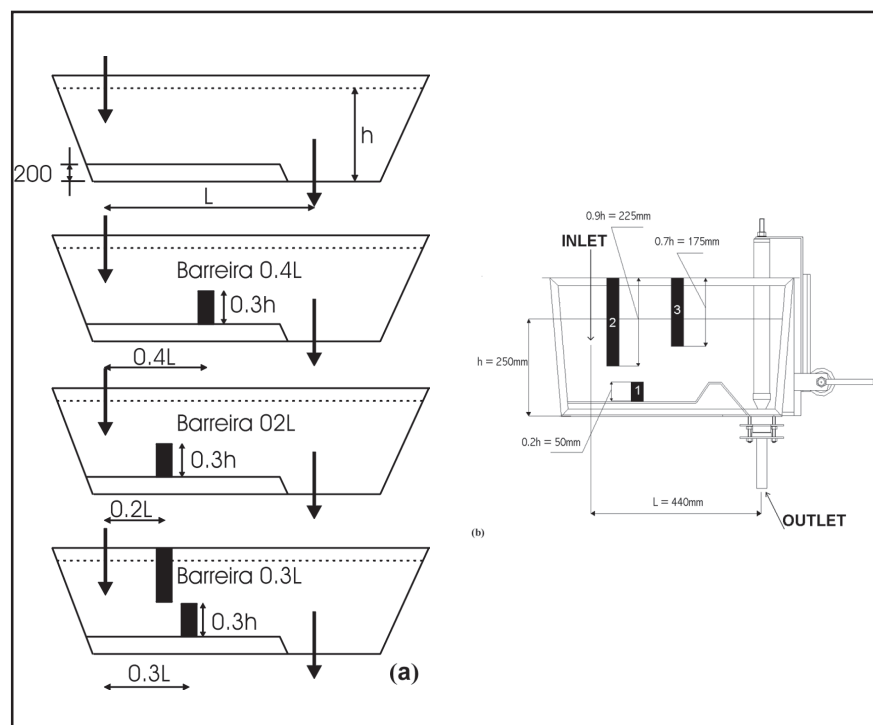


Figura 2 - (a) Esquema do distribuidor da BHP Steel; (b) Características geométricas do distribuidor em estudo.

Tabela 2 - Condições de ensaio no modelo frio.

Seqüências	2ª			3ª			4ª		5ª		6ª	
Barreira	1	1	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1
Distância (mm)	200	150	100	-	-	-	-	-	150	100	150	100
Diques	-	-	-	2	2	2	3	3	2	2	3	3
Distância (mm)	-	-	-	250	200	150	250	150	250	250	275	250

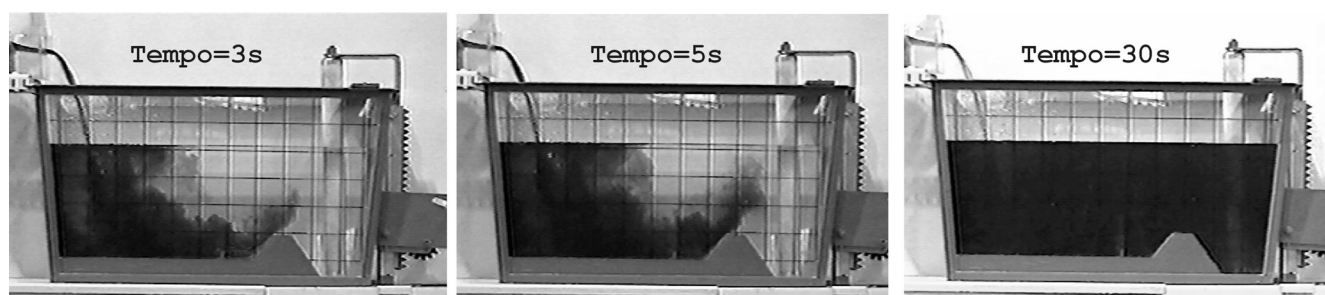


Figura 3 - Fluxo da condição atual, sem diques e sem barreiras.

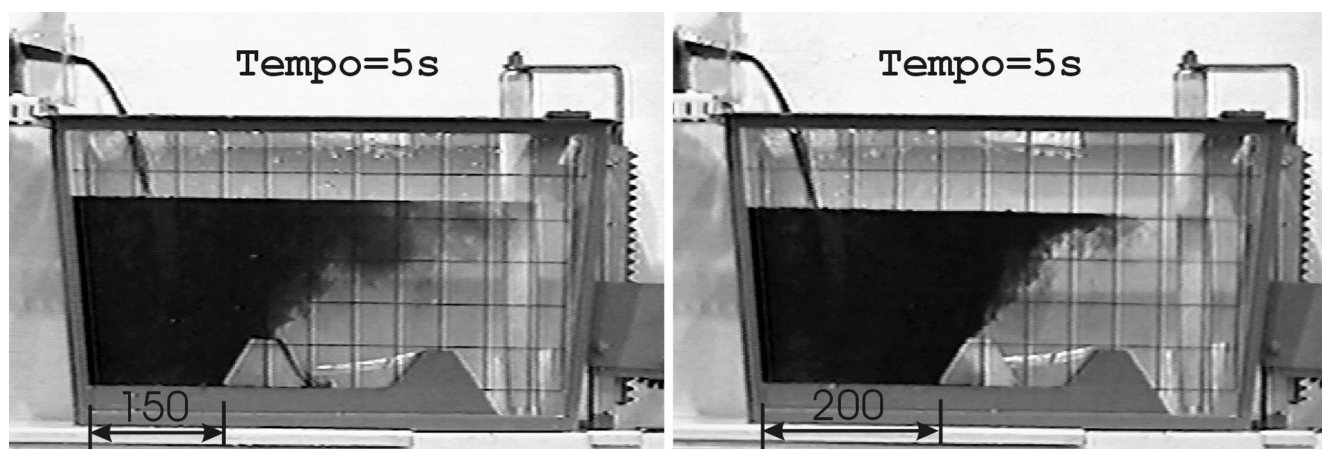


Figura 4 - Fluxo para a configuração com a barreira 1.

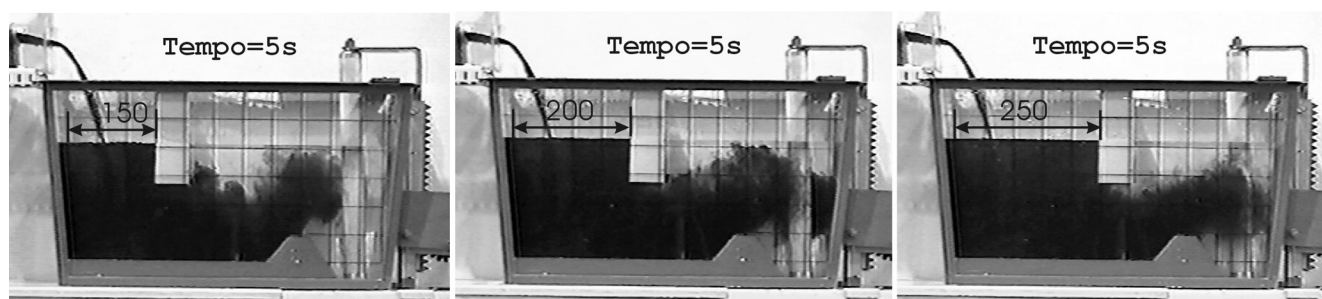


Figura 5 - Fluxo para a configuração com dique 2.

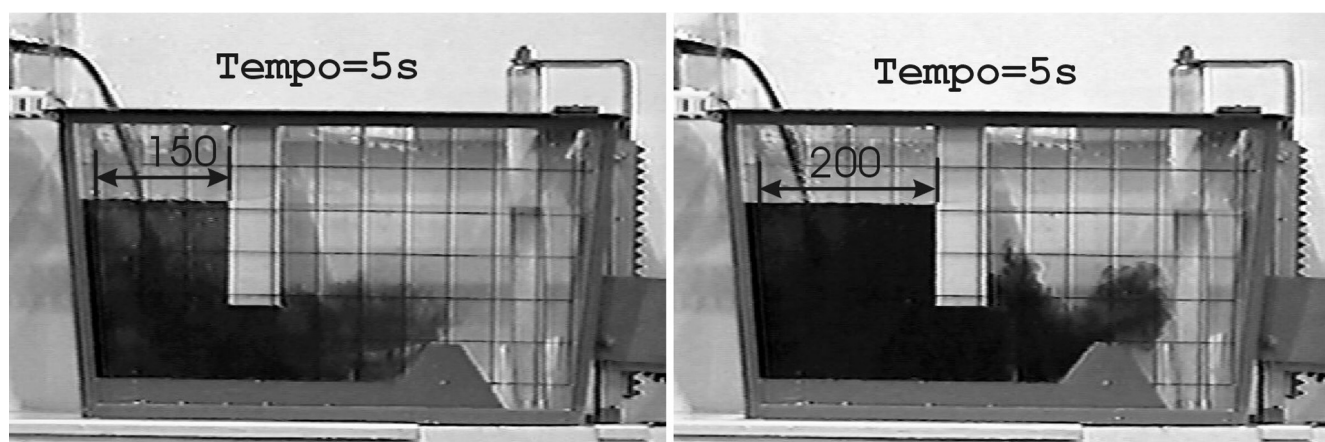


Figura 6 - Fluxo para a configuração com dique 3.

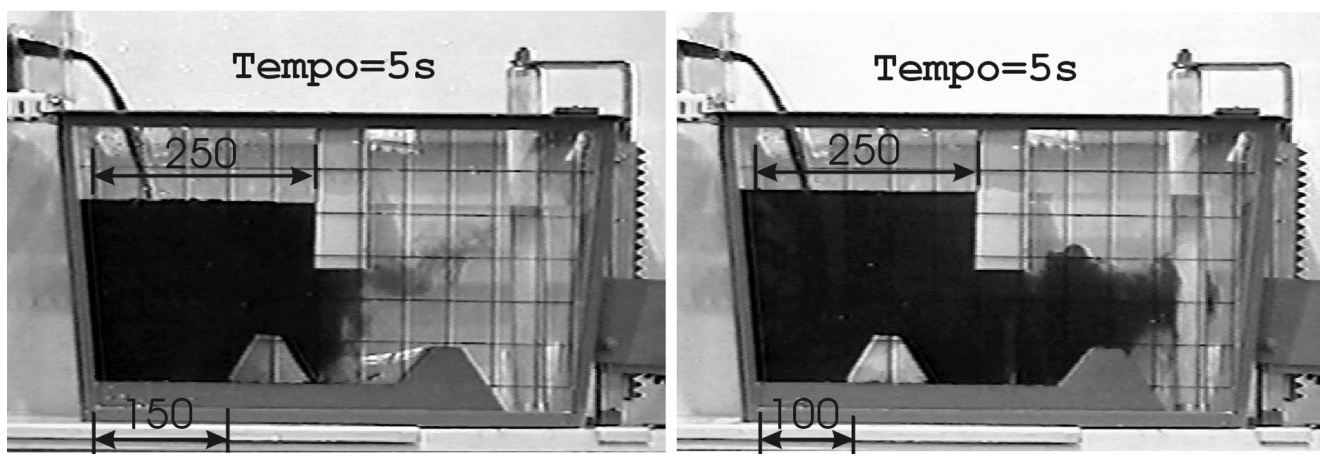


Figura 7 - Fluxo para a configuração com dique 2 e barreira 1.

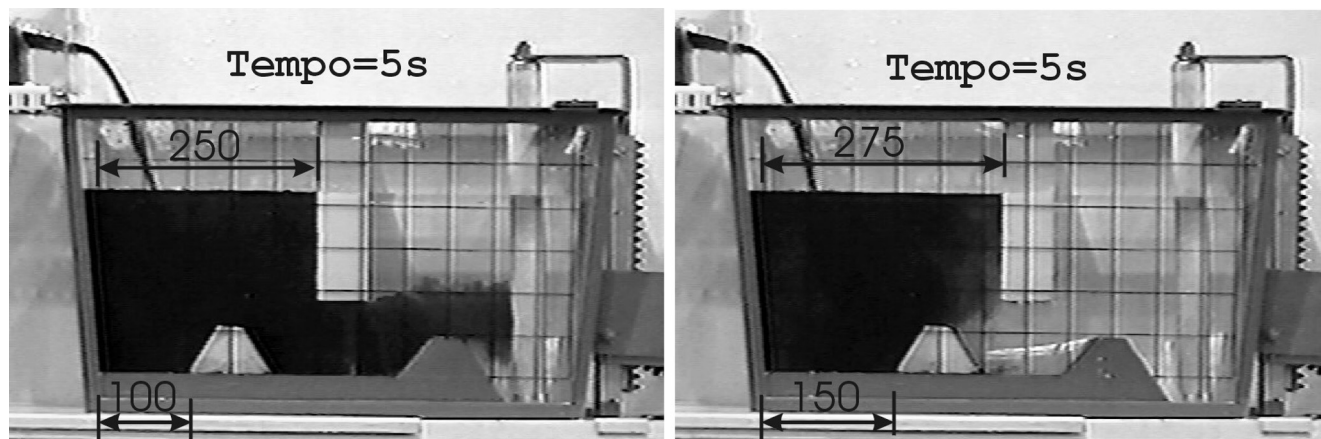


Figura 8 - Fluxo para a configuração com dique 3 e barreira 1.

5. Conclusões

A aplicação de um modelo físico para simular o sistema de alimentação do equipamento-piloto permitiu a análise do fluxo de metal líquido no distribuidor e a determinação da melhor configuração geométrica para o sistema. E o posicionamento único de barreira a 150 mm ou a 200 mm da lateral do distribuidor caracterizou-se como a melhor configuração, quando analisado o comportamento do fluxo de metal líquido no distribuidor.

6. Agradecimentos

Ao IPT e a UNICAMP pelo amparo científico e à FINEP e FAPESP pelo apoio financeiro.

Referências

Bibliográficas

- CAMPLIM, J. M., HERBERTSON, J., HOLL, H., WHITEHOUSE, P., GUTHRIE, R.I.L., HAN, J.W., HASAN, M. The application of mathematical and water modelling in the selection of tundish design for the Proposed Combcaster at BHP Whyalla. In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL IRON AND STEEL CONGRESS., 1990. Nagoya: 207-214.
- COSTA NETO, J.G. et alii. *Otimização do fluxo de aço no distribuidor do lingotamento contínuo*. Campinas: UNICAMP, 1997. (Doutorado).
- JOO, S., GUTHRIE, R. I. L. Inclusion behavior and heat transfer phenomena in Steelmaking Tundish Operations: Part I. Aqueous Modeling. *Metalurgical Transactions B*, v. 24B, p. 755-765, 1993.
- MAZUMDAR, D., YAMANOGLU, G., SHANKARNARAYANAN, R., GUTHRIE, I.L. Similarity considerations in the physical modelling of steel making Tundish Systems. *Steel Research*, n. 1, p. 14-19, 1995.
- MIZOGUCHI, T., MIYAZAWA, K., UESHIMA, Y. Relation between surface quality of cast strips and meniscus profile of Molten Pool in the Twin Roll Casting Process. *ISIJ*, v. 36, p. 417-423, 1996.
- MORALES, R. D., LÓPEZ-RAMÍREZ, S., PALAFOX-RAMOS, J., ZACHARIAS D. Numerical and modeling analysis of fluid flow and heat transfer of liquid steel in a tundish with different flow control devices. *ISIJ*, v. 39, p. 455-462, 1999.
- SANTOS, C. A., SPIM, J. A., GARCIA A. Modeling of solidification in Twin Roll Strip Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 102, p. 33-39, 2000.
- SCHWERTDFEGER, K. Benefits, Challenges and limits in new routes for hot strip production. *ISIJ*, v. 38, n. 8, p. 852-861, 1998.
- SEN, N., SAU, R., MAZUMDAR, S., GHOSH, M., SAHAY, S. K., HAY, A. K. Physical modelling of liquid feeding for an Unequal Diameter Two Roll Thin Strip Caster. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 37, n. 2, p. 161-166, 1998.
- SPINELLI, J. E. et alii. *Simulação do lingotamento contínuo de tiras finas de Aços*. Campinas: UNICAMP, 2000. (Mestrado).
- SZEKELY, J., ILEGBUSI, O. J. et alii. *The physical and mathematical modeling of Tundish Operations*. New York: Springer-Verlag, 1988. 133p.