

# CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO DE TIRAS FINAS PELO PROCESSO DE CINTO ÚNICO<sup>(1)</sup>

Frederico da Costa Fernandes <sup>(2)</sup>

Guilherme Antonio Defendi <sup>(2)</sup>

Júlio César de Sousa Pena <sup>(3)</sup>

Vangleik Ferreira da Cruz <sup>(3)</sup>

Aretha Fernandes de Oliveira <sup>(3)</sup>

Roberto Parreiras Tavares <sup>(4)</sup>

## RESUMO

Nos últimos anos, tem sido observado um rápido desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de aço e seus diversos produtos. Uma das mais promissoras e inovadoras técnicas consiste na produção de produtos planos com espessura já na ordem de milímetros, obtida diretamente no processo de solidificação. Embora esta tecnologia ainda não esteja totalmente desenvolvida, é de se esperar que em poucos anos ela esteja disponível e concorrendo com os processos convencionais, não apenas com relação à produtividade, mas também permitindo a produção de aços planos com uma qualidade superior. Esta nova técnica é denominada lingotamento de tiras finas (near-net-shape casting).

Dentre os processos de lingotamento de tiras, o processo de cinto único ("Single Belt Casting") tem se mostrado o mais promissor, já que é o único processo cuja produtividade poderá se equiparar aos processos de lingotamento contínuo convencional.

Um fator de extrema importância no processo de cinto único é o sistema de alimentação de metal líquido. O sistema de alimentação irá determinar a forma como o metal será depositado no cinto em movimento e, conseqüentemente, exercerá grande influência na qualidade final da tira produzida.

A partir dos resultados preliminares dos modelos físico e matemático, desenvolveu-se um sistema de alimentação de metal líquido com plano inclinado que foi utilizado na máquina de lingotamento de tiras pelo processo de cinto único construída no Laboratório de Simulação de Processos – LaSiP/UFMG. Na etapa de operacionalização desta máquina, foi utilizada parafina para simular o metal líquido. Posteriormente, passou-se a usar uma liga de Pb-Sn. Estas tiras foram então caracterizadas com relação a sua espessura e largura.

**Palavras-Chave:** modelamento físico, modelamento matemático, Cinto Único, lingotamento de tiras, sistema de alimentação de metal.

---

(1) Trabalho a ser apresentado no XXXV<sup>o</sup> Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais - ABM, 17 a 19 de Maio de 2004, Salvador – Bahia

(2) Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

(3) Sócio da ABM, Aluno de Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

(4) Sócio da ABM, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

## 1 - INTRODUÇÃO

O aparecimento e aperfeiçoamento de novos materiais, tais como materiais cerâmicos, plásticos e compósitos, começam a tomar o espaço do aço em várias aplicações. Neste contexto global, as indústrias siderúrgicas têm direcionado alguns esforços para o desenvolvimento de novas técnicas produtivas, que permitam reduções de custo.

Pode-se dizer que os processos chamados de *near-net-shape casting* (próximo do formato final), que visam principalmente o lingotamento contínuo de tiras, têm sido estudados e desenvolvidos recentemente, com a finalidade de eliminar, total ou parcialmente, as etapas de laminação a quente, o que possibilitaria significativas reduções de custo de produção.

São dois os principais processos de lingotamento de tiras finas: o de duplo-rolô ("twin roll") e o de cinto único ("single belt"). O primeiro está bastante desenvolvido, enquanto o lingotamento pelo processo de cinto único, apesar de se encontrar em um estágio de menor desenvolvimento, tem apresentado aspectos vantajosos em comparação ao lingotamento de tiras pelo processo de duplo-rolô. Neste sentido, pode-se destacar a aparente vantagem na aplicação deste a uma grande variedade de aços, e ainda, vantagens no que tange à produtividade<sup>(1,2)</sup>.

Contudo, para que se possa obter tiras com qualidade igual ou superior aquelas obtidas no processo convencional, deve-se fazer um estudo apurado do sistema de alimentação de metal líquido. No lingotamento pelo processo de cinto único, o sistema de alimentação determina como o metal será distribuído sobre o cinto, tendo influência direta na largura, na espessura e na qualidade superficial das tiras produzidas.

O Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG construiu uma máquina em escala de laboratório para lingotamento de tiras finas pelo processo de cinto único, visando investigar este processo através da caracterização das tiras lingotadas. A transferência de calor entre o cinto e a tira também será tópico de estudo. Os primeiros experimentos na máquina foram realizados utilizando-se parafina para simular o metal líquido a fim de auxiliar o desenvolvimento de uma metodologia de operação. Posteriormente, foram lingotadas tiras de uma liga de Pb-Sn.

Paralelamente, o modelo matemático, desenvolvido para o estudo do sistema de alimentação, vem sendo aperfeiçoado.

## 2 - METODOLOGIA

A partir de estudos realizados utilizando-se as modelagens matemática e física, um sistema de alimentação de metal líquido utilizando um plano inclinado foi desenvolvido. Os estudos preliminares utilizaram água como fluido e os resultados foram comparados àqueles obtidos com o uso do *software* comercial CFX.

A Figura 1 apresenta uma vista esquemática do sistema de alimentação de metal líquido. As dimensões do sistema de alimentação proposto foram definidas de acordo com a capacidade do forno de fusão do Laboratório de Simulação de Processos da UFMG (LaSiP). A largura do plano inclinado foi fixada em 0,20 m. Esta dimensão é a mesma das tiras a serem produzidas. A figura 2 apresenta uma foto da máquina de lingotamento de tiras pelo processo de Cinto Único construída.

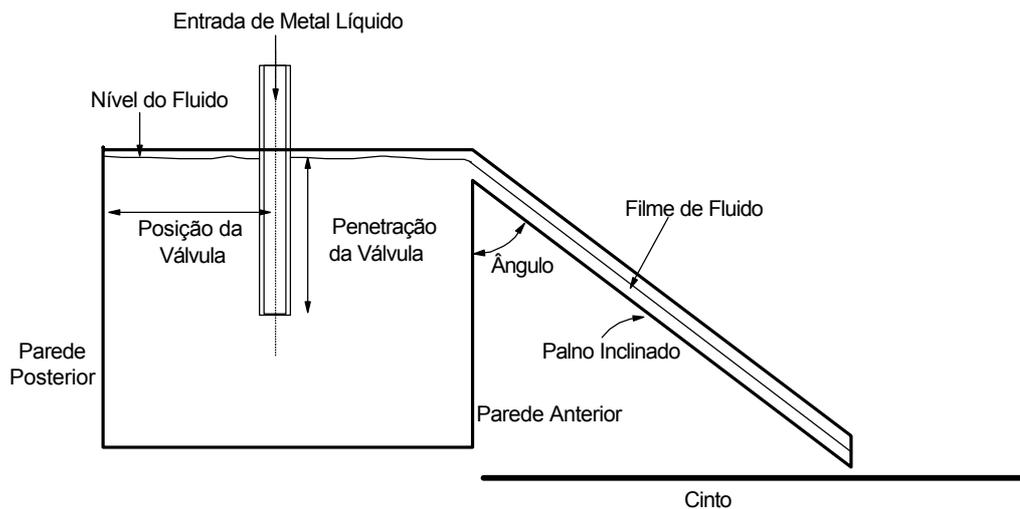


Figura 1 - Configuração esquemática do sistema de alimentação proposto.



- 1- Forno
- 2- Sistema de alimentação
- 3- Cinto
- 4- Variador de velocidade do cinto
- 5- Sistema de refrigeração
- 6- Acionador do cinto
- 7- Reservatório de água para resfriamento

Figura 2 - Máquina de lingotamento de tiras finas do LaSiP.

As tiras que estão sendo lingotadas serão, então, caracterizadas e os resultados obtidos auxiliarão no ajuste de velocidade do cinto e vazão de alimentação do metal, além de prover informações sobre o efeito da extração de calor sobre a microestrutura obtida.

## 2.1 – Modelo Físico

Utilizando-se o processo de anemometria a laser, fez-se medidas de velocidade no sistema de alimentação de metal líquido.

Estas medidas foram realizadas para verificar a existência de zonas mortas e regiões de recirculação. Os valores obtidos nos experimentos estão sendo usados para validar o modelo matemático desenvolvido.

A figura 3 (a) mostra o sistema de alimentação onde tais medidas de velocidade foram realizadas. Já a figura 3 (b) mostra os pontos especificados para medida.

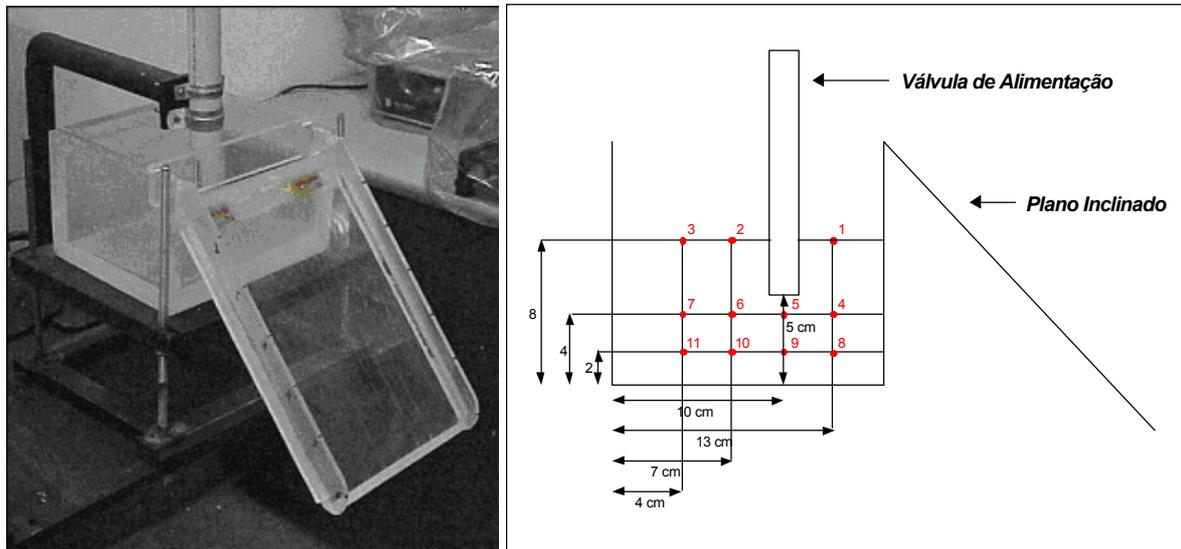


Figura 3: (a) Modelo físico do sistema de alimentação de metal líquido. (b) Desenho esquemático dos pontos especificados para a realização das medidas com o anemometro a laser.

Na etapa de operacionalização da máquina construída, foi utilizada parafina (temperatura de fusão,  $T_f^{\text{par}} = 62^\circ\text{C}$ ) para simular o metal líquido, com o objetivo de verificar se os sistemas de acionamento do cinto, refrigeração e fusão de metal estavam funcionando corretamente.

A etapa seguinte consiste no lingotamento de uma liga de chumbo-estanho (de ponto de fusão de aproximadamente  $235^\circ\text{C}$ ) conhecida comercialmente como metal patente. O metal fundido será então lingotado produzindo tiras sólidas desta liga que serão caracterizadas para verificar a uniformidade de alimentação de metal sobre o cinto e a qualidade das mesmas.

## 2.2- Modelo Matemático

O modelo desenvolvido envolve a solução da forma turbulenta da equação de Navier-Stokes e da equação de conservação de energia. A turbulência foi incorporada através do uso do modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão. Para a solução das equações foi utilizado o *software* comercial CFX-5.6, que utiliza o método de volumes finitos baseado em diferenças finitas.

### 2.2.1- Formulação Matemática

As equações diferenciais que representam as conservações de massa, de momento em um sistema ortogonal em três direções (velocidades  $u$ ,  $v$ ,  $w$  nas

direções x, y, z, respectivamente), de energia cinética de turbulência ( $\kappa$ ), de taxa de dissipação da energia cinética de turbulência ( $\varepsilon$ ) e de energia (entalpia, H), podem ser escritas segundo uma mesma forma geral, considerando-se regime estacionário:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{eff\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

onde:

$x_j$  = coordenada espacial (x,y,z);

$u_j$  = velocidade (u,v,w), nas direções x, y e z, respectivamente.

$\phi$  = variável dependente;

$\tau_{eff\phi}$  = coeficiente de difusividade efetiva de  $\phi$ ;

$S_\phi$  = termo fonte de  $\phi$ ;

$\rho$  = densidade.

Pelo modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$ , a viscosidade efetiva ( $\mu_{eff}$ ) é definida através da soma das viscosidades molecular ( $\mu$ ) e turbulenta ( $\mu_T$ ). A viscosidade turbulenta é calculada através da seguinte equação:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

onde:

$\mu_T$  = viscosidade turbulenta;

$C_\mu$  = constante (0,09);

$\kappa$  = energia cinética de turbulência;

$\varepsilon$  = taxa de dissipação da energia cinética de turbulência.

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo homogêneo proposto por BRACKBILL<sup>(3)</sup> para simular a superfície livre (interface líquido/ar). Este é um caso limite de escoamento multifásico do tipo Euleriano-Euleriano, onde os dois fluidos apresentam-se em uma fase contínua e dividem o mesmo campo de velocidade, temperatura, e outras variáveis, com exceção da fração de volume.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram realizados utilizando-se o modelo físico em acrílico (medidas de velocidade e espessura do filme de fluido) e a máquina de lingotamento de tiras do LaSiP (lingotamento de tiras de parafina e metal patente para a caracterização dimensional e verificação da qualidade da tira produzida). Os resultados obtidos em cada um dos experimentos realizados serão discutidos a seguir.

#### 3.1- Medidas de Velocidade

A anemometria a laser foi utilizada para comparar os resultados obtidos pelo modelamento físico e matemático. Para cada ponto identificado na figura 3, obteve-

se um valor de velocidade na vertical e na horizontal, exceto para o ponto 1. Isto ocorreu, porque a superfície do acrílico que era atravessada pelo laser, possuía marcas que impossibilitaram a medida. Estes resultados podem ser verificados na figura 4, onde as cores representam os resultados obtidos pelo modelamento matemático.

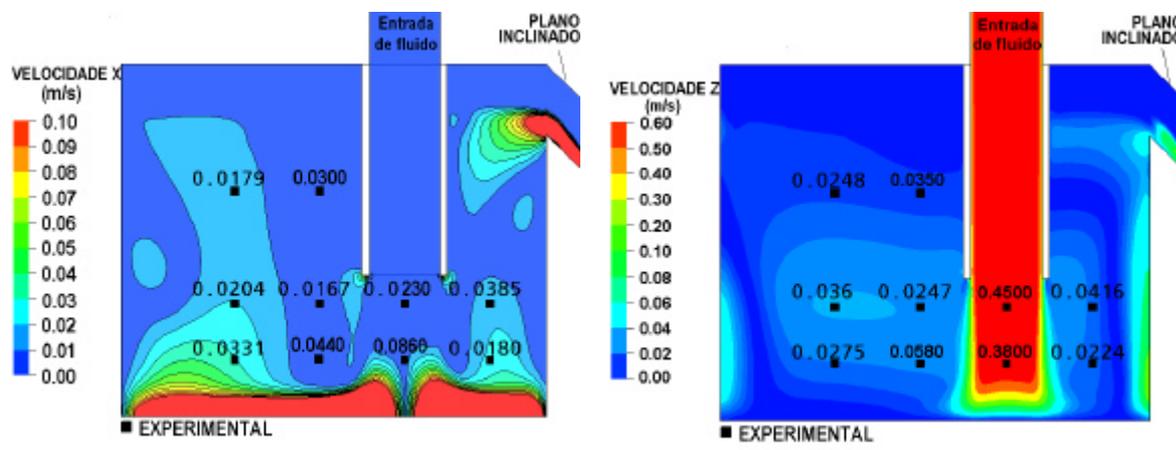


Figura 4: Velocidades medidas por anemometria a laser (experimental) em comparação com o modelamento matemático.

Os resultados mostram que há pequenas diferenças entre os valores obtidos pelo modelo matemático e por anemometria a laser. Outros modelos de turbulência serão avaliados e os resultados comparados com a simulação numérica a fim de se determinar o modelo a ser empregado nas simulações.

Outros experimentos com utilizando diferentes técnicas de visualização como injeção de permanganato de potássio e carvão pulverizado foram empregadas na validação do modelo matemático<sup>(4,5)</sup>.

### 3.2 – Medidas de Espessura da Lâmina de Fluido

Outra informação importante que pode ser obtida a partir do modelamento matemático é o comportamento da lâmina de fluido (neste caso água) que escoar sobre o plano inclinado. A figura 5 mostra uma imagem do plano de simetria do modelo desenvolvido. Pode-se notar que, na região do transbordo, tem-se uma redução brusca da espessura do filme.

Para quantificar esta redução, os dados obtidos a partir do modelo matemático foram plotados no gráfico da figura 6. Este gráfico mostra que a partir da distância de 15 cm do transbordo, a redução da espessura do filme é bem suave e, na região próxima à saída do plano, a espessura é praticamente constante.

Foram também realizadas medidas de espessura da lâmina de fluido com o uso de um aparato desenvolvido no laboratório. Os pontos correspondentes ao plano de simetria do modelo matemático podem ser também vistos na figura 6.

Apesar da diferença entre os valores obtidos pelos modelos físico e matemático, nota-se que o comportamento da lâmina de água em ambos é igual, tendendo para uma espessura constante próximo à saída do plano. Serão realizadas ainda algumas modificações no modelo matemático para estudar o efeito da rugosidade do plano sobre o comportamento do filme de fluido.

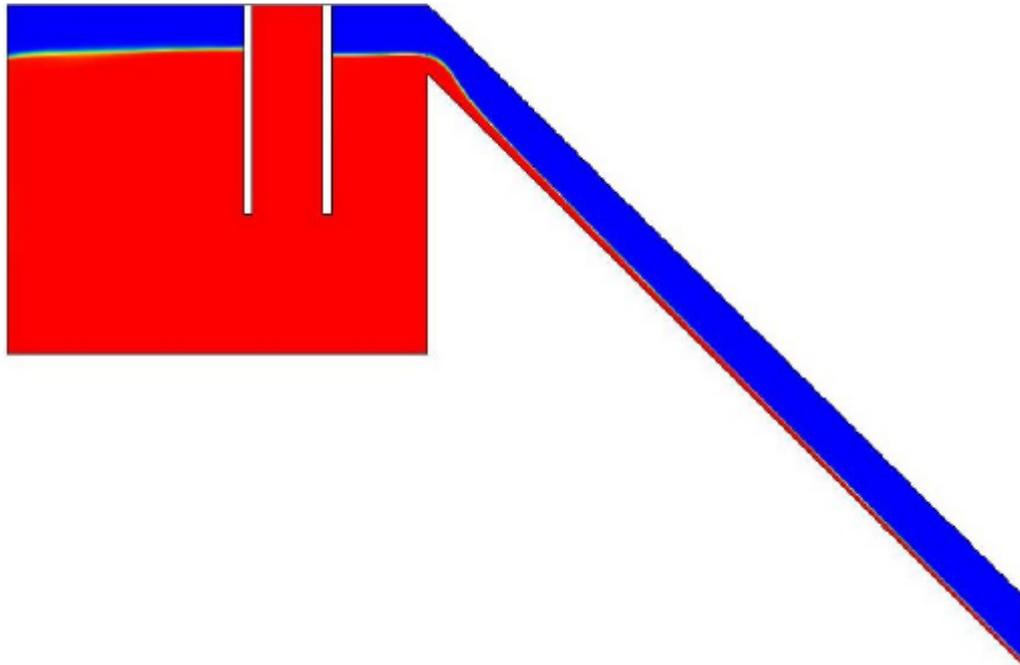


Figura 5 – Comportamento da lâmina de fluido obtido por simulação matemática (vista do plano de simetria)

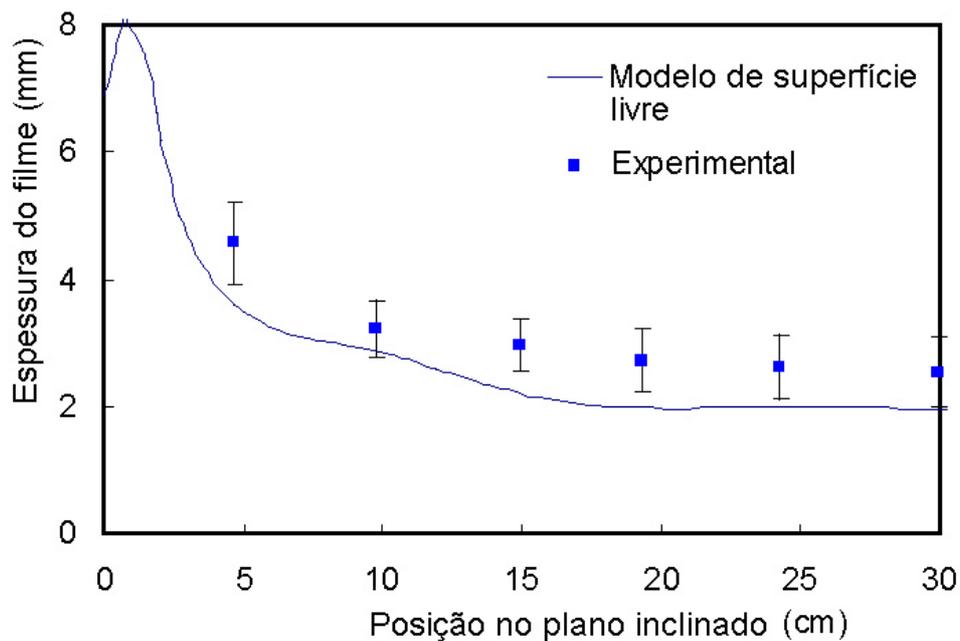


Figura 6 – Medidas de espessura da lâmina de fluido obtidas por simulação física e matemática.

### 3.3- Experimentos com Parafina

Os experimentos com parafina foram realizados com o objetivo de desenvolver um padrão operacional para o lingotamento de metais utilizando-se a máquina construída no laboratório. Com estes experimentos, falhas de projeto foram corrigidas e uma tira de parafina foi produzida como mostrado na figura 5.

A tira de parafina apresentada na figura 7 foi lingotada com uma espessura média de 2,5 mm, largura de 150 mm e comprimento de 1500 mm. A qualidade superficial da tira, aparentemente, é muito boa. A partir da imagem percebe-se que a qualidade lateral ainda não é satisfatória, o que pode ser justificado pelo baixo

ponto de fusão da parafina, o que implica em baixos gradientes de temperatura entre esta e o cinto, dificultando solidificação. Com isto, tem-se que trabalhar com velocidades de movimentação do cinto reduzidas, o que interfere negativamente na qualidade lateral da tira como visto na figura.



Figura 7 - Lingotamento de parafina pelo processo de cinto único utilizando parafina para simular o metal líquido.

### **3.4- Experimentos com Metal Patente**

O próximo passo no desenvolvimento deste trabalho é o lingotamento de metal patente. Os testes já estão sendo realizados mas ainda não se tem uma tira com a qualidade comparável ao desejado mas, já se nota que o processo de solidificação deste metal é muito mais rápido que o da parafina.

Isto se dá devido aos gradientes de temperatura entre o metal líquido e o cinto e, a facilidade de controle da temperatura ou, neste caso, do superaquecimento aplicado ao metal.

Realizados estes experimentos, a próxima etapa do trabalho envolverá o lingotamento de alumínio ou ligas de alumínio-silício, com ponto de fusão da ordem de 650°C.

## **4 - SUMÁRIO E CONCLUSÕES**

Em um trabalho anterior, foi realizada uma investigação sobre o sistema de alimentação de metal líquido para o processo de lingotamento de tiras pelo processo de Cinto Único através de modelamento físico e matemático e, o sistema estudado foi então construído para ser utilizado na máquina de lingotamento de tiras finas do LaSiP.

Na etapa de operacionalização da máquina, foi utilizada parafina para simular o escoamento e solidificação de metal. Algumas tiras foram produzidas e mostraram que, superficialmente, a qualidade é satisfatória mas que lateralmente ela é afetada pela baixa velocidade de solidificação do material devido as baixos gradientes térmicos entre o cinto e a parafina líquida.

Com o início dos teste com metal patente (liga de Pb-Sn), verificou-se que os problemas relativos às baixas velocidades de solidificação presenciadas com o uso de parafina são extremamente reduzidas com o uso de um metal com ponto de fusão mais alto. Os experimentos ainda estão sendo realizados com o objetivo de se obter uma tira com a qualidade esperada.

As medidas com o uso da anemometria a laser estão sendo, junto com outras técnicas de visualização, muito úteis na validação do modelo matemático, principalmente na escolha do modelo de turbulência mais adequado. Nos próximos trabalhos, outros modelos serão testados e os resultados comparados com os experimentais. Será também feito um estudo da influencia da rugosidade do plano inclinado sobre a espessura da lâmina de fluido que escoas sobre ele.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela FAPEMIG na forma de projeto de pesquisa científica, Processo TEC 1218/98 para R.P. Tavares e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica oferecida a J.C.S. Pena e V. F. da Cruz. Os autores agradecem também à CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão, pelas bolsas de complementação de estudo a F.C Fernandes e G.A Defendi.

## **REFERÊNCIAS**

1. C. JEFFERIES. “Modelling a novel, thin strip, continuous steel caster delivery system”. Montreal (Canada): McGill University, 1995. 204 p. (Ph. D.) - Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, 1995.
2. QUARIGUASI NETTO, Pedro Gutemberg. “Mathematical and physical modelling of a sigle-belt casting process”. Montreal (Canada): McGill University, 1998. 383 p. (Ph. D.) - Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, 1998.
3. U. Brackbill; D. B. Kothe; C. Zemach. “A Continuum Method for Modelling Surface Tension”. *Journal of Computational Physics*, N° 100, 1992, pp. 335-354.
4. F. C. FERNANDES, G. A DEFENDI, J. C. S. PENA, R. P. TAVARES. “Modelamento matemático do sistema de alimentação de uma máquina de lingotamento de tiras finas”, XXXIV Seminário de Fusão, Refino e solidificação do Metais, ABM, 2002, p. 228-237.
5. G. A DEFENDI, F. C. FERNANDES, J. C. S. PENA, R. P. TAVARES. “Modelamento físico do sistema de alimentação de uma máquina de lingotamento de tiras finas”, XXXIV Seminário de Fusão, Refino e solidificação do Metais, ABM, 2002, p. 238-246.

# CONSTRUCTION AND OPERATION OF A SINGLE-BELT CASTER<sup>(1)</sup>

Frederico da Costa Fernandes <sup>(2)</sup>  
Guilherme Antonio Defendi <sup>(2)</sup>  
Júlio César de Sousa Pena <sup>(3)</sup>  
Vangleik Ferreira da Cruz <sup>(3)</sup>  
Aretha Fernandes de Oliveira <sup>(3)</sup>  
Roberto Parreiras Tavares <sup>(4)</sup>

## ABSTRACT

In the last decades, it has been observed a large development of new technologies in steelmaking. One of the most promising and innovative techniques involves the production of flat strips with thickness as close as possible as to that of the final product, obtained directly from the casting process. Although this technology is not yet completely developed, it would be probably available in a few years, not just competing with the conventional casting, but also offering better quality products. This technique is known as strip casting process.

Among all the strip casting processes, the Single-Belt casting process has been shown as the most promising since it is the only process whose productivity can be compared to the conventional continuous casting process.

The most important factor concerning the Single-Belt process is the liquid metal delivery system. This system determines how the liquid metal is deposited onto the moving belt and, consequently, has a large influence the superficial quality of the strips.

Based on the results obtained using physical and mathematical model, a liquid metal delivery system using a inclined plan was developed and used in a Single-Belt caster built at the LaSiP/UFMG. In the first experiments, paraffin and Pb-Sn alloy have been cast. The strips were characterized in terms of their thickness and width.

**keywords:** physical model, mathematical model, Single-Belt, strip casting, metal delivery system.

---

(1) Paper to be presented at XXXV<sup>o</sup> Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM, May 17-19, 2004, Salvador – Bahia.

(2) ABM Member, Metallurgical Engineer, Graduate Student of Metallurgical and Mines Department - UFMG.

(3) ABM Member, Undergraduate Student in Metallurgical and Materials Engineering - UFMG.

(4) ABM Member, Associate Professor, Metallurgical and Materials Engineering Department, Federal University of Minas Gerais – UFMG.