

LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TIRAS FINAS EM UMA MÁQUINA DE CINTO ÚNICO EM ESCALA DE LABORATÓRIO¹

Átilla Pinheiro Nunes²
Eduardo Magalhães Almeida²
Thiago Chaves Camargos²
Harley Sânio Oliveira dos Santos³
Roberto Parreiras Tavares⁴

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 inovadoras técnicas consiste na produção de produtos planos com espessura já na ordem de milímetros, obtida diretamente no processo de solidificação. Esta nova técnica é denominada lingotamento de tiras finas (*near-net-shape casting*). Dentre os processos desenvolvidos, o de cinto único é o mais promissor. 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. Neste trabalho, uma máquina de lingotamento de tiras finas pelo processo de cinto único em escala de laboratório foi utilizada na produção de tiras finas de uma liga Pb-Sn-Sb (*metal patente*). Cintos metálicos com diferentes tipos de recobrimento foram utilizados como substrato para a solidificação. As tiras produzidas nas diferentes condições de testes foram caracterizadas em termos de acabamento superficial, avaliado através da sua rugosidade. Através das simulações física e matemática determinou-se uma forma adequada de fazer a alimentação de metal líquido. O sistema que forneceu os melhores resultados consiste em um êmbolo que penetra no interior do reservatório de metal líquido e força o seu escoamento sobre um plano inclinado, até que este se deposite sobre um cinto metálico refrigerado. O ângulo de 10° em relação à horizontal foi o que forneceu os melhores resultados. Os experimentos propiciaram a obtenção de tiras com boa qualidade superficial, particularmente para a superfície em contato com o substrato.

Palavras-chave: Modelamento físico; Modelamento matemático; Processo de cinto único; Lingotamento de tiras; Sistema de alimentação de metal.

CONTINUOUS CASTING OF THIN STRIPS IN A LABORATORY SCALE SINGLE BELT MACHINE

Abstract

In the last decades, it has been observed a large development of new technologies in steelmaking. One of the most innovative techniques involves the production of flat strips with thickness as close as possible to that of the final product, obtained directly from the casting process. 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 that of the conventional continuous casting process. One of 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. In the present work, improvements were introduced in a single belt casting machine, built in a previous stage of the work. These improvements were focused on the liquid metal delivery system and on the system that controls the positioning and the tension of the cooling belt. With this new configuration of the machine, several casting trials were developed. In these experiments, a Pb-Sn-Sb alloy was cast. The strips were characterized in terms of their thickness, width and roughness. The surface quality problems that were observed are being addressed and further improvements will be introduced in the metal delivery system during the next step of the investigation.

Key words: Physical model; Mathematical model; Single-Belt; Strip casting; Metal delivery system.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG*

³ *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia de Automação e Controle da UFMG*

⁴ *Sócio da ABM, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG.*

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⁽¹⁾.

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-rolo (*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-rolo. 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^(1,2).

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⁽³⁾. 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.

Uma máquina em escala de laboratório para lingotamento de tiras finas pelo processo de cinto único foi construída no Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG. Visando melhorar a qualidade das tiras produzidas nesta máquina, diversas alterações foram introduzidas, incluindo modificações no sistema de alimentação de metal e de controle de posicionamento do cinto metálico usado como substrato. No presente trabalho, são apresentadas as modificações feitas e os resultados de experimentos de lingotamento de uma liga de Pb-Sn-Sb (metal patente). Os estudos fundamentais que deram subsídios para as alterações implementadas também serão apresentados.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

- modelar física e matematicamente o escoamento de fluido em um sistema de alimentação de metal líquido para uma máquina de lingotamento de tiras pelo processo de cinto único;
- a partir dos resultados obtidos no modelamento, introduzir mudanças em uma máquina de cinto único para lingotamento de tiras finas, visando aperfeiçoar a qualidade do produto lingotado;
- caracterizar as tiras produzidas nos experimentos de lingotamento.

3 METODOLOGIA

Em uma etapa anterior do trabalho, foi construída uma máquina de lingotamento de tiras finas pelo processo de cinto único, em escala de laboratório. Os ensaios de

lingotamento realizados com esta máquina permitiram a produção de tiras finas de metal com espessuras na faixa de 1 a 3 mm. Nestes ensaios, foi lingotada uma liga de Pb-Sn-Sb, denominada metal patente, que apresenta temperaturas *liquidus* próximas de 250 °C. Utilizando-se a mesma máquina, foram desenvolvidos experimentos de lingotamento de alumínio. Nestes experimentos, foram observadas algumas limitações do sistema de alimentação de metal líquido utilizado. O principal inconveniente deste dispositivo está associado à tendência de formação de depósitos de material (óxido e metal solidificado) no duto de entrada de metal líquido. Estes depósitos reduzem a taxa de alimentação de metal líquido e, em alguns casos, chegaram a interromper completamente o fluxo de metal. Foi observada também uma tendência de deslocamento lateral do cinto metálico durante os experimentos de lingotamento.

Visando corrigir os problemas listados acima, foram introduzidas algumas alterações na máquina construída. Estas alterações se concentraram nos dois itens listados abaixo:

- sistema de alimentação de metal líquido;
- sistema de controle de posicionamento e esticamento do cinto metálico usado com substrato de solidificação.

As mudanças introduzidas são descritas a seguir.

3.1 Sistema de Alimentação de Metal Líquido

No desenvolvimento do novo sistema de alimentação, buscou-se projetar um dispositivo que não apresentasse o risco de entupimento e que, ao mesmo tempo, possibilitasse uma distribuição uniforme do metal líquido ao longo da largura do cinto metálico. Este novo sistema é visto esquematicamente na Figura 1.

Neste sistema, um êmbolo ligado a um motor elétrico penetra no interior do reservatório de metal líquido, provocando o seu deslocamento e transbordamento pelo plano inclinado. Foram desenvolvidos, então, modelamentos físico e matemático do escoamento do metal no sistema acima, visando selecionar as condições mais favoráveis à obtenção de uma distribuição uniforme de metal ao longo da largura do plano inclinado. Foi mantida a largura original do reservatório de metal líquido e do plano inclinado (20 cm).

3.1.1 Modelamento Físico

Para determinar a distribuição do metal líquido ao longo da largura do plano inclinado foi construído um modelo físico do sistema de alimentação. O reservatório foi construído em acrílico em escala 1:1 em relação ao sistema a ser usado na máquina. Água foi usada para simular o metal líquido. Logo na saída do plano inclinado, foi posicionada uma caixa, também de acrílico, contendo vinte compartimentos de mesma largura.

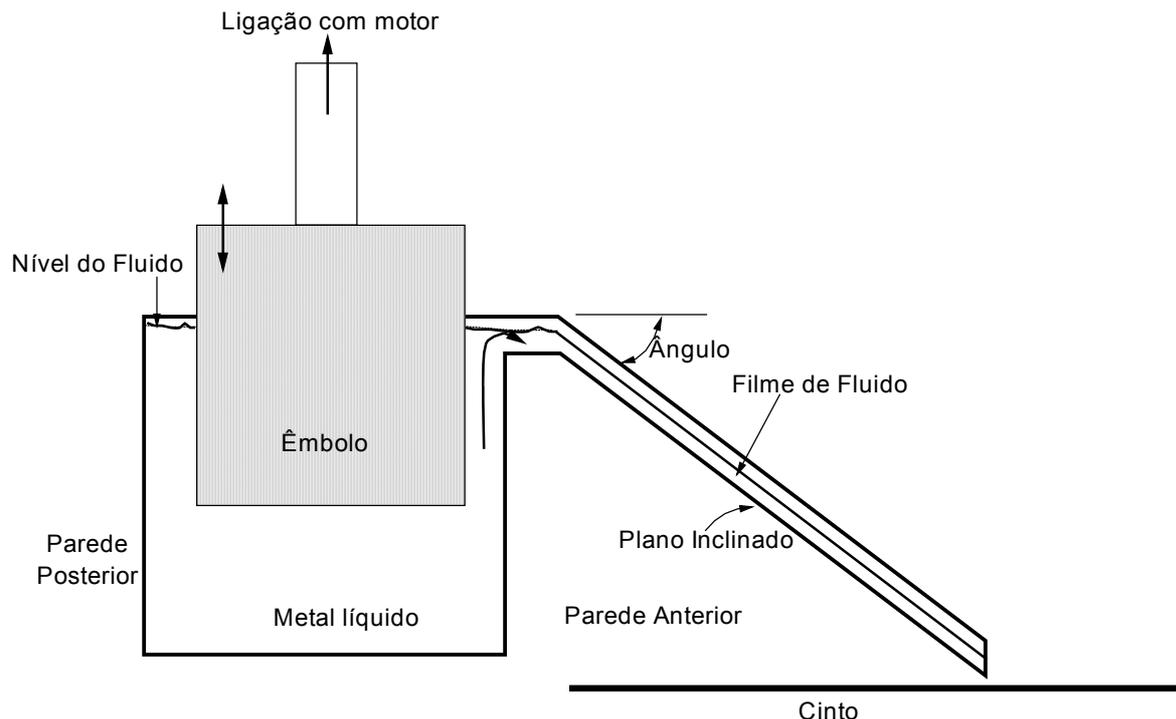


Figura 1- Novo sistema de alimentação de metal líquido proposto.

Durante os experimentos com o modelo físico, o êmbolo era introduzido no reservatório e a água que transbordava era coletada na caixa com os vinte compartimentos. O volume de água acumulado em cada compartimento foi, então, medido ao final do movimento do êmbolo. Quanto mais uniformes os valores dos volumes medidos, mais uniforme a distribuição do fluido ao longo da largura do plano inclinado.

Nestes ensaios, os efeitos de três variáveis foram analisados:

- velocidade de descida do êmbolo: 0,75, 1,0 e 1,24 cm/s;
- ângulo do plano inclinado: 10, 15, 25 e 45° ;
- uso ou não de *quebra-molas* no plano inclinado.

3.1.2 Modelo Matemático

O modelo desenvolvido envolve a solução da forma turbulenta da equação de Navier-Stokes e da equação de conservação de massa. A turbulência foi incorporada através do uso do modelo κ - ε padrão. Para a solução das equações foi utilizado o *software* comercial Ansys CFX-10, que utiliza o método de volumes finitos baseado em diferenças finitas.

3.1.2.1 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 (κ), de taxa de dissipação da energia cinética de turbulência (ε), 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.

ϕ = variável dependente;

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

S_ϕ = termo fonte de ϕ ;

ρ = densidade.

Pelo modelo de turbulência κ - ε , a viscosidade efetiva (μ_{eff}) é definida através da soma das viscosidades molecular (μ) e turbulenta (μ_T). A viscosidade turbulenta é calculada através da seguinte equação:

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

onde:

μ_T = viscosidade turbulenta;

C_μ = constante (0,09);

κ = energia cinética de turbulência;

ε = taxa de dissipação da energia cinética de turbulência.

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo homogêneo proposto por Brackbill⁽⁴⁾ 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.

A partir destas simulações foi possível determinar os perfis de velocidade do fluido no interior do reservatório e ao longo do plano inclinado. Determinou-se também a espessura do filme de líquido no plano inclinado e a distribuição de fluido ao longo de sua largura. Estes resultados foram comparados com os obtidos com o modelo físico. As previsões do modelo matemático foram feitas para diferentes posições do êmbolo. Numa próxima etapa, o deslocamento do êmbolo também será simulado.

3.2 Sistema de Posicionamento e Esticamento do Cinto Metálico

Para controle da intensidade de esticamento do cinto metálico e de seu posicionamento foram introduzidos dois cilindros hidráulicos. A Figura 2 mostra esquematicamente o posicionamento dos cilindros hidráulicos. O sensor de posição envia um sinal indicando deslocamento lateral do cinto. Este sinal é processado por um sistema de controle automático, que envia um comando atuando na posição do cilindro 1 ou 2, dependendo do sentido de deslocamento do cilindro. Este procedimento permite corrigir o deslocamento lateral do cinto.

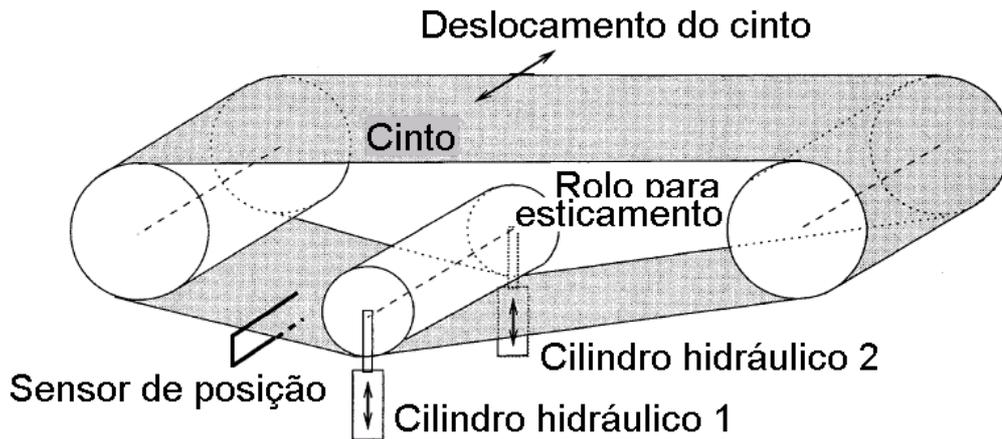


Figura 2- Vista esquemática do sistema de posicionamento e esticamento do cinto metálico.

3.3 Experimentos de Lingotamento

Para a realização dos experimentos de lingotamento, a liga metálica no estado sólido é colocada no interior do reservatório de metal, que é posicionado no interior de um forno. O êmbolo fica também localizado no interior do forno. Todo este sistema é aquecido até se alcançar a temperatura estipulada para o teste. Quando esta temperatura é alcançada, o êmbolo é abaixado no interior do reservatório a uma velocidade preestabelecida. O metal, agora no estado líquido, transborda e escoam pelo plano inclinado, sendo depositado sobre o cinto refrigerado, onde é finalmente solidificado.

A velocidade do cinto é controlada através de um inversor de frequência. Nos ensaios realizados, esta velocidade foi mantida constante em 1 m/s, aproximadamente.

As tiras produzidas foram cortadas e caracterizadas em termos de acabamento superficial, avaliado através da sua rugosidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos alguns dos resultados obtidos com o modelo físico do novo sistema de alimentação de metal líquido, bem como das simulações matemáticas do escoamento de fluido neste sistema. Posteriormente, serão apresentados resultados das experiências de lingotamento.

4.1 Modelamento Físico do Sistema de Alimentação de Metal Líquido

Nestes experimentos avaliou-se a distribuição do fluido ao longo da largura do plano inclinado. A Figura 3 apresenta duas imagens da caixa coletora com o fluido coletado nos seus 20 compartimentos. À esquerda, tem-se um ângulo de 25°, velocidade do êmbolo de 0,75 cm/s e não foi usado *quebra-molas* no plano. À direita, o ângulo é de 10°, a velocidade do êmbolo é de 1,24 cm/s e foi colocado um *quebra-molas* no plano inclinado. As barras escuras correspondem à altura de fluido em cada um dos compartimentos. A distribuição obtida no caso da direita é bem mais uniforme e certamente propiciará uma alimentação mais uniforme de metal líquido sobre o cinto metálico



a) Ângulo: 25°. Velocidade: 0,75 cm/s Sem *quebra-molas* b) Ângulo: 10°. Velocidade: 1,24 cm/s Com *quebra-molas*.

Figura 3- Distribuição ao longo da largura do plano inclinado para duas condições de teste.

A Figura 4 apresenta os resultados para distribuição do fluido na largura do plano inclinado, para um ângulo de 10°, velocidade do êmbolo de 1,24 cm/s e com o uso de *quebra-molas* no plano inclinado. Neste gráfico, os resultados estão em termos de porcentagem de fluido em cada compartimento. Como são vinte compartimentos, uma distribuição uniforme seria obtida com 5 % de volume em cada um deles. Observa-se que esta condição de ensaio se aproximou bastante desta situação ideal.

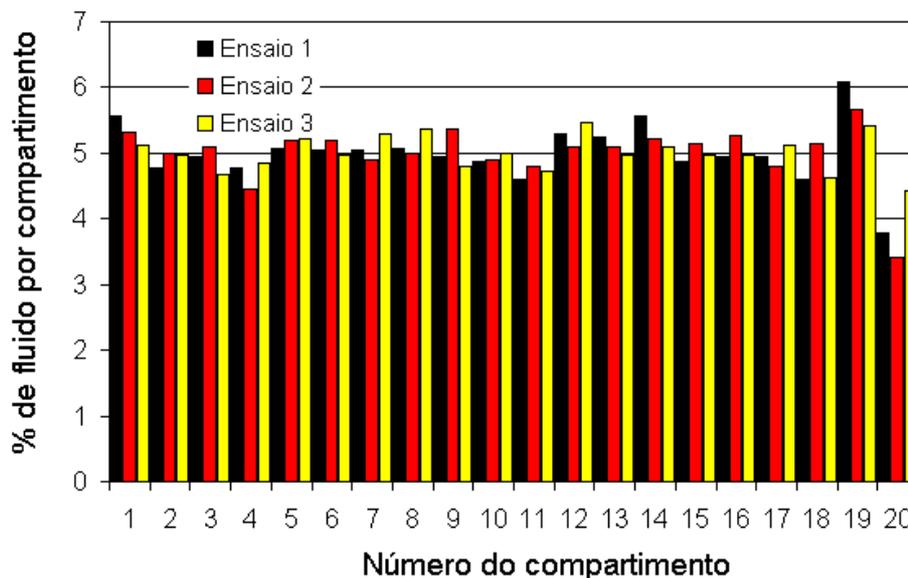


Figura 4- Distribuição de fluido ao longo do plano inclinado. Condições: ângulo de plano: 10°, velocidade do êmbolo: 1,24 cm/s, com uso de *quebra-molas*.

Esta condição foi adotada nos ensaios de lingotamento desenvolvidos.

4.2 Modelamento Matemático do Sistema de Alimentação de Metal

A Figura 5 mostra os perfis de nível de fluido ao longo do comprimento do sistema de alimentação de metal e ao longo da largura do plano inclinado, para uma inclinação de 25°, velocidade de 0,75 cm/s, sem o uso de *quebra-molas*.

Na Figura 5a, observa-se uma redução gradual da espessura do filme de líquido escoando ao longo do plano inclinado. Próximo à região de saída do plano, nota-se uma tendência da espessura do filme ficar aproximadamente constante e com valor de cerca de 2 mm. Com o valor de velocidade do fluido nesta região, pode-se ajustar a velocidade do cinto de lingotamento para um valor próximo, de modo a evitar o salto hidráulico⁽⁵⁾, que pode causar irregularidades na superfície superior da tira.

Na Figura 5b tem-se a variação da espessura do filme ao longo da largura do plano inclinado. A variação é bem similar àquela observada na Figura 3a, com espessuras maiores nas regiões intermediárias entre o centro e a parte lateral do plano. O uso desta configuração do sistema de alimentação levaria certamente à produção de tiras com espessuras não uniformes ao longo de sua largura. As simulações matemáticas com uso de *quebra-molas* estão sendo desenvolvidas.

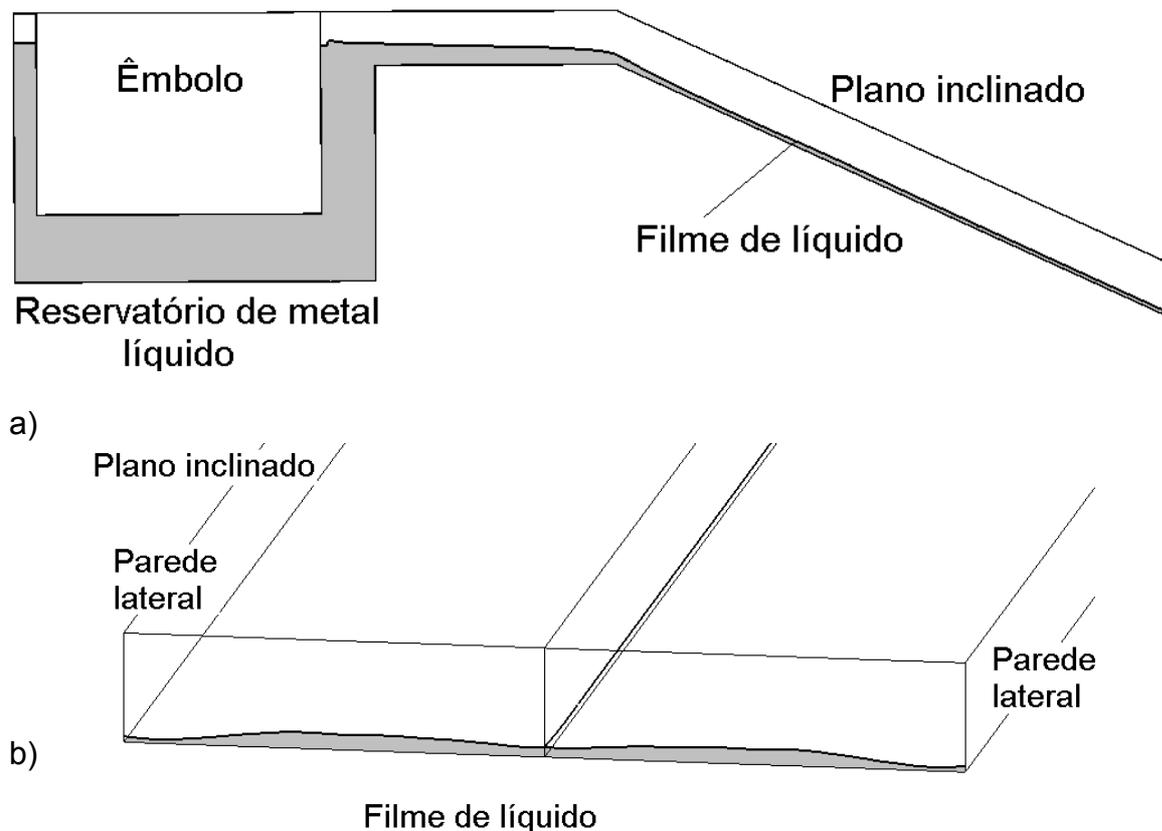


Figura 5- Variação da espessura da camada de fluido no sistema de alimentação. a) Vista longitudinal ao longo do plano de simetria. b) Vista transversal: corte ao longo da largura do plano inclinado, região próxima à deposição sobre o cinto.

4.3 Experimentos de Lingotamento

As Figuras de 6 e 7 mostram imagens de diferentes componentes da máquina de lingotamento de tiras, após as mudanças introduzidas. Na Figura 6, tem-se uma vista da parte interna do forno de fusão do metal, mostrando o recipiente onde é colocado o metal e o êmbolo que desloca o metal líquido para o plano inclinado durante o lingotamento. Esta Figura mostra também os cilindros hidráulicos e o rolo de esticamento do cinto. Os cilindros permitem o controle do deslocamento lateral e da intensidade de esticamento do cinto de lingotamento.



Figura 6- a) Vista da parte interna do forno de fusão de metal, do recipiente para fusão de metal e do êmbolo. b) Vista dos cilindros hidráulicos e do rolo de esticamento do cinto.

A Figura 7 mostra o plano inclinado do sistema de alimentação de metal líquido. Este plano foi revestido com uma placa refratária de baixa condutividade térmica, para reduzir as perdas de calor do metal durante o seu escoamento até se depositar sobre o cinto metálico.

A Figura 8 mostra fotos da máquina de lingotamento de tiras durante um dos ensaios e de uma das tiras produzidas, com detalhe da sua superfície superior. Observa-se algumas irregularidades nas partes laterais da tira. Este problema está sendo corrigido através da colocação de contenções laterais que serão colocadas sobre o cinto metálico. O acabamento superficial ainda precisa ser melhorado. Uma das possibilidades que está sendo investigada para corrigir este problema consiste em confinar a região do plano inclinado, protegendo-a com uma atmosfera inerte. Isso reduzirá os problemas de oxidação do metal, que certamente estão causando os problemas de qualidade superficial observados. A rugosidade da superfície em contato com o cinto foi medida, sendo obtidos valores na faixa de 5 a μm . Estes valores são inferiores aos de rugosidade do recobrimento aplicado sobre o cinto ($\sim 17 \mu\text{m}$).



Figura 7- Vista do sistema de alimentação de metal, com detalhe do plano inclinado na saída do forno de fusão.

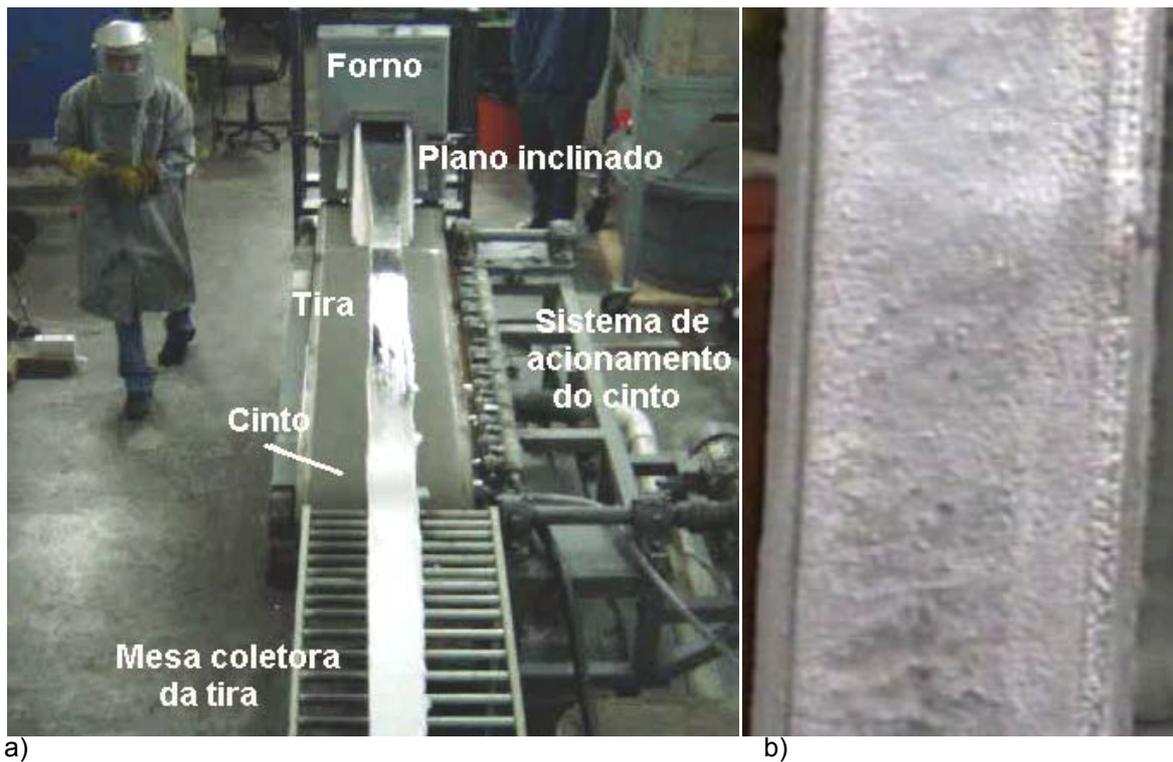


Figura 8- a)Vista da máquina de lingotamento durante um dos ensaios. b) Tira de metal patente.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram implementados aperfeiçoamentos em uma máquina de lingotamento de tiras finas pelo processo de cinto único previamente construída. Estes aperfeiçoamentos foram concentrados no sistema de alimentação de metal líquido e no controle do posicionamento e do esticamento do cinto metálico, usado como substrato para solidificação. Para o projeto adequado do novo sistema de alimentação, foram utilizados os modelamentos físico e matemático do escoamento do metal líquido neste sistema.

Após a introdução das modificações, foram realizados diversos experimentos de lingotamento. As tiras produzidas apresentaram ainda alguns problemas de qualidade superficial, particularmente na face superior que não entra em contato com o cinto. Numa próxima etapa do trabalho, serão introduzidas contenções laterais sobre o cinto e o sistema de alimentação de metal líquido será protegido por uma atmosfera inerte. Com estas alterações, espera-se produzir tiras com boa qualidade superficial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido ao projeto “Lingotamento Contínuo de Tiras Finas de Metal pelo Processo de Cinto Único”, Processo TEC 458/04. Os autores agradecem também à FAPEMIG e ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica concedidas aos estudantes de graduação, que participam do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 K. SCHWERDTFEGER. "Benefits, Challenges and Limits in New Routes for Hot Strip Production". ISIJ International, Vol. 38, 1998, p. 852-861.
- 2 K. SCHWERDTFEGER, K-H. SPITZER, J. KROOS, P. FUNKE, K-H. HOWER. "Further Results from Strip Casting With the Single-Belt Process". ISIJ International, Vol. 40, 2000, p. 756-764.
- 3 K-H. MOON, W-R. CHOI, M. ISAC, R.I.L. GUTHRIE, H. NOGAMI. "Physical and Mathematical Modeling in Development of Metal Delivery System for Single Belt Casting Process", ISIJ International, Vol. 43, 2003, p. 1538-1547.
- 4 U. Brackbill; D. B. Kothe; C. Zemach. "A Continuum Method for Modelling Surface Tension". *Journal of Computational Physics*, N° 100, 1992, pp. 335-354.
- 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.