

# TIRAS METÁLICAS OBTIDAS POR SOLIDIFICAÇÃO RÁPIDA

## **Márcio Iuji Yamasaki**

UNESP – Universidade Estadual Paulista - Depto. de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, miyamasaki@gmail.com

## **Antonio de Pádua Lima Filho**

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Depto. de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, padua@dem.feis.unesp.br

## **Suelen Cristina dos Santos**

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Depto. de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, su\_mec@hotmail.com

## **Leandro Akita Ono**

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Depto. de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, le.ono@terra.com.br

**Resumo:** *A laminação de tiras metálicas a partir do estado semi-sólido é um processo de fabricação recente, que apresenta inúmeras vantagens com relação ao processamento convencional. Com base nesse contexto o trabalho desenvolvido envolve uma análise experimental desse novo processo de fabricação. Uma adaptação do laminador duo foi feita para a obtenção de tiras metálicas diretamente do estado líquido usando ligas de 70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; e 50%Pb-50%Sn. O acabamento superficial e a microestrutura das tiras fundidas foram investigados. Os defeitos foram analisados no sentido de obter uma tira de boa qualidade.*

**Palavras-chave:** *Tixolaminação, Reofundição, Solidificação rápida, Tiras metálicas.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O processamento mecânico das ligas metálicas no estado pastoso começou a ser aplicado para a produção industrial ao final dos anos 80 [1]. Esse tipo de processamento conhecido como tixoconformação (*thixoforming*) tem substituído os processos convencionais de fabricação de componentes metálicos no campo metalúrgico e ganhando credibilidade no que se diz respeito à melhoria de qualidade com redução dos custos de produção, devido, basicamente, à eliminação de etapas no processamento. Dentro desta ideologia, encontra-se o processo *Twin-Roll* (laminador duo) para a fabricação de tiras diretamente a partir do metal líquido [1]. Produtividade, rendimento e qualidade são os principais requisitos necessários para atender essa nova tecnologia.

A produção de chapas metálicas de aço diretamente do estado líquido é viável e vem sendo pesquisada [2]. Entretanto, a idéia de laminar uma chapa metálica diretamente a partir do metal líquido foi idealizada inicialmente por Sir Henry Bressemer [3], inventor da moderna siderurgia.

A laminação de tiras metálicas a partir do processo *Twin-roll* empregando ligas de alumínio tem sido pesquisada recentemente por Haga e Suzuki [4-5]; Haga [6]; Lockyer et al. [7]; Lima Filho e Yamasaki [8]; Lima Filho *et al* [9]. Essa técnica utiliza uma calha (*cooling-sloop*), onde o metal líquido é vazado de modo que por transferência de calor metal/calha, a liga atinge o estado semi-sólido. As tiras são então tixolaminadas no laminador duo [4-9].

Embora as vantagens reconhecidas do processo *Twin-roll* são de grandes atrativos na indústria moderna, por outro lado existem particularidades tais como: limitações relativas aos tipos de ligas a serem laminadas, necessidades de tecnologia aplicada à extração de calor do sistema e quantidade de variáveis envolvidas para obter o produto desejado [4, 5, 6].

Entretanto, a necessidade de aperfeiçoamento e desenvolvimento da nova tecnologia é de grande importância para a aplicação industrial. Existem basicamente seis processos não convencionais para obtenção de tiras metálicas: 1. cilindro único (*Single roll*); 2. laminador duo (*Two high-mill*); 3. laminador duo com correia metálica cintada no cilindro inferior (*Single belt*), 4. correias metálicas conjugadas (*Twin belt*); roda cintada (*Wheel-belt*); e 6. deposição por spray (*Spray deposition*) [10].

Devido à importância desse processo, o trabalho desenvolvido, tem como objetivo analisar os dados experimentais na solidificação rápida de tiras metálicas de ligas de Pb/Sn (70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; e 50%Pb-50%Sn).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Adaptação do laminador duo para obtenção de tiras fundidas

As modificações necessárias no laminador duo constam de um sistema de resfriamento da liga metálica no estado líquido, um bocal de alimentação e uma calha de recebimento da tira no estado sólido (Figura 1). As características do laminador duo empregado são mostradas na Tabela (1). A distância entre os cilindros do laminador foi ajustada para obter a tira fundida.



(a)



(b)

Figura 1. Laminador duo adaptado para o experimento (a). Operação de vazamento (b).

Tabela 1. Configurações do laminador.

|                            |            |                       |      |      |  |
|----------------------------|------------|-----------------------|------|------|--|
| Potência do motor elétrico |            | 7,5cv; 1735 rpm       |      |      |  |
| Cilindros                  | Diâmetro   | 105 mm                |      |      |  |
|                            | Largura    | 101 mm                |      |      |  |
|                            | Material   | Aço carbono cementado |      |      |  |
|                            | Velocidade | Marcha                | rpm  | m/s  |  |
|                            |            | 1                     | 46   | 0,25 |  |
| 2                          |            | 85                    | 0,46 |      |  |
| 3                          |            | 132                   | 0,73 |      |  |
|                            | 4          | 195                   | 1,95 |      |  |

A calha de resfriamento é construída de chapa de aço de baixo carbono, suficiente para a troca de calor com o meio ambiente para produzir o material pastoso nas ligas 70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; e 50%Pb-50%Sn. Na parte superior da calha de resfriamento, um recipiente tipo funil (*tundish*) construído de grafite foi usado para realizar a operação de vazamento de maneira uniforme (Figura 1b).

Um reservatório (bocal) acoplado no cilindro inferior tem a função de armazenar o material semi-sólido. Este reservatório foi feito de material refratário para minimizar a troca de calor com o ambiente e assim evitar a solidificação do material pastoso durante o processamento. A parte externa do reservatório recebeu um suporte de aço, com o objetivo de facilitar a intercambiabilidade do mesmo. Isto tem permitido testar diversos tipos de bocais.

Na região de saída dos cilindros, uma calha foi construída para sustentar a tira metálica após o processamento. Um sistema de refrigeração utilizando chuveiro de água permitiu resfriar a tira, facilitando o seu manuseio na temperatura ambiente.

## **2.2. Revestimento dos cilindros e calha de resfriamento**

Os cilindros do laminador e calha de resfriamento foram pintados com grafite coloidal (Dycote DR 178) para evitar qualquer possibilidade de aderência da pasta metálica. A calha de resfriamento necessária para a obtenção do semi-sólido foi posicionada com um ângulo de inclinação de aproximadamente 60°, determinada experimentalmente, de acordo com a fração de sólido adequado (10 a 20%) [2], de modo a obter uma fluidez suficiente da liga e impedir a solidificação prematura no interior do bocal.

## **2.3 Bocal de acoplamento junto ao cilindro inferior**

O bocal acoplado no cilindro inferior para manter uma poça do material reofundido foi construído de um material refratário de alta porosidade o qual recebeu uma grossa camada de grafite coloidal (Dycote DR 178). Esta camada facilitou a remoção do material fundido do bocal e o seu uso posterior. A poça do material reofundido no interior do bocal foi mantida pelo pré-aquecimento e o seu monitoramento através de um termopar posicionado no seu interior.

## **2.4 Instrumentações para a tixoconformação das tiras metálicas**

O monitoramento da temperatura da liga durante todo o processo de tixolaminação é medida através de cinco termopares tipo K (6 mm de diâmetro e comprimento de 100 e 200 mm) dispostos na calha de resfriamento (Termopar 1 – superior, Termopar 2 – intermediário e Termopar 3 – inferior da calha), no bocal e na superfície do cilindro inferior (Figura 1b). Uma interface de aquisição (Pico TC-08 IMPAC) registra a temperatura versus tempo durante todo o processo. Um microcomputador 133MHz Pentium IBM com 48Mb de RAM, armazena os dados através do software Pico-Log.

## **2.5 Preparações metalográficas**

As amostras foram embutidas em resina, lixada, polida e atacada com Nital (95ml de álcool etílico e 5ml de HNO<sub>3</sub>).

# **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **3.1. Evolução da temperatura durante o processamento**

Os cilindros de laminação usados na solidificação rápida são feitos de cobre [2 – 4] devido a elevadas taxas de resfriamento (1000-2000 °C/s) [2, 10]. Isto evita a aderência da tira

superaquecida na superfície dos cilindros através do fenômeno do molhamento. Os cilindros de cobre podem ser resfriados internamente com água ou outro fluido refrigerante para obter maior troca de calor.

Neste experimento, com a baixa temperatura de processamento das ligas empregadas e a pintura dos cilindros de laminação (aço) por grafite coloidal como já mencionado não ocorreu aderência do material no cilindro de aço e as tiras foram obtidas. Figura 2 mostra o perfil térmico durante o processamento.

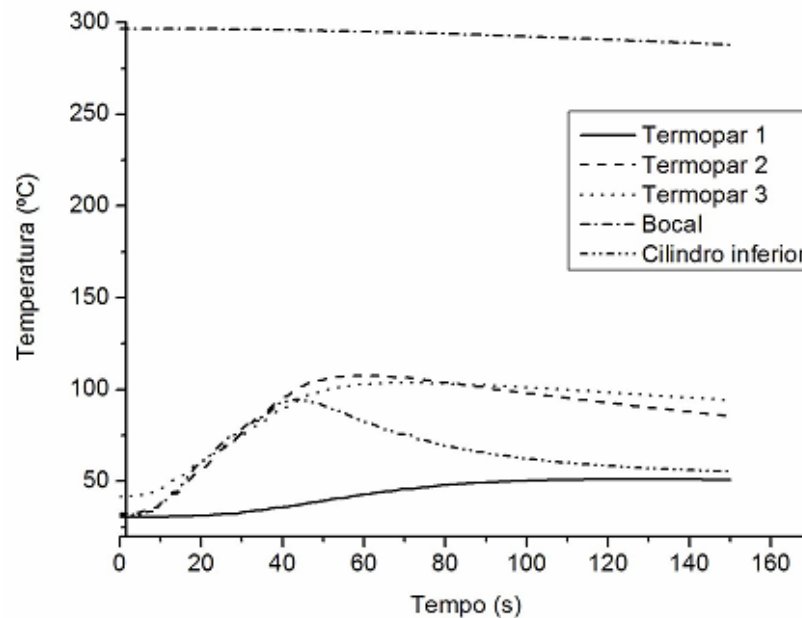


Figura 2. Evolução térmica durante o processamento para a temperatura de vazamento 300 °C.

### 3.2 Efeitos do intervalo de solidificação sobre a qualidade da tira tixoconformada

A liga 70%Pb-30%Sn (intervalo de solidificação de 75 °C) apresenta uma tixoconformação não contínua quando comparada com a liga 50%Pb-50%Sn (intervalo de solidificação de 75 °C), Figura 4. Então, maior o intervalo de solidificação maior a dificuldade de obter tiras tixolaminadas sem defeito: trincas superficiais e laterais. Este é um parâmetro importante para este processamento. De fato, quanto maior for o intervalo de solidificação mais trincas a quente são formadas entre as ramificações dendríticas e uma pasta metálica plástica para a tixolaminação não é formada, compare as Figuras 4a e 4b.

### 3.3 Formação da superfície superior e inferior da tira metálica

O material obtido da nucleação de sólido sobre o cilindro inferior forma uma casca sólida de material que carrega a pasta metálica sobre a sua superfície para ser conformada pelo cilindro superior figura 3c. O tipo de bocal e conseqüentemente a profundidade da poça semi-sólida são fundamentais na formação da superfície superior da tira. Assim, o material semi-sólido vai sendo agitado e transformando em uma estrutura reofundida em vez de uma estrutura convencional de solidificação. Bom contato entre o cilindro inferior e o material semi-sólido produziu uma superfície lisa, ou seja, copiando o acabamento do cilindro.

### 3.4 Micro estrutura da tira resfriada rapidamente

Figura 5 mostra as micrografias da secção transversal das tiras obtidas por solidificação rápida, causando a degeneração da estrutura lamelar eutética com a formação globular fina das fases  $\alpha$  (escura) e  $\beta$  (brancas) ricas em chumbo e estanho respectivamente. À medida que aproxima do

ponto eutético obtém-se uma granulação mais fina devido ao menor intervalo de solidificação da liga. Isto possibilitaria uma maior homogeneização dos microconstituintes ao longo da espessura da tira para uma posterior conformação mecânica. O grau de anisotropia planar diminuiria com esta microestrutura finamente dispersa (Figura 5).

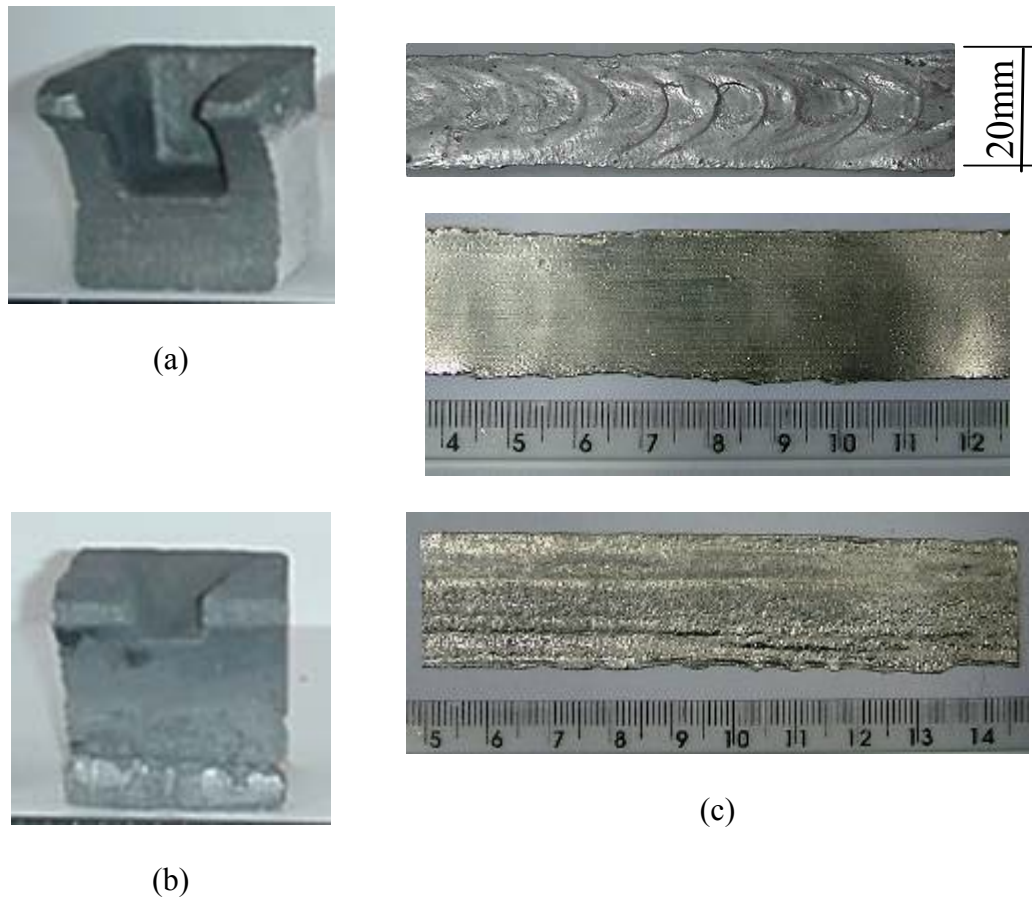


Figura. 3. Bocais de acoplamento (largura 90 mm, altura 100 mm e profundidade 85 mm) junto ao cilindro inferior (a) e (b); Detalhes da superfície superior (superfície rugosa) e inferior (superfície lisa) da tira não conformada (c).

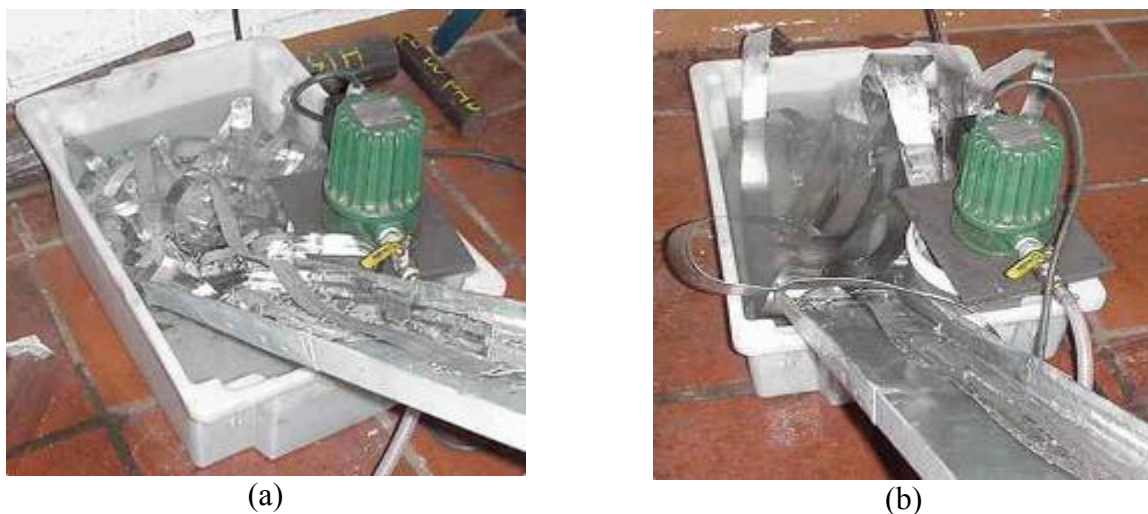
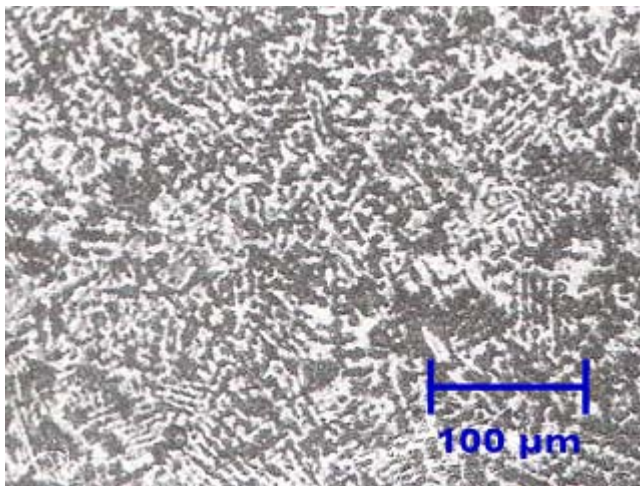
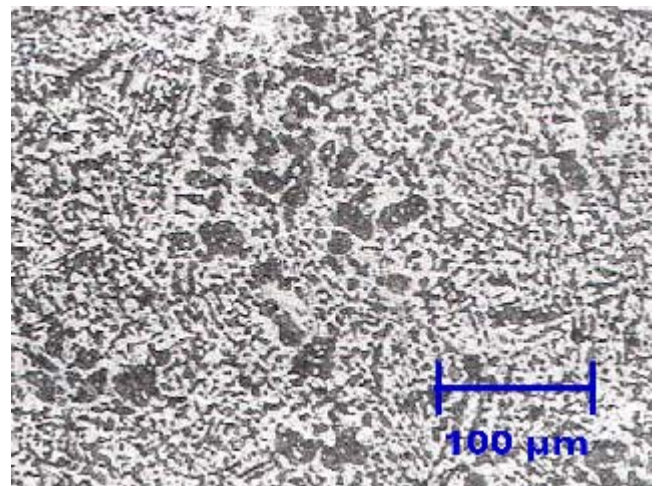


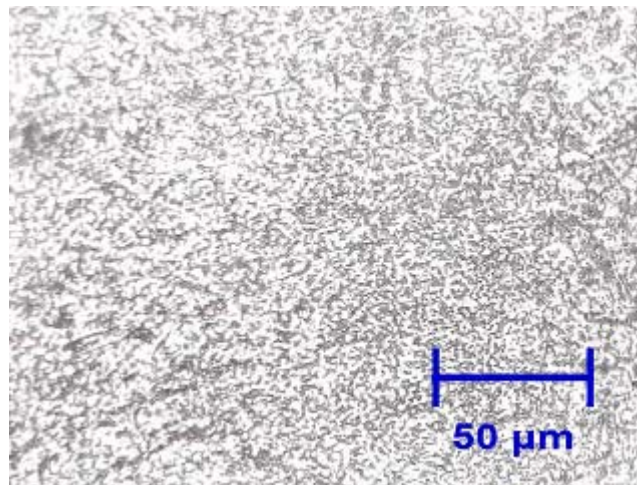
Figura 4. Produto final da tixolaminação da liga de 70%Pb-30%Sn vazada a 350°C mostrando muitos pedaços/lascas de tiras (a). Tira contínua é formada para a liga 50%Pb-50%Sn vazada a 300°C (b).



70% Pb-30% Sn



60% Pb-40% Sn



50% Pb-50% Sn

Figura 5. Micrografias das seções transversais das tiras solidificadas rapidamente. Esta falta de distribuição por igual das fases pode produzir tiras de comportamento anisotrópico e prejudicar a conformação plástica posterior deste material.

A plasticidade das pastas metálicas pode também estar relacionada com a distribuição morfológica dessas colônias. As microestruturas eutéticas regulares sendo substituídas pela formação de zonas esferoidais finas de fase  $\alpha$  e  $\beta$ , tornam a pasta metálica com maior característica tixotrópica. Estas zonas induzem a superplasticidade do material durante a tixolaminação e defeitos são minimizados, vide Figura 4.

#### 4. CONCLUSÃO

A quantidade variada de fatores envolvidos pode gerar inúmeros defeitos na tira laminada como trincas superficiais e laminação não contínua.

A dificuldade de controle do processo para a obtenção do produto desejado são fatores que restringem ainda esse método de fabricação.

O aperfeiçoamento e desenvolvimento tecnológico deste novo processo de fabricação em escala industrial possibilitam eliminação de etapas intermediárias da laminação convencional e alta produtividade aliada à economia de custo e espaço físico.

## 5. AGRADECIMENTOS

Aos técnicos da Oficina da UNESP-Campus de Ilha Solteira (Depto. de Eng. Mecânica): Sr. Marino e Sr. Edvaldo pelo suporte técnico. Somos muito gratos a Cookson Eletronics Brasil e Foseco pelas ligas e grafite coloidal utilizadas respectivamente neste trabalho. Prof. Edmar pelo uso do Pico TC-08 IMPAC. Sr. Valdeir e Prof. Del Rio pelas fotografias digitais.

## 6. REFERENCIAS

1. Hendricks, C. (1995), Strip casting technology – A revolution in the steel industry, in: Metallurgical Plant and Technology International, vol. 18, no. 3, pp. 42-49.
2. CRAMB, A. W., ROLLET, A. Strip casting: Anticipating new routes to steel sheet. Pittsburg: U.S. Department of Energy, 2001. (AISI/DOE Technology Roadmap Program Office. Sponsor TBD Report no. 9707).
3. H. Bessemer, US Patent no. 409,053, (1865)
4. HAGA, T. and SUZUKI, S. A high speed twin roll caster for aluminum alloy strip. Journal of Materials Processing Technology, p. 291-295, 2001.
5. HAGA, T., NISHIYAMA, T. and SUZUKI, S. Strip casting of A5182 alloy using a melt drag twin-roll caster. Journal of Materials Processing Technology, p. 103-107, 2003.
6. HAGA, T. Semisolid strip casting using a twin roll caster equipped with a cooling slope. Journal of Materials Processing Technology, p. 558-561, 2002.
7. S.A Lockyer, H. Yun Ming, J.D. Hunt and D. V. Edmonds. Microstructural defects in thin sheet twin roll cast aluminium alloy. Materials Science Forum. VI. 217-222, Part 1, 367-372, 1996.
8. Lima Filho, A. d. P., Yamasaki, M. I. Evaluation of strip rolling directly from the semi-solid state. Diffusion and Defect Data, Solid State Data. Part A, Defect and Diffusion Forum. 2006. pp. 433-436.
9. Lima Filho, A. d. P., Yamasaki, M. I., dos SANTOS, S. C., ONO, L. A. Estudo experimental da tixolaminação de tiras metálicas. In: 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro 24 a 27 de julho de 2006. pp.
10. LI, G., THOMAS, B. G. Transient thermal model of the continuous single-wheel thin strip casting process. Metallurgical and Materials transactions B, Vol. 27B, No. 3 (June), 1996, pp. 509-525

# METALLIC STRIPS ACHIEVED FROM RAPID SOLIDIFICATION

**Márcio Iuji Yamasaki**

UNESP - São Paulo State University - Department of Mechanical Engineering, Ilha Solteira,  
miyamasaki@gmail.com

**Antonio de Pádua Lima Filho**

UNESP - São Paulo State University - Department of Mechanical Engineering, Ilha Solteira,  
padua@dem.feis.unesp.br

**Suelen Cristina dos Santos**

UNESP - São Paulo State University - Department of Mechanical Engineering, Ilha Solteira,  
su\_mec@hotmail.com

**Leandro Akita Ono**

UNESP - São Paulo State University - Department of Mechanical Engineering, Ilha Solteira,  
le.ono@terra.com.br

***Abstract:** The rolling of metallic strips from the semi-solid state condition is a process of recent manufacture, which presents countless advantages regarding the conventional processing. On basis of this context the developed work involves an experimental analysis of this new process of manufacture. An adaptation of the rolling mill duo was done for the thixoforming of the metal strips using alloys of 70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; and 50%Pb-50%Sn. The finish of the strips was investigated. The defects were analyzed in the sense of obtaining a strip of good quality.*

***Key words:** Thixorolling, Rheocasting, Rapid solidification, Metallic strips.*