

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIRAS DE LIGAS METÁLICAS FUNDIDAS COM BAIXO INTERVALO DE SOLIDIFICAÇÃO¹

Antonio de Pádua Lima Filho²
Márcio Iuji Yamasaki³
Leandro Akita Ono³
Alcides Padilha⁴

Resumo

O processamento de tiras de ligas metálicas diretamente do estado líquido tem como objetivo a economia de energia em comparação com o processamento convencional. Este trabalho mostra a fabricação de tiras metálicas diretamente do estado líquido passando para o estado semi-sólido empregando a liga Sn37%Pb, próxima ao ponto eutético, com intervalo de solidificação de 3 °C e temperatura de fusão de 185 °C aproximadamente. O cilindro inferior arrasta o material semi-sólido para ser conformado pelo cilindro superior do laminador (tixolaminação). A tira semi-sólida fundida também foi fabricada usando somente o cilindro inferior pelo afastamento do cilindro superior do laminador. Esta tira foi laminada para verificar a evolução da microestrutura. Uma placa do material foi fundida e laminada para obter tira metálica convencional para comparação. As tiras foram cortadas em *blanks* (discos metálicos) para verificar o comportamento mecânico na estampagem profunda e estiramento (*ironing*). Um comportamento isotrópico foi observado nas tiras não convencionais resultado da não direcionalidade da microestrutura. Defeitos nas tiras semi-sólidas fundidas são brevemente analisados.

Palavras-chave: Tiras metálicas semi-sólidas fundidas; Estampagem profunda; Estiramento; Anisotropia; Tixolaminação.

MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF CAST METALLIC ALLOY STRIPS WITH LOW SOLIDIFICATION INTERVAL

Abstract

Processing of metallic alloy strips directly from the liquid state has as a distinct energy saving advantage over conventional processing. This work shows the processing of metallic strip directly from the liquid state to the semi solid state employing the Sn37%Pb alloy having a solidification interval of 3 °C and melting temperature of approximately 185 °C. A lower roll drags the semi-solid material which is then formed by an upper roll (thixorolling). The semi solid strip cast was also produced using only the lower roll. This strip was rolled to reveal the evolution of the microstructure, and for comparison, a plate of the alloy was cast and rolled to obtain conventional strip. The strips were cut in blanks to determine the mechanical behaviour during deep drawing and ironing. An isotropic behaviour was observed in the non-conventional strip indicating an alignment fault in the microstructures. Defects of the semi solid strip casting are briefly analyzed.

Key words: Semi solid strip casting; Deep drawing and ironing; Anisotropy; Thixorolling.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Eng. Mecânica - Eng. Metalúrgico pela EEIMVR-UFF; Mestre em Ciência pelo ITA; Dr. pela University of Sheffield – Inglaterra.

³ Engenheiro Mecânico, UNESP-Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica.

⁴ UNESP-Campus de Bauru – Depto. de Eng. Mecânica - Eng. Mecânico pela Faculdade de Engenharia de Bauru; Mestre em Engenharia Mecânica pela UFRJ-COPPE; Dr. em Engenharia Mecânica pela UNICAMP, Livre Docente pela UNESP-Campus de Bauru.

1 INTRODUÇÃO

A primeira idéia de fabricar tiras metálicas diretamente do estado líquido foi concebida pelo Sir Henry Bessemer⁽¹⁾ o qual impulsionou a Revolução Industrial pela fabricação de aço em larga escala. A sua idéia era realizar o vazamento da liga no estado líquido entre dois cilindros dispostos verticalmente para produzir tiras metálicas fundidas. Desde então, a necessidade de economia de energia devido ao crescimento populacional e uso de fontes de energia não renováveis a base de petróleo causando problemas ambientais, foram determinantes para realizar pesquisas sobre fontes alternativas de energia e novos processos de fabricação.

Assim, a fabricação de tiras metálicas obtidas diretamente do estado líquido está sendo cada vez mais pesquisada para substituir os processos convencionais visando economia de energia e de espaço físico. Tiras metálicas são amplamente usadas nas indústrias automotivas e de eletrodomésticos.

Os processos tradicionais de fabricação de tiras metálicas para conformação mecânica passam por diversas etapas, lingotamento (convencional ou contínuo), resfriamento, pátio de inspeção de lingotes e placas, pré-aquecimento e laminação a quente, trem de laminação, bobinagem, limpeza, laminação a frio, forno de recozimento contínuo ou em caixa, e acabamento final.

Os processos contínuos de fabricação de tiras fundidas são muito mais complexos, pois envolvem muitas variáveis, por exemplo: fluidez (relacionado à composição química e temperatura de vazamento), intervalo de solidificação das ligas metálicas, velocidade de solidificação, transporte de massa e calor, controles estático (fluxo de alimentação da liga fundida) e dinâmico (velocidade dos cilindros), segregação de fase durante a fabricação, e altura do metal fundido no bocal de acoplamento junto aos cilindros.

As taxas de resfriamento para fabricação de tiras metálicas fundidas são bem mais elevadas ($1.500^{\circ}\text{C/s} - 2.000^{\circ}\text{C/s}$)⁽²⁾ do que aquelas empregadas no lingotamento contínuo ($0,5^{\circ}\text{C/s} - 3^{\circ}\text{C/s}$).⁽³⁾ Assim, o controle das variáveis é bem mais complexo e fundamental para produzir tiras metálicas de qualidade para substituir as tiras metálicas obtidas pelo processo convencional.

Existem seis rotas de fabricação de tiras metálicas diretamente do estado líquido: 1. empregando um único cilindro (cilindro de solidificação) usado para o arrastamento do metal fundido; 2. participação de dois cilindros-duo (disposição vertical ou horizontal); 3. cilindro cintado, 4. dois cilindros cintados; 5. roda cintada; e 6. deposição por spray.⁽⁴⁾ O processo 5 é denominado de “Hazelett”.⁽⁵⁾

Praticamente, apenas três rotas têm potencial para a produção industrial: 1. cilindro de solidificação; 2. dois cilindros na posição horizontal, isto é, o cilindro inferior arrasta o material no estado semi-sólido para ser conformado pelo cilindro superior; e 3. dois cilindros de solidificação na posição vertical (o metal líquido é mantido pela ajuda de barreiras laterais).⁽⁶⁾

Os cilindros são usados para extrair calor sensível e latente do metal durante o processamento. Assim, cilindros de cobre e aço internamente refrigerados por água têm sido usados para a produção de tiras metálicas ferrosas⁽⁷⁾ e não ferrosas passando pelo estado semi-sólido.⁽⁸⁻¹⁰⁾ O processamento de tiras metálicas no estado semi-sólido tem sido recentemente empregado para a produção contínua de compósitos com matriz metálica.⁽¹¹⁾

Neste trabalho, os autores empregam os processos de cilindro único e duo na posição horizontal para a fabricação de tiras metálicas diretamente do estado líquido passando pelo estado semi-sólido. Uma placa é lingotada e laminada para obter tira

metálica pelo método convencional. Das tiras obtidas, são realizadas análises para caracterização mecânica através da estampagem profunda seguida de *ironing*, e metalográfica. As ligas Pb/Sn têm microestrutura parecida com as ligas de alumínio. Assim, os dados obtidos na simulação podem ser usados para ligas de maior ponto de fusão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Laminador Duo Empregado

A Figura 1 mostra um esquema e fotografias de parte do laminador duo adaptado para a fabricação de tiras metálicas diretamente do estado líquido aplicando o processamento por cilindro único e duplo (tixolaminação). A tira processada por cilindro único no estado semi-sólido foi posteriormente laminada para verificar o efeito sobre a microestrutura. Uma lingoteira de dimensões de 10 mm x 45 mm x 200 mm foi construída para a fundição de placa visando à laminação de tira metálica convencional.

Os cilindros do laminador são feitos de aço ao carbono comum com 105 mm e 101 mm de diâmetro e comprimento respectivamente. A superfície dos cilindros tem um acabamento até a lixa 1200. Este laminador permite a utilização de quatro velocidades superficiais dos cilindros: 15 m/min; 28 m/min; 44 m/min; e 177 m/min. A velocidade dos cilindros de 15 m/min tem mostrado o melhor resultado e assim é usada neste trabalho.

2.2 Liga Utilizada

Um cadinho de 500 ml é usado para fundir a liga Sn37%Pb num forno elétrico (6.600 w / 220 V) antes do vazamento num *tundish* de 80 ml a uma vazão de aproximadamente 13 ml / s sobre a calha de resfriamento para obter o material semi-sólido. A temperatura de fusão e o intervalo de solidificação desta liga são respectivamente de 185°C e 3°C. A composição química desta liga está próximo ao ponto eutético (temperatura do eutético de 183°C com 61,9%Sn) e assim apresenta elevada fluidez. A temperatura de vazamento foi controlada para obter uma tira metálica semi-sólida de boa qualidade.

2.3 Controle da Operação de Vazamento e Produção do Material Semi-Sólido

O óxido / escória de Sn/Pb na superfície do banho metálico foi removido mecanicamente do cadinho e a temperatura de vazamento foi medida com um termopar de imersão tipo K de 3 mm de diâmetro.

O *tundish* foi projetado para ter um controle estático durante a operação de vazamento que alimenta continuamente a calha de resfriamento para produzir o material semi-sólido a uma distância de aproximadamente 130 mm. Esta calha é feita de aço ao carbono comum na forma “v” com uma abertura na extremidade para permitir o material semi-sólido alimentar o bocal com formato de nariz, posicionado junto ao cilindro inferior do laminador (cilindro de solidificação). A inclinação da calha de resfriamento é aproximadamente 21°.

2.4 Geometria do Bocal que Mantém o Material Semi-Sólido

O bocal é pré-aquecido para evitar a pré-solidificação do material semi-sólido e assim manter a largura da tira metálica durante o tempo de fabricação. Uma boa interface bocal/cilindro inferior evita o vazamento do material semi-sólido durante o processamento. O bocal tem um volume de aproximadamente 100 ml com dimensões de 45 mm de largura, 45 mm e 81 mm em profundidade na parte inferior e superior respectivamente, e 55 mm de altura. O arco de contato entre o cilindro e a superfície do bocal é em torno de 50 mm ($\alpha_1 = 60^\circ$) e desse ponto até ao plano de saída do laminador é 63 mm ($\alpha_2 = 69^\circ$).

2.5 Instrumentação do Aparato Experimental

A calha de resfriamento para fabricar o material semi-sólido é instrumentada por três termopares (T_1 , T_2 e T_3). Os termopares T_4 e T_5 acompanham a evolução de temperatura no bocal e no cilindro inferior respectivamente. Um eletrodo de grafite é usinado para acomodar o termopar T_5 junto ao cilindro inferior. Todos os termopares empregados são do tipo K de 3 mm de diâmetro.

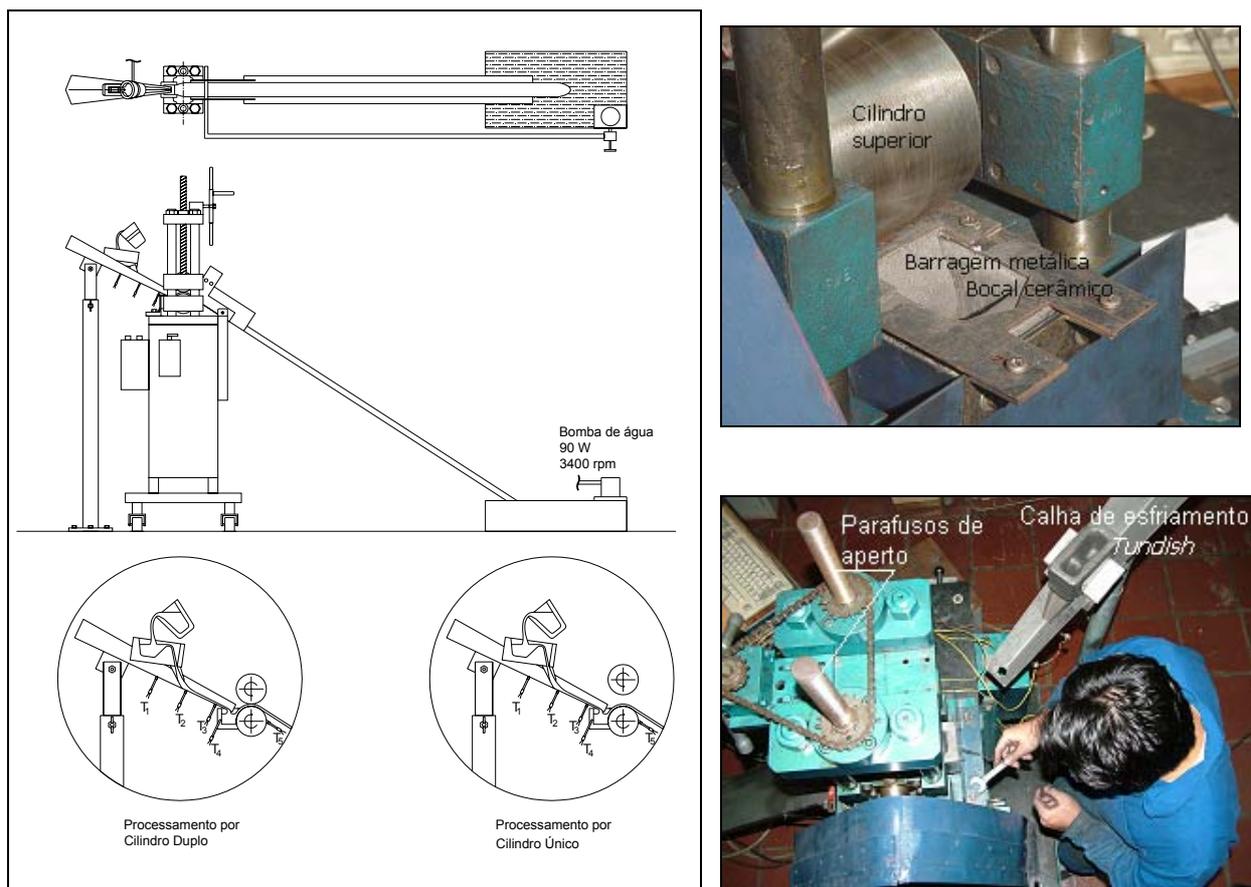


Figura 1. Esquema do laminador duo mostrando o processamento por cilindro duplo e cilindro único. Fotografias mostrando o bocal junto ao cilindro inferior e a calha de resfriamento instrumentada para produzir o material semi-sólido.

2.6 Fabricação dos *Blanks* para Estampagem Profunda e *Ironing*

Um ferramental de corte foi projetado e construído para a fabricação de *blanks* de 40,2 mm de diâmetro numa prensa excêntrica de 12 tf. Estes *blanks* são necessários para a caracterização mecânica das tiras metálicas obtidas através da estampagem profunda e *ironing* realizada numa prensa hidráulica marca Heckert de capacidade de 980,7 kN (100 tf) a uma velocidade de 0,4 mm/s.

A matriz de estampagem tem um diâmetro interno de 23,7 mm e o punção de 20,7 mm e um anel de anti-rugas foi usado durante a operação de estampagem. Quatro matrizes de estiramento (*ironing*) foram fabricadas com diâmetros de 23,4 mm, 22,3 mm, 21,8 mm e 21,6 mm para reduzir o diâmetro externo do copo de 23,7 mm mantendo constante o diâmetro interno de 20,7 mm. A primeira matriz de *ironing* teve como objetivo ajustar a peça junto ao punção para as etapas seguintes. Assim o segundo, terceiro e quarto estiramentos foram realizados para ter uma redução verdadeira na espessura de 0,41, 0,35 e 0,15 respectivamente para distribuir suavemente a deformação plástica e evitar falha. O punção tem um furo central e lateral de 1 mm para facilitar a retirada do produto conformado da matriz. O copo foi extraído da matriz de *ironing* pela ajuda de um extrator (Figura 2).

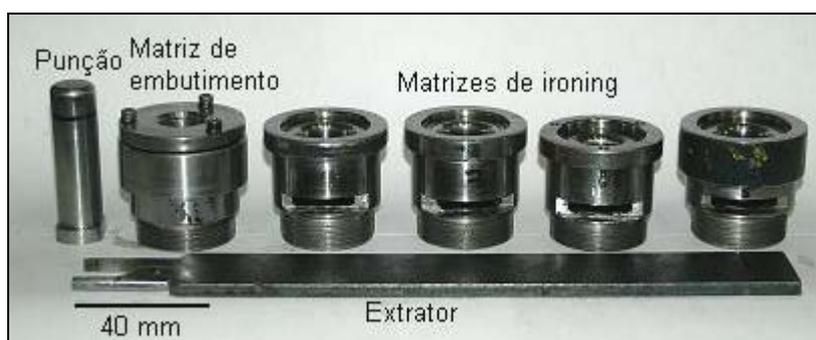


Figura 2. Ferramental de estampagem profunda e *ironing* como indicado.

2.7 Sistema de Aquisição de Dados e Sinais

Uma célula de carga de capacidade de 4,9 kN (500 kgf) apresentando uma curva de calibração de $F = 490,5 V$ (F e V significam força em Newton e Volts, respectivamente) foi usada para obter a força de estampagem e *ironing*. A célula de carga foi posicionada sobre uma esfera de aço para obter acurácia na medida da carga de conformação (Figura 3).



Figura 3. Fotografias ilustrativas no posicionamento da matriz na célula de carga durante a operação de conformação.

Um osciloscópio de memória digital Tecktronics TDS 210, um indicador digital de deformação (modelo TMDE) e um microcomputador básico de 133MHz Pentium IBM com 48Mb de RAM com um software Wavestar compõem o sistema de aquisição de sinais e dados da carga ao longo do tempo. Um sistema de aquisição de dados completa a instrumentação do aparato experimental, formada por uma interface (Pico TC-08 IMPAC) que registra as temperaturas versus tempo durante a fabricação das tiras metálicas semi-sólidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da Fluidez na Fabricação da Tira Semi-Sólida Fundida

A Figura 4 ilustra o acabamento das tiras semi-sólidas da liga Sn/37%Pb vazadas a 280°C e 220°C aproximadamente. A temperatura de vazamento de 220°C produz uma largura que segue o gabarito do bocal previamente aquecido. O bocal cerâmico como construído e pintado com grafite coloidal (Dycote Dr 178), tem suportado diversas simulações e não é suscetível de erosão e quebra. A velocidade de 15 m/min dos cilindros do laminador foi suficiente para promover a solidificação do material semi-sólido para um arco de contato de 50 mm com o cilindro inferior num tempo de 0,2 s.

Por outro lado, a tira vazada a 280°C não segue a largura do bocal de 45 mm e espalha sobre o cilindro de solidificação devido ao alto grau de molhamento. Assim, maiores temperaturas de vazamento necessitam maior tempo de contato com o cilindro de solidificação ou a sua maior capacidade de extração de calor. De fato, a quantidade da fase sólida no material pastoso diminui com o superaquecimento da liga fundida, e maior quantidade de calor latente deve ser removido pelo cilindro inferior num menor intervalo de tempo. O controle da velocidade dos cilindros é uma outra variável importante para obter uma solidificação adequada do material semi-sólido para produzir tiras metálicas semi-sólidas fundidas de boa qualidade.

A superfície da tira solidificada sobre o cilindro de solidificação produz uma superfície de bom acabamento. Por outro lado, a superfície que solidifica voltada para a atmosfera é extremamente rugosa e não propícia para a estampagem principalmente para temperatura de vazamento a 280°C. Neste caso, uma laminação posterior pode garantir uma superfície lisa. Problemas de aderência das tiras sobre os cilindros não ocorreram para as condições aplicadas.

Guardas e guias não são necessários na cadeira de laminação para garantir o alinhamento das tiras semi-sólidas fundidas durante o processamento. Então, um equipamento compacto e assim de fácil manutenção e preparação resulta.

3.2 Variação da Largura e Espessura da Tira Semi-sólida Fundida

A Figura 5 mostra a variação da espessura e largura ao longo do comprimento da tira semi-sólida fundida a 220°C. Tanto a largura quanto a espessura aumentam das extremidades para a região central da tira metálica. A região central é relacionada ao nível máximo atingido pela piscina do material semi-sólido no bocal durante o processamento. Então, existe um período de transiente inicial (cabeça da tira), estado estacionário (parte central) e um período de transiente final (cauda da tira).

A geometria do bocal e seu pré-aquecimento garantem a produção da tira metálica semi-sólida fundida com largura de 45 mm aproximadamente. Um controle dinâmico

deve ser aplicado para ajustar a velocidade dos cilindros. Isto pode diminuir perdas nas extremidades das tiras e assim obter o máximo de eficiência do processo.



Figura 4. Comparação do acabamento da superfície voltada para atmosfera da tira semi-sólida para duas temperaturas de processamento como indicadas e o material retido na soleira do bocal cerâmico (*nozzle*) após o ensaio.

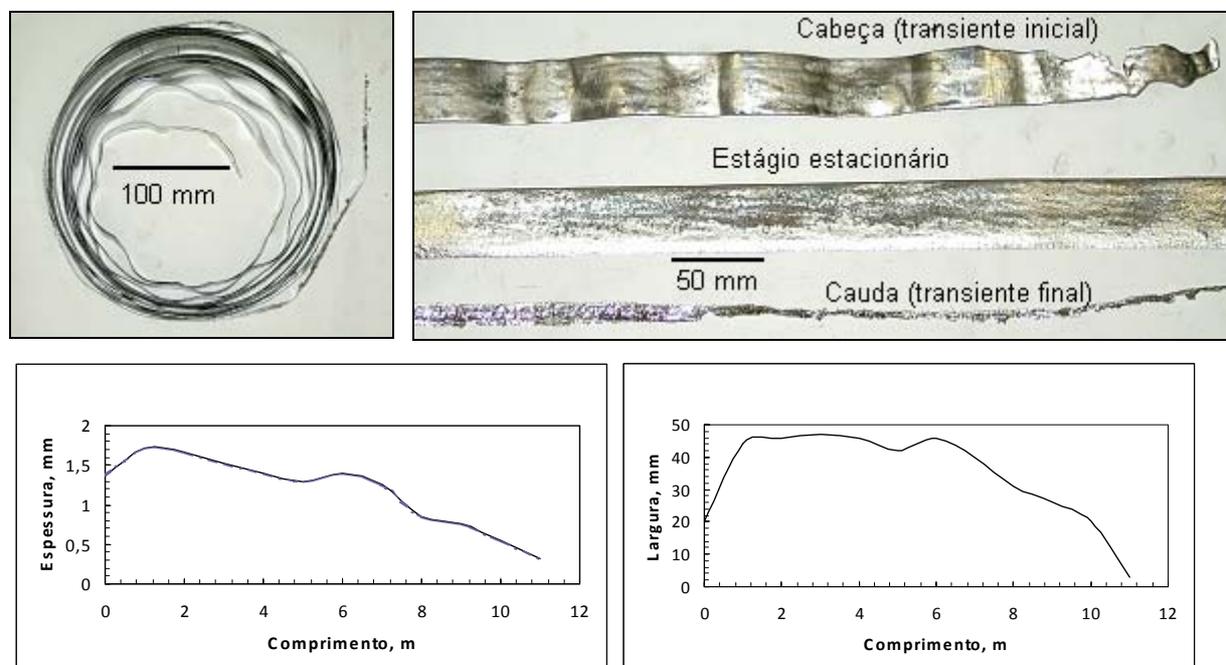


Figura 5. Bobina da tira semi-sólida fundida a 220°C e estágios obtidos ao longo da tira. Perfis da espessura e largura da bobina da tira semi-sólida fundida.

3.3 Tira Metálica Tixolaminada e Perfis de Temperaturas de Processamento

O processo de tixolaminação foi usado para conformar a superfície que se solidifica voltada para a atmosfera e assim um melhor acabamento é obtido. Uma economia de energia ocorre, pois não é necessária a posterior laminação no estado sólido. A força de tixolaminação consiste de duas partes: a primeira para conformar a lama/pasta metálica levada pela casca metálica; a segunda parte consiste em conformar a casca metálica (região coquilhada) a qual tem maior tensão de escoamento. Assim, a conformação de áreas heterogênea ocorre.

Durante a tixolaminação tensões de origem térmica desenvolvem na interface casca coquilhada/cilindro de solidificação a qual transporta o material semi-sólido

superaquecido. Tensões de origem mecânica também originam pela pressão aplicada pelos cilindros do laminador.

Então, é necessário controlar a espessura da tira semi-sólida fundida formada pela casca coquilhada que arrasta o material semi-sólido em sua superfície a fim de prever a distância entre os cilindros do laminador. As temperaturas de vazamento testadas foram de 220°C, 240°C e 260°C. Para todas as temperaturas empregadas, a parte do transiente inicial (cabeça da tira) não foi contínua. Isto pode ser explicado pela alta extração de calor dos cilindros os quais estão na temperatura ambiente no início do processo, e pela pressão dos cilindros. Com o prosseguimento da tixolaminação, a temperatura dos cilindros aumenta e um pedaço de tira contínua resulta para todas as condições (Figura 6).

O aumento na largura foi causado pela tensão de compressão dos cilindros sobre as duas partes da tira semi-sólida fundida a 220°C e 240°C. Por outro lado, somente parte da tira é conformada para temperatura de processamento de 260°C. Isto pode ser explicado pela elevada fluidez da liga, não criando uma espessura suficiente para a tixolaminação. Então, a temperatura para tixolaminação deve variar entre 220°C e 240°C. Naturalmente, o aumento da força de separação entre os cilindros ocorre quando menor for o espaçamento entre eles. Como resultado, defeitos de bordas como trincas nas tiras tixolaminadas ocorreram para uma distância entre cilindros menor de 1 mm.

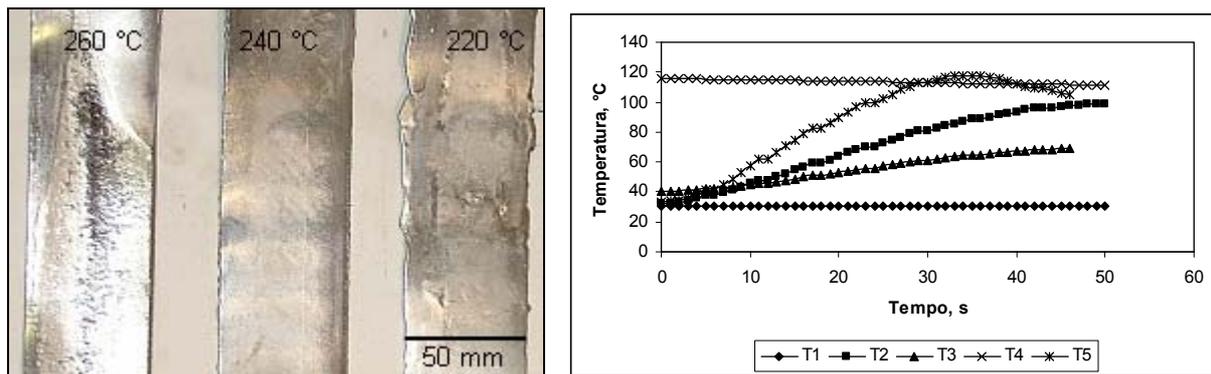


Figura 6. Tira tixolaminada obtida pela temperatura de vazamento de 220°C, 240°C e 260°C para distância entre cilindros de 1,2 mm. A tira tixolaminada a 240°C foi usada para obtenção de *blanks* para a caracterização mecânica. Perfis de temperatura de processamento.

3.4 Caracterização Mecânica

A Figura 7 mostra o resultado dos testes de estampagem profunda e *ironing*. A relação entre o diâmetro do *blank* (40,2 mm) pelo diâmetro do punção (20,7 mm) resulta numa razão limite de estampagem (LDR) de 2,0 aproximadamente. O diâmetro do punção de 18 mm testado resultou na falha do copo estampado. As propriedades mecânicas das tiras obtidas não convencionalmente (tira metálica semi-sólida fundida, tira metálica semi-sólida fundida laminada, e tixolaminada) mostraram boa conformabilidade comparável às tiras fabricadas convencionalmente. Praticamente, orelhas não formaram nas tiras não-convencionais. Isto indica um maior grau de isotropia em relação às tiras convencionais. Assim, menor perda de material resulta da necessária usinagem das orelhas do copo estampado. A deformação verdadeira total na espessura na operação de *ironing* foi de 92% aproximadamente. A espessura do copo estampado aumenta devido às tensões circunferenciais de compressão geradas durante a operação de estampagem.



Figura 7. Copos obtidos através da estampagem profunda e *ironing* das tira semi-sólida fundida a 220°C (a), tira semi-sólida fundida laminada (b), tixolaminada a 240°C (c) e laminada convencionalmente (d). Exemplo da seqüência da operação de estiramento (e).

3.5 Evolução Microestrutural

A Figura 8 mostra as microestruturas dos materiais obtidos: tira semi-sólida fundida, tira semi-sólida fundida laminada, tira tixolaminada e tira laminada. A microestrutura da tira semi-sólida fundida apresenta uma região de formação eutética e com tendência a desagregar em direção da face voltada para a atmosfera. A tira semi-sólida fundida laminada apresenta uma microestrutura refinada indicando a coalescência da fase α rica em chumbo de cor preta. Isto propicia um material mais favorável para a deformação plástica. A tira tixolaminada apresenta uma microestrutura refinada com a agregação da fase α dispersa numa matriz β rica em estanho (branca). Esta agregação foi causada pela compressão dos cilindros no material pastoso rico em dendritas α . A tira laminada apresenta uma microestrutura orientada que causou a anisotropia do material (Figura 7 (d)).

4 CONCLUSÃO

As diversas simulações usando ligas de Pb/Sn têm revelado que a composição química, temperatura de vazamento, velocidade dos cilindros, controle da temperatura do bocal junto ao cilindro inferior, superfície de acabamento dos cilindros e geometria do *tundish* (panela intermediária) têm efeito significativo na qualidade do produto. Aparentemente a velocidade dos cilindros de 15 m/min e temperatura de vazamento entre 220°C a 260°C foram condições de processamento adequadas para a fabricação de tiras semi-sólidas fundidas. O controle para a tixolaminação para a liga empregada Sn/37%Pb é mais rigoroso para obter uma tira contínua devido à elevada fluidez dessas ligas próximas ao ponto eutético. Maiores temperaturas de vazamento e fluidez precisam de maior tempo de contato com o cilindro inferior para a solidificação completa.

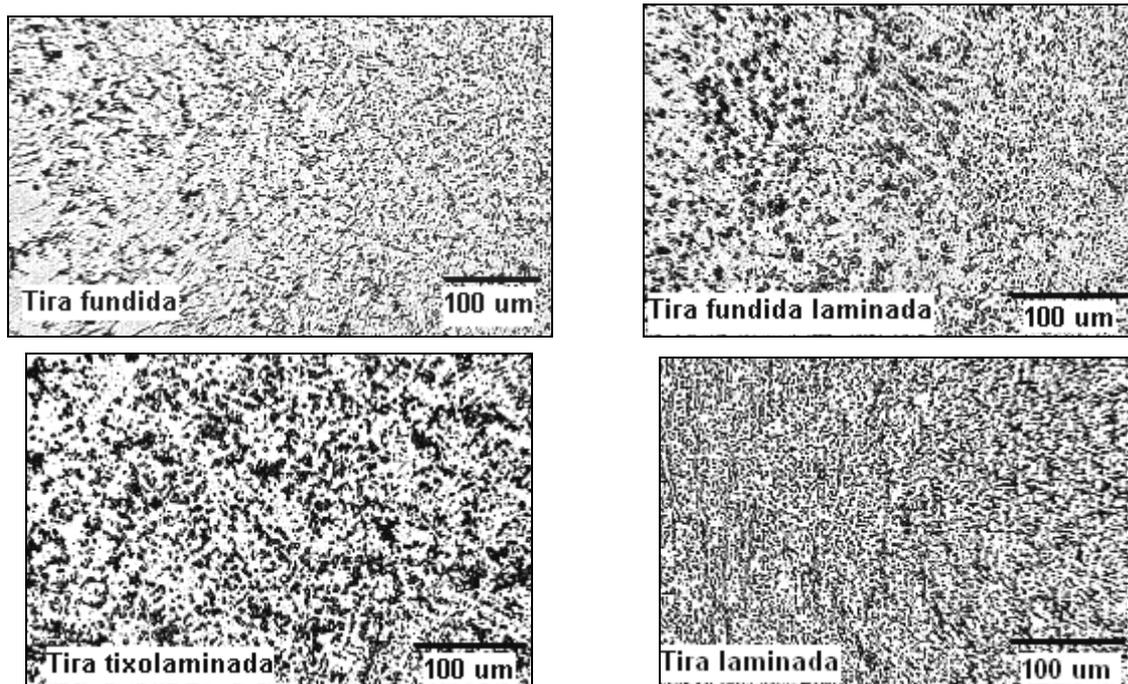


Figura 8. Microestruturas das tiras obtidas.

Agradecimentos

Somos muito gratos à FAPESP pela Bolsa de Iniciação Científica de Leandro Akita Ono e meu amigo Nielsen Kann pela sua gentileza na revisão do *abstract*.

REFERÊNCIAS

- 1 BESSEMER, H. U. S. Patent, Report No. 49053, 1865.
- 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 GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS, C. A. d., CHEUNG; N. Lingotamento contínuo de aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 4 LI, G., THOMAS, B. G. Transient thermal model of the continuous single-wheel thin-strip casting process. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 27B, n. 3, p. 509-525, 1996.
- 5 CAMPOS FILHO, M. P., DAVIES, G. J. Solidificação e fundição de metais e suas ligas. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978.
- 6 CHANG, F. C. Numerical simulation of MHD for electromagnetic edge dam in continuous casting, Oct 19 1999. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge/serlets/purl/11726-10ASMB/webviewable/>. Acesso em: 22 jan. 2008.
- 7 SAHAI, Y., GRUPTA, M. Simulation and analysis of thin strip processes. Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (IPMM'99), Honolulu, HI, USA, v. 1, p. 119-127, July 1999.
- 8 LIMA FILHO, A. d. P., Yamasaki, M. I. Evaluation of strip rolling directly from the semi-solid state, Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Switzerland, vols. 116-117, p. 433-436, 2006.

- 9 LIMA FILHO, A. d. P., YAMASAKI, M. I., SANTOS, S. C., ONO, L. A. Estudo experimental da tixolaminação de tiras metálicas. In: 61° CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2006, Rio de Janeiro. SÃO PAULO: ABM, 2006. 1 CD.
- 10 LIMA FILHO, A. d. P., YAMASAKI, M. I., ONO, L. A., NAMPO, L., PADILHA, A. A comparison of deep drawing and ironing of metal alloy strip produced conventionally and non-conventionally via semi solid material processing, Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Switzerland, submetido em 2008.
- 11 HAGA, T., TAKAHASHI, K. Casting of composite strip using a twin roll caster, Journal of Materials Processing Technology, p. 701-705, 2004.