

ESTUDO EXPERIMENTAL DA TIXOLAMINAÇÃO DE TIRAS METÁLICAS¹

*Antonio de Pádua Lima Filho²
Márcio Iuji Yamasaki³
Suelen Cristina dos Santos⁴
Leandro Akita Ono⁴*

Resumo

Um laminador duo irreversível foi modificado para produzir tiras metálicas de ligas de Pb/Sn (70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; e 50%Pb-50%Sn) diretamente do estado líquido a uma velocidade de 28m/min. Tiras de 1, 0,7 e 0,5mm de espessura foram obtidas. A tira de 1mm não foi conformada pelo cilindro superior, mas as tiras de 0,7 e 0,5 foram tixolaminadas. Esta última apresentou trincas no centro o que pode ser atribuído ao abaulamento convexo excessivo dos cilindros para esta abertura. Conseqüentemente, a distância entre cilindros de 0,7mm foi escolhida para continuar o trabalho experimental. A liga 50%Pb-50%Sn tendo relativamente menor intervalo de solidificação foi capaz de ser tixolaminada continuamente. Ao passo que as outras ligas usadas formaram vários pedaços de tiras. Este fenômeno pode ser atribuído ao menor intervalo de solidificação que resulta em grãos com menor ramificação dendrítica capaz de fornecer a pasta metálica plástica reofundida necessária para a tixoconformação. Os cilindros, o bocal e a calha de vazamento foram pintados com grafite coloidal para evitar qualquer aderência do material das ligas empregadas no estado líquido e semi-sólido. As microestruturas das tiras obtidas foram investigadas.

Palavras-chave: Tixolaminação; Reofundição; Solidificação rápida; Tiras metálicas.

EXPERIMENTAL STUDY ON THIXOROLLING OF METALLIC STRIPS

Abstract

A two-high roll mill was modified to produce Pb/Sn (70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; and 50%Pb-50%Sn) alloy metallic strip directly from the liquid state at a velocity of 28m/min. Roll gaps of 1, 0.7 and 0.5mm were used to gauge the metallic strip. At a 1mm roll gap, the upper roll did not form strip, but strips of 0.7 and 0.5mm were able to be thixorolled. The latter however, developed cracks in the centre of the strip which could be related to an unsuitable degree of convex camber on the rolls for this gauge. Consequently, the 0.7mm roll gap was chosen to continue the experimental work. The 50%Pb-50%Sn alloy having a relatively narrow solidification range was then able to be thixorolled continuously, whereas the other alloys with wider ranges could not. This phenomenon can be attributed to the close solidification range. The narrow solidification range leads to a grain with smaller dendritic branches which are able to promote the rheocast plastic metallic mush necessary for thixofforming. The rolls, nozzle and cooling slope were coated with colloidal graphite to avoid any adherence of the liquid and semi-solid state metallic alloys. Microstructures of the strip achieved were investigated.

Key words: Thixorolling; Rheocasting; Rapid solidification; Metallic strips.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

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

³ *UNESP-Campus de Ilha Solteira - Depto. de Engenharia Mecânica – Eng. Mecânico pela UNESP - Campus de Ilha Solteira e pós-graduando na mesma instituição de ensino.*

⁴ *UNESP – Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica.*

INTRODUÇÃO

O processamento mecânico de ligas metálicas no estado pastoso (tixoconformação), fase sólida de estrutura globular circundada pela fase líquida, somente começou a ser usado para a produção industrial após 10 anos de pesquisa que iniciou na década de 70.⁽¹⁾ As propriedades mecânicas das peças tixoconformadas, como a resistência à tração, são melhores do que as peças fundidas (estruturas dendríticas).⁽²⁾

A pasta reofundida, material pastoso obtido diretamente do estado líquido, possui características de um escoamento não-Newtoniano (taxa de deformação não é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento) e tixotrópica (diminuição da viscosidade do material quando em movimento).

A força de conformação da pasta metálica de estrutura reofundida ou tixofundida (reaquecimento do material entre as linhas *solidus* e *liquidus*), com um tamanho da fase sólida de $100\pm 10\mu\text{m}$, é apreciavelmente menor quando comparado com a conformação a quente do material, uma vez que a fase sólida globular move facilmente na presença de uma fase líquida.⁽²⁾ Como resultado, um menor desgaste do ferramental ocorre, e a peça pode ser fabricada em apenas uma etapa (*single forming step*).

Em geral, a qualidade das peças tixoconformadas depende da viscosidade da pasta metálica reofundida (menor tamanho/fração e distribuição da fase sólida globular no seio da fase líquida) para obtenção de um regime laminar. Esse controle possibilita uma menor turbulência no preenchimento das matrizes em relação à fundição sob pressão. Além disso, menor temperatura de processamento em pastas metálicas é exigida e assim uma maior vida útil das matrizes resulta.

Diversas técnicas são aplicadas para obtenção da estrutura globular, por exemplo, agitação mecânica/magnética; reaquecimento da liga metálica, previamente inoculada, no estado semi-sólido; deformação plástica a frio da estrutura refinada antes do reaquecimento no estado semi-sólido;⁽³⁾ processo SIMA (*Strain Induced Melt Activated*) o qual a liga fundida é deformada a quente para ser em seguida processada no estado semi-sólido;⁽¹⁾ e o processo de resfriamento por canal ou rampa (*Cooling Channel / Cooling Slope Process*). Esta última técnica é empregada neste trabalho e será brevemente analisada abaixo.

Obtenção de Produtos Acabados por Solidificação Rápida Através da Liga Fundida no Estado Pastoso

A obtenção de tiras metálicas laminadas a partir do estado líquido passando para o estado pastoso (reofundição) tem várias vantagens sobre o processamento convencional de laminação a quente/frio, por exemplo, fabricação direta da tira metálica do estado líquido, baixo custo/rigidez do equipamento, economia de espaço, etc... As desvantagens estariam relacionadas à aderência da tira no cilindro e a dificuldade de algumas ligas metálicas formarem uma pasta metálica plástica para a conformação.⁽⁴⁾

Então, esse processamento fornece uma economia de energia comparada aos processos convencionais de fabricação de folhas/tiras metálicas e outros produtos laminados, os quais várias etapas de conformação são requeridas após a obtenção, inspeção e reaquecimento dos lingotes.

Haga e Suzuki,⁽⁴⁾ Haga, Nishima e Suzuki,⁽⁵⁾ Haga,⁽⁶⁾ Lockyer *et al.*,⁽⁷⁾ por exemplo, têm empregado esta técnica para produzir tiras de ligas metálicas tixoconformadas. A liga metálica semi-sólida obtida através do resfriamento contínuo em uma calha (*cooling slope*) produz a pasta semi-sólida que alimenta o laminador. O cilindro inferior arrasta a pasta metálica que vai ser conformada pelo cilindro superior.

Em resumo, esta técnica tem várias vantagens sobre o processamento convencional para obter tiras de ligas metálicas, por exemplo, fabricação direta de tiras do metal fundido, solidificação rápida (granulação fina), pequena força de separação entre os cilindros porque a tensão de escoamento do semi-sólido é menor do que a do metal sólido – não necessitando cilindros de aço acionados por motores robustos para fornecer a potência necessária, e assim baixo custo do equipamento.

Geralmente na tixolaminação, cilindros de aço são substituídos por cilindros de cobre, refrigerados internamente, para produzir um resfriamento rápido da pasta metálica. Isto possibilita uma maior velocidade de processamento e evita a aderência da tira no cilindro durante a fabricação. Maior velocidade do cilindro produzirá uma menor espessura da tira. Este processamento permite obter tiras de espessura maior do que 1 mm a uma velocidade de até 60m/min.⁽⁶⁾

A calha de resfriamento recebe a liga fundida num cadinho (*tundish*), e é resfriada até a condição semi-sólida. A quantidade da fração sólida é em torno de 10-20%. Esta é afetada pelo tempo de contato entre o fundido e a calha de resfriamento, e a temperatura de vazamento. Por exemplo, maior o tempo de contato e menor a temperatura de vazamento, maior será a fração sólida. A microestrutura da tira tixolaminada usando esta técnica é muito fina.⁽⁴⁾

É objetivo desse trabalho, analisar o efeito da composição química das ligas Pb/Sn (70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; e 50%Pb-50%Sn) na formação de pastas metálicas para ser conformada mecanicamente para obtenção de tiras metálicas num cilindro duo irreversível. É objetivo também investigar a distribuição dos microconstituintes e trincas superficiais/laterais formadas nas tiras tixolaminadas. Esta abordagem permite estudar a influência do intervalo de solidificação das ligas metálicas empregadas sobre a qualidade/facilidade das tiras obtidas na tixolaminação.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparação e Instrumentação do Laminador Duo Irreversível para a Tixolaminação

Um laminador duo foi modificado para laminar tira metálica no estado semi-sólido usando ligas de Pb/Sn (Figuras 1 e 2, e Tabela 1 com a especificação do laminador). Os cilindros foram pintados com grafite coloidal (Dycote Dr 178) para evitar a aderência da tira nas superfícies dos mesmos durante o processamento.



Figura 1. Preparação do laminador.

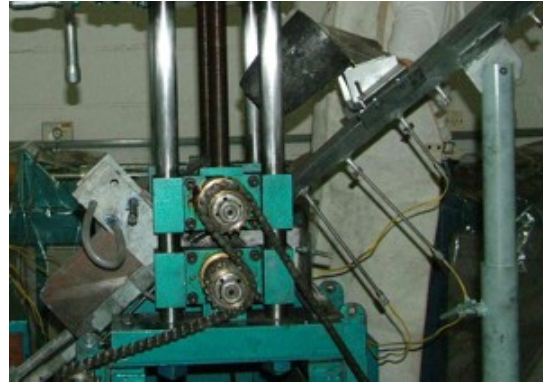


Figura 2. Operação de vazamento.

Um sistema de resfriamento contínuo tipo chuva foi empregado para resfriar a tira metálica para a temperatura ambiente logo após a tixolaminação, Figura 3.



Figura 3. Sistema de resfriamento da tira durante a tixolaminação.

Tabela 1. Dados 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/min	
	1	46	15	
	2	85	28	
	3	132	44	
	4	195	117	

A calha de resfriamento da liga fundida, inclinação de aproximadamente 60°, necessária para produzir o material refundido, foi instrumentada com 3 termopares colocados a uma distância equidistante de 100mm aproximadamente (Figura 2). O *tundish* está posicionado sobre a calha de resfriamento onde é vazado a liga metálica no estado líquido a uma vazão de $1,1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ e a uma distância de 240mm do bocal que recebe o material refundido, Figura 2.

O bocal, montado em um suporte metálico junto ao cilindro inferior, foi moldado em material refratário com um furo central para posicionar um termopar. Tanto a calha de resfriamento quanto o cilindro foram também revestido com grafite coloidal para evitar qualquer aderência da pasta metálica durante o processamento. Um eletrodo de grafite foi especialmente preparado para encapar um termopar para medir a temperatura do cilindro inferior durante a tixolaminação. Os termopares utilizados foram tipo K (6mm de diâmetro e comprimento de 200mm). Uma interface (Pico TC-08 IMPAC) captura a temperatura versus tempo durante o processamento. Canais 1, 2 e 3 estão posicionados na parte inferior da calha, vide Figura 2. Canal 1, está próximo ao bocal, o 2 intermediário e o 3 junto ao vazamento da liga metálica.

Exame Microscópico

Amostras das tiras tixolaminadas foram cortadas e embutidas em resina epóxi para exame microscópico. Essas amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital (5ml de HNO_3 e 95ml de álcool etílico).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Variação na Velocidade e Distância entre os Cilindros de Laminação

A liga 60%Pb-40%Sn vazada a 300°C foi usada nos testes iniciais para obter a tira tixolaminada a uma velocidade dos cilindros de 15m/min. Somente um pedaço da tira foi obtido e o restante do material solidificou prematuramente no bocal. A partir de 28m/min obteve-se a tira metálica para distância entre os cilindros de 0,5, 0,7 e 1mm, Figura 4.

Para a distância entre os cilindros de 1mm a tira metálica não foi conformada pelo cilindro superior do laminador, Figura 4a. Somente com a espessura menor de 0,7mm o processo de tixoconformação ocorreu. Defeitos foram observados na região central da tira a medida em que distância entre os cilindros diminuiu e a velocidade aumentou, Figura 4. Estes defeitos de forma para espessuras menor de 0,7mm podem ser atribuídos a falta de paralelismo entre os cilindros. Isto causa um estado de tensão que faz o material do centro se espalhar menos do que o material das bordas da tira resultando num rasgamento central, Figura 4a, b e c. Para velocidades superiores a 28m/min este defeito é acelerado e pedaços da tira são obtidos, Figuras 4c.

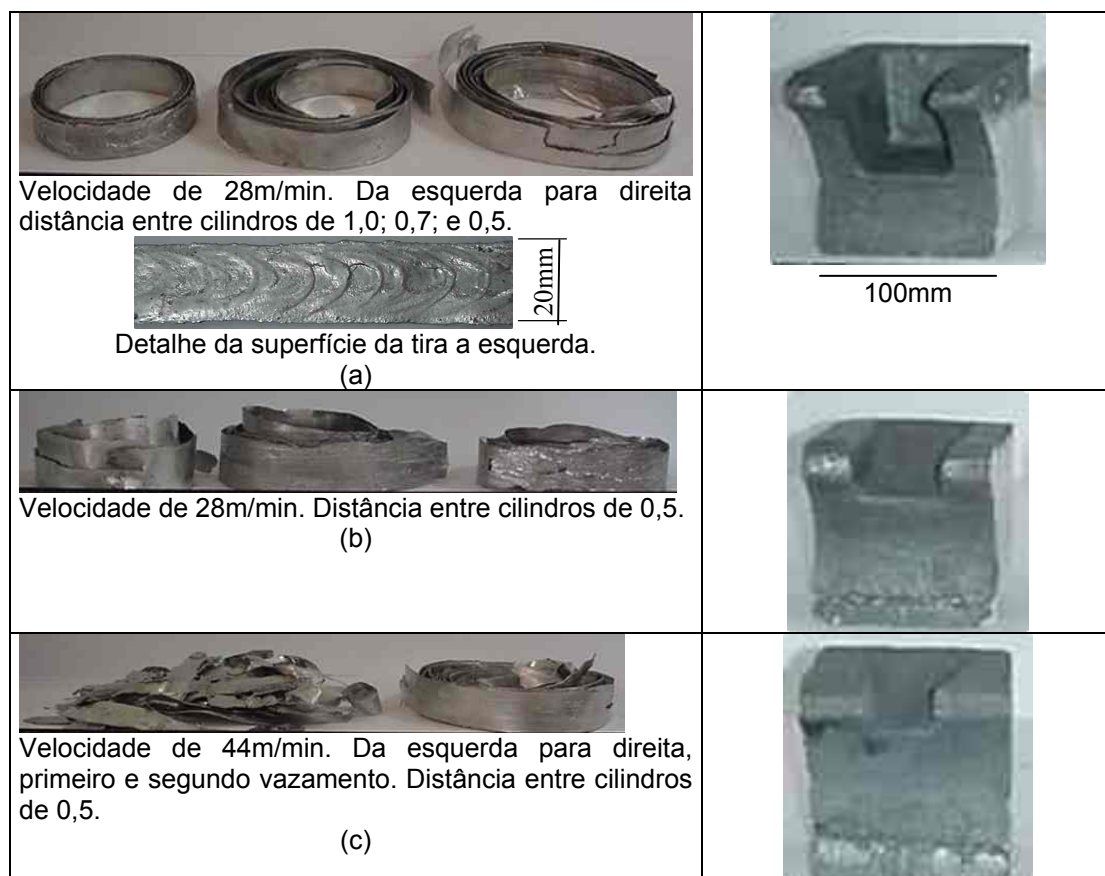


Figura 4. Esquerda: tiras laminadas a diferentes velocidades e distâncias entre cilindros. Direita: bocais empregados para cada situação à esquerda.

Núcleos de solidificação são formados ao longo da calha de resfriamento até o bocal posicionado no cilindro inferior. Este material em contato com a superfície do cilindro forma uma casca sólida de material transportando a pasta metálica sobre a sua superfície para ser conformada pelo cilindro superior, Figura 4a. De acordo com a velocidade do cilindro o material semi-sólido vai sendo agitado e transformando em uma estrutura reofundida em vez de uma estrutura convencional de solidificação. Este ponto será discutido em mais detalhe adiante, durante a análise das microestruturas.

Eskin, Suyitno e Katgerman⁽⁸⁾ definem dois pontos durante a solidificação de um material metálico. O primeiro ponto é definido como coerente. Este ponto a partícula sólida não entra em contato, ou seja, é separado pela fase líquida e o material se comporta como uma lama/pasta metálica. No ponto rígido, o material obtém as características de um material sólido uma vez que se inicia o contato entre as fases sólidas. A partir deste ponto o comportamento mecânico é parecido com o comportamento a quente de um material sólido.⁽⁹⁾ Então desde o vazamento da liga, o material durante a tixolaminação atravessa esses pontos rapidamente e quanto maior for o intervalo de solidificação, maior a distância relativa entre esses pontos que podem causar defeitos de fabricação que serão analisados a seguir.

O próximo passo, portanto foi usar uma distância entre os cilindros de 0,7mm e um novo bocal projetado para fornecer um fluxo de pasta metálica contínuo, isto é, com mínimo de turbulência.

Fabricação das Tiras Metálicas Tixolaminadas de 0,7mm de Espessura

Ligas de Pb/Sn (70%Pb-30%Sn; 60%Pb-40%Sn; 50%Pb-50%Sn) respectivamente com intervalos de solidificação de 75°C, 56°C e 31°C de acordo com o diagrama de fase, foram tixolaminadas para abertura entre os cilindros de 0,7mm. A liga 70%Pb-30%Sn foi vazada a 350°C e as outras ligas a 300°C. Estas ligas transformam do estado líquido para o sólido sobre uma ampla faixa de temperatura obtendo respostas diferentes durante o processamento, Figura 5.

O caminho provável para obter uma tira 70%Pb-30%Sn de boa qualidade, seria aplicar uma inoculação da liga metálica antes do vazamento. Isto produziria uma aproximação entre os pontos coerente e rígido para a produção de uma pasta metálica plástica de uma liga de elevado intervalo de solidificação. Realmente, ambos uma estrutura de grão fino e fundição controlada (sem grande gradiente de tensão e temperatura) evitam o surgimento de trincas a quente, Eskin, Suyitno e Katgerman.⁽⁸⁾ Segundo esses autores, a trinca a quente ocorre no último estágio da solidificação para a fração de volume do sólido acima de 85-95%.

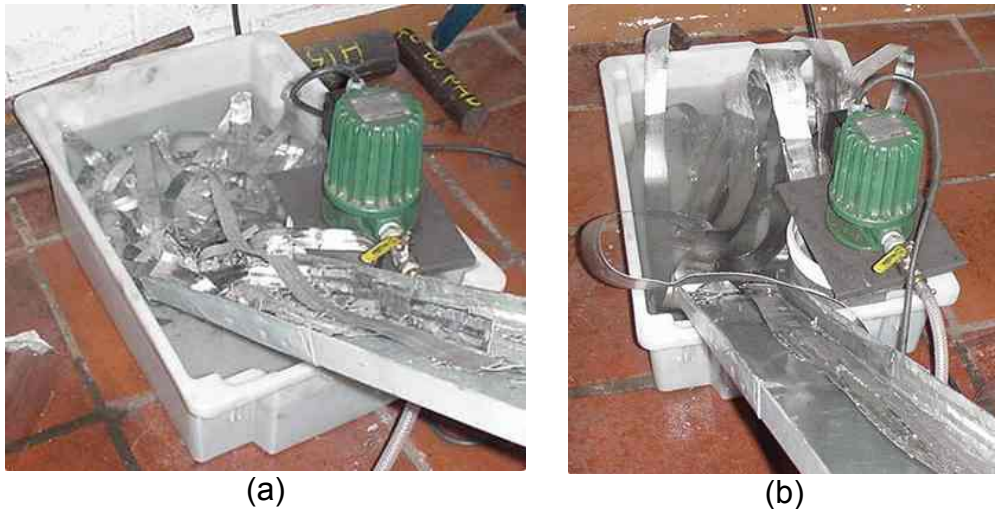


Figura 5. Produto final da tixolaminação da liga de 70%Pb-30%Sn vazada a 350°C mostrando muitos pedaços/lascas de tiras (a). Uma tira contínua é formada para a liga 50%Pb-50%Sn vazada a 300°C.

Temperaturas Envolvidas no Processamento

O posicionamento dos termopares ao longo das partes do aparato experimental possibilitou mapear a temperatura durante o processamento. A Figura 6 mostra o perfil obtido para a liga 50%Pb-50%Sn, por exemplo. Observa-se o aumento progressivo da temperatura do cilindro atingindo um valor de 69°C ao final da operação (50s). Assim, o gradiente térmico vai diminuindo gradativamente, e teoricamente a passagem da lama para a pasta metálica e esta para o material sólido é mais suave. Então, tensões e deformações induzidas entre as fases sólida e líquida durante este percurso vão ser eventualmente diminuídas. As deformações produzem trincas a quente e torna-se irreversível no processamento, Figura 5a.

Então, quando o material da calha de resfriamento é recebido pelo bocal, nesse espaço, a liga metálica passa por diferentes comportamentos mecânicos devido a diferentes morfologias (lama, pasta e sólido). Assim, diferentes modelos de abordagem podem ser aplicados para estudar o comportamento do material durante a tixolaminação.

O resfriamento durante o processamento pode ser caracterizado como primário (material percorrendo a calha de resfriamento a uma vazão de $1,1 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$) e secundário (junto ao cilindro inferior do laminador). Este último causa um forte gradiente térmico da lama/pasta metálica formando uma microestrutura fina. Acredita-se que a liga 50%Pb-50%Sn se encontra nesta última fase ligeiramente abaixo do ponto de temperatura rígido enquanto as ligas 70%Pb-30%Sn e 60%Pb-40%Sn se encontram ainda próximo ao ponto coerente onde uma pasta metálica é formada. A deformação da pasta metálica é muito crítica podendo ocorrer trincas a quente e se propagando entre um filme de líquido que separa a fase sólida

Após a saída do material dos cilindros, o material já está sólido e resfriado rapidamente por um chuveiro, vide Figura 3.

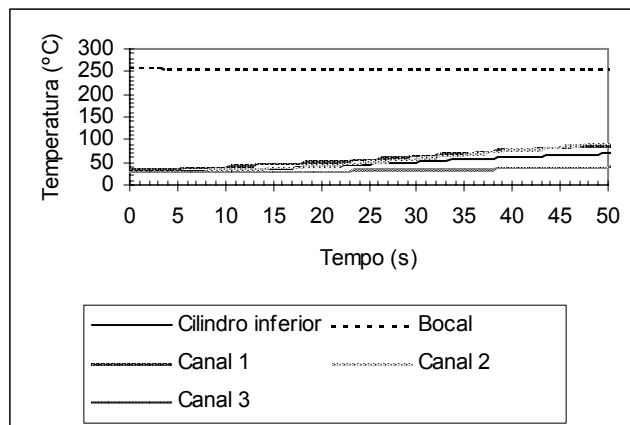


Figura 6. Evolução da temperatura durante a operação de tixolaminação para a liga 50%Pb-50%Sn.

Microestruturas da Tira Tesfriada Rapidamente

A observação das microestruturas é feita na seção transversal das tiras obtidas. Solidificação rápida ocorre no início e ao final do processamento sem a conformação da tira pelo cilindro superior devido à falta de material suficiente, Figura 7.

A Figura 7a (liga 70%Pb-30%Sn) mostra ramificações dendríticas de chumbo (fase α) formadas rapidamente junto ao cilindro inferior do laminador. Em direção a parte superior da tira, a formação dendrítica dá origem a estruturas lamelares eutéticas descontínuas. De fato, ocorreu uma fragmentação dendrítica na parte superior da tira, indicando uma agitação entre as fases sólidas e líquidas durante o percurso da tira ao longo do cilindro inferior. Típica de uma estrutura reofundida. Então nesta mesma tira, pode-se evidenciar os dois tipos de estruturas: fundição convencional e reofundida.

A Figura 7b (liga 60%Pb-40%Sn) mostra uma estrutura hipoeutética com partículas sólidas primárias pouco compacta (fase α) dispersa entre eutéticos caracterizando a incompleta destruição das dendritas. Realmente, a fase α parece não ser tão compacta, pois mostra conter pontos de fase β no seu interior que tende a facilitar a sua desintegração. Esta deformação da estrutura pode ser atribuída ao menor comprimento dendrítico em relação à liga anterior devido ao menor intervalo de solidificação.

A Figura 7c (liga 50%Pb-40%Sn) mostra uma dispersão ao acaso e mais homogênea das fases presentes, estrutura eutética Pb-Sn com finas dispersão da fase α rica em chumbo. Esta fase muito fina tende a espalhar e se confundir com a fase eutética. Esta característica de morfologia possibilita a tixolaminação de tira metálica de melhor qualidade devido ao melhoramento da plasticidade da pasta metálica, como pode ser visto na Figura 8.

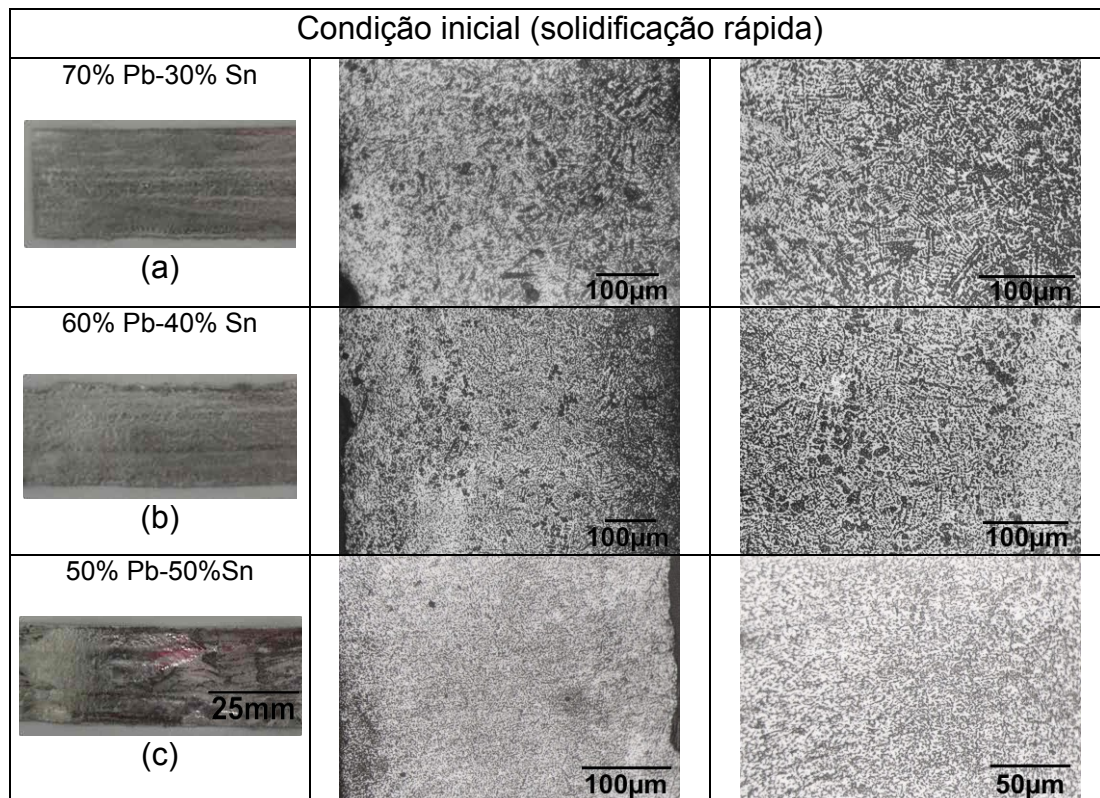


Figura 7. À esquerda: fotografias do topo das tiras resfriadas rapidamente logo no início de processamento. À direita: microestrutura ao longo da espessura da tira e no centro.

Microestruturas da Tira Tixoaminada

A qualidade da tira tixoconformada e a microestrutura obtida são mostradas na Figura 8. As tiras que tem maior intervalo de solidificação (70%Pb-30%Sn e 60%Pb-40%Sn) apresentam a aresta trincada e assim mais difícil de ser obtidas por este processo, vide Figura 5a. Este defeito estaria relacionado ao espalhamento lateral da tira durante a tixoaminação. As pastas metálicas com pouca plasticidade para redistribuir o estado de tensão de tração atuante nessa direção, formam pedaços de tira.

Observa-se que estruturas dendríticas são quebradas pelo estado de tensão de compressão durante a tixoconformação. A fase α rica em chumbo é preferencialmente nucleada junto ao cilindro inferior (cilindro de solidificação). As fases estão dispersas formando colônias (manchas brancas e pretas) visíveis ao longo da seção transversal para as ligas 60%Pb-40%Sn e 50%Pb-50%Sn. Essas estruturas são formadas desde o início do processo, vide Figura 7, e acentuadas durante a conformação plástica da pasta metálica. De fato, o estado de tensão de compressão na espessura da tira e o de tração em direção a aresta da tira e a alta temperatura de deformação acentuam este fenômeno. Esta falta de distribuição por igual das fases podem produzir tiras de comportamento anisotrópico e prejudicar a posterior conformação plástica desse 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 α e β , tornam a pasta metálica com maior característica tixotrópica. Estas zonas induzem a superplasticidade do material durante a tixoaminação e defeitos são minimizados, vide Figura 5.

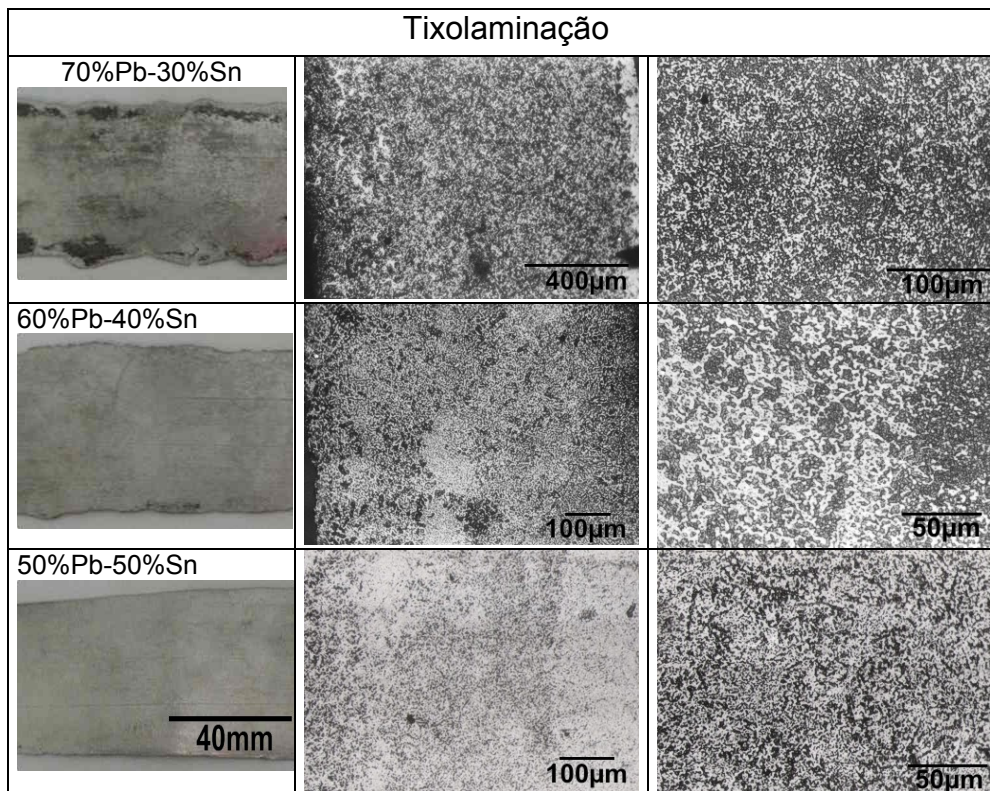


Figura 8. Esquerda: fotografias superficiais das tiras tixolaminadas. Direita: micrografias mostram a distribuição dos micro-constituintes após o processamento para cada liga empregada.

CONCLUSÃO

Granulação fina tende a evitar os defeitos observados, então uma inoculação antes do vazamento deve ser feita para obter uma tira tixolaminada de boa qualidade.

A velocidade dos cilindros deve ser controlada para evitar uma solidificação prematura da liga e evitar elevados gradientes térmicos que induzem trincas a quente.

Para tixolaminar tiras de pequena espessura menor de 0,5mm, neste laminador, o afastamento entre cilindros deve apresentar um bom paralelismo.

O tipo de bocal e liga metálica é importante para obter uma tixolaminação contínua.

Este processamento de obtenção de tiras metálicas pode competir com o laminador tipo trem de tiras onde motores potentes e estruturas rígidas são necessárias.

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. Ao meu amigo Niel pela revisão do Abstract.

REFERÊNCIAS

- 1 KENNEY, M.P., COURTOIS, J.A., EVANS, R.D., FARRIOR, G.M., KYONKA, C.P. and KOCH, A.A. Semi solid metal casting and forging. In: **ASM Handbook**, 1991, p.327-338.
- 2 KOPP, R. and SHIMARA, H. State of R&D and future trends in semi-solid manufacturing, In: **Proceedings of the 7-th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, Tsukuba, Japan, 2002, p. 57-66.
- 3 LIMA-FILHO, A.d.P. and NAGATA, C. Processing and characterization of thixoextruded metallic slurries. In: **Proceedings of the 7-th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, Tsukuba, Japan, 2002, p. 551-556.
- 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. Stri 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 LOCKYER, S.A., YUN MIN, H., HUNT, J.D. and EDMONDS, D.V. Microstructural defects in thin sheet twin roll cast aluminium alloys. **Materials Science Forum**, p. 367-372, 1996.
- 8 ESKIN, D.G., SUYITINO and KATGERMAN, L. Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys. **Progress in Materials Science**, p. 629-711, 2004.
- 9 KIUCHI, M. and SUGIYAMA, S. Mashy-state of aluminum alloys and cast irons. In **Annals of the CIRP**, p.259-262, 1991.