

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA SAC (Sn-0,7%Cu-1,0%Ag) SOLIDIFICADA UNIDIRECIONALMENTE¹

LIGAS LIVRES DE PB UTILIZADAS EM SOLDAGEM DE COMPONENTES MICROELETRÔNICOS

Pedro Deghaid Pereira²
José Eduardo Spinelli³

Resumo

As ligas tipo SAC (Sn-Ag-Cu) são importantes alternativas para o uso de ligas de soldagem Sn-Pb, que devem ser substituídas em função da toxicidade do chumbo. Este trabalho tem como objetivo a avaliação dos parâmetros térmicos (V_L – velocidade de isoterma *liquidus* e \dot{T} – taxa de resfriamento) e da microestrutura da liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag obtida a partir de uma solidificação direcional ascendente em condições transitórias de extração de calor. Foram obtidas amostras com diferentes taxas de resfriamento ao longo dos lingotes, as quais foram analisadas por microscopia ótica, microscopia eletrônica e difratometria de raios-X. A variação dos espaçamentos dendríticos primários foi determinada. A microestrutura resultante é composta de uma matriz dendrítica Sn-Cu rica em Sn, havendo a coexistência de intermetálicos do tipo Cu_6Sn_5 e Ag_3Sn localizados nas regiões interdendríticas. As posições com maiores taxas de resfriamento (em torno de 32°C/s), mais próximas da superfície refrigerada, apresentaram menores espaçamentos dendríticos primários λ_1 (~11,5 μ m) e consequentemente, maior dureza. Os intermetálicos Cu_6Sn_5 apresentaram uma mesma morfologia ao longo do lingote, ao passo que as partículas Ag_3Sn foram encontradas nas formas de partículas, fibras e placas a depender da taxa de resfriamento obtida.

Palavras-chave: Ligas de soldagem livres de Pb; Ligas SAC; Solidificação direcional.

MICROSTRUCTURE EVOLUTION DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF A Sn-0.7wt%Cu-1.0wt%Ag SOLDER ALLOY

THE MICROSTRUCTURE OF SOLDER ALLOYS DEPENDS ON COOLING RATE, SOLUTE TYPE AND CONTENT

Abstract

Nowadays SAC (Sn-Ag-Cu) alloys can be considered as important alternatives to the use Sn-Pb solder alloys, which must be replaced due to the toxicity of lead. This study aims to evaluate both the solidification thermal parameters (V_L - *liquidus* isotherm velocity and \dot{T} - cooling rate) and the final as-cast structure of the Sn-0.7wt%Cu-1.0wt%Ag alloy obtained by upward directional solidification under transient conditions of heat extraction. The large spectrum of cooling rates obtained during solidification permitted also a large spectrum of microstructures to be examined. The as-cast structures along the directionally solidified casting were analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The development of dendritic primary growth was also determined. The resulting microstructure was composed of a Sn-rich dendritic matrix surrounded by an interdendritic mixture with a coexistence of both Cu_6Sn_5 and Ag_3Sn intermetallics. The regions closer to the casting cooled surface showed higher cooling rates (about 32 K/s) and smaller primary dendrite arm spacings, λ_1 , (about 11.5 μ m). As a consequence, slightly higher microhardness values were observed in such regions. It was shown that Ag_3Sn morphology changed from globules to fibers and from fibers to plates with decreasing cooling rate while Cu_6Sn_5 particles conserved their H-shape morphology along the entire casting length.

Keywords: Lead-free solder alloy; SAC alloy; Directional solidification.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando UFSCar/Departamento de Engenharia de Materiais;

³ Professor Doutor UFSCar/ Departamento de Engenharia de Materiais

1 INTRODUÇÃO

Grandes fabricantes de eletroeletrônicos estão eliminando elementos nocivos de seus produtos para atender a uma norma da União Européia que entrou em vigor em 1º de julho de 2006. A diretiva *Restriction of Hazardous Substances (RoHS)* proíbe a comercialização na Europa de produtos eletroeletrônicos que contenham metais pesados como chumbo, cádmio, mercúrio e cromo e dos retardantes de chamabromobifenilas (PBB) e éteres de bromobifenilas (PBDE). As empresas que não se adequarem a esta diretiva perderão competitividade.⁽¹⁾ Segundo Nogueira, Queiroz Neto e Manzato⁽¹⁾ 14% das exportações brasileiras de produtos eletroeletrônicos no ano de 2005 tiveram como destino a União Européia. Com isto diversas empresas em Manaus de origem européia ou que prestam serviços a estas tem tido a missão de implantar em seus processos fabris o uso de solda livre de chumbo, conhecido como *Lead-Free* ou *Pb-Free*. Em 2007, os Estados Unidos adotaram restrições semelhantes para a entrada de eletrônicos com estes metais pesados no país. Os fabricantes chineses têm 60% de sua produção em conformidade com a RoHS e também implementarão ainda este ano exigências semelhantes à restrição européia.

Pelos motivos expostos, ligas alternativas sem chumbo têm sido pesquisadas, surgindo várias opções de materiais com temperaturas de fusão mais elevadas que as ligas estanho-chumbo. As ligas favoritas pertencem a sistemas ternários baseados no binário Sn-Ag com adição de Cu, Bi e Sb. As ligas Sn-Ag-Cu têm sido reconhecidas como sendo mais adequadas, confiáveis e compatíveis com componentes eletrônicos tipicamente recobertos com estanho-chumbo. Segundo Grigolletto⁽²⁾ composições diferentes têm sido propostas para estudo destas ligas. Os americanos preferem a liga Sn-3,9%Ag-0,6%Cu, enquanto os europeus consideram melhores as ligas Sn-4,0%Ag-0,5%Cu e Sn-3,7%Ag-0,7%Cu. Os japoneses, por sua vez, sugerem a liga Sn-3,0%Ag-0,5%Cu como substituta em potencial da liga eutética estanho-chumbo. Tomando como base estes percentuais, nota-se uma sensível variação nas faixas utilizadas de prata e cobre. Todas estas ligas apresentam o uso de uma quantidade apreciável de Ag, que agrega elevado custo ao produto final. Nos dias de hoje, nota-se uma grande tendência do uso de ligas binárias como substitutas com microadição de outros elementos. A liga binária eutética Sn-Cu apresenta composição de 0,7%Cu e ponto de fusão de 227°C. A reação eutética acontece entre Sn e o intermetálico Cu₆Sn₅. Esta liga tem recebido atenção devido ao baixo preço de produção comparado com outras ligas alternativas.^(3,4) A viabilidade microestrutural e do conjunto de propriedades mecânicas após a adição de pequenas quantidades de Ag na composição eutética Sn-Cu ainda não foi verificada na literatura especializada.

É necessário, porém, avaliar as influências das taxas de resfriamento do processo sobre a microestrutura formada e as propriedades mecânicas dessas ligas. O uso de ligas binárias ou ternárias próximas da composição eutética na soldagem de componentes é desejável porque quanto menor a diversidade de elementos menores serão as variações de composição que podem afetar o comportamento da junta soldada.⁽⁵⁾

Segundo Liang, Dariavach e Shangguan⁽⁶⁾ as taxas de resfriamento envolvidas nos diferentes processos de conexão de microcomponentes podem atingir valores bem distintos, variando na faixa entre 10⁻¹ e 10¹ °C/s. Estes autores desenvolveram um sistema de solidificação unidirecional refrigerado cuja variação da taxa de resfriamento é imposta por meio do mergulho do conjunto molde/metal

líquido em diferentes níveis de água dentro de um reservatório. Apenas um termopar foi utilizado para monitorar o perfil térmico durante os experimentos, posicionado no molde. Este arranjo experimental permitiu a obtenção de grande contraste nas microestruturas de solidificação do eutético Sn-Ag-Cu, obtidas para diferentes níveis de água ou taxas de resfriamento. As estruturas mais grosseiras foram originadas a partir das menores taxas de resfriamento. Nesse caso, foram verificadas as maiores taxas de fluência.

Alguns trabalhos^(3,4,7) foram desenvolvidos com as ligas alternativas livres de chumbo por meio da utilização de sistemas *Bridgman* (regime estacionário). Estes trabalhos enfatizam principalmente as correlações entre as variáveis térmicas de solidificação (G e v) e a microestrutura final. Nota-se, porém a escassez de pesquisas com ligas Sn-Cu solidificadas sob condições transitórias de extração de calor. Sistemas transitórios de solidificação (refrigerados ou não) podem propiciar um espectro mais amplo de variáveis térmicas, mais representativo das condições encontradas nos processos industriais. A evolução microestrutural de ligas Sn-Ag-Cu sob tais condições ainda precisa ser investigada.

Hunt⁽⁸⁾ e Spinelli et al.⁽⁹⁾ afirmam que de um modo geral, sabe-se que o conhecimento da magnitude das variáveis térmicas da solidificação transitória e de sua correlação com as variações microestruturais, principalmente a formação de intermetálicos em diferentes posições do lingote/peça solidificada, é fundamental tendo em vista sua relação com as características finais de aplicação do componente. A solidificação unidirecional transitória de lingotes metálicos pode ser promovida com a utilização de moldes maciços ou de dispositivos refrigerados a água. O mapeamento térmico do processo se realiza através de uma bateria de termopares distribuídos em diferentes posições e monitorado por um sistema de aquisição de dados em tempo real. Esse registro de temperaturas durante a solidificação permite que taxas de resfriamento e velocidades de solidificação sejam determinadas de forma bastante precisa e confiável para posterior correlação com os parâmetros microestruturais medidos ao longo do comprimento da amostra.

O presente trabalho tem como objetivos principais avaliar a evolução dos parâmetros térmicos de solidificação em uma liga eutética Sn-Cu modificada com Ag, a tendência da variação dos espaçamentos dendríticos primários ao longo do lingote, a morfologia dos intermetálicos presentes e a variação do perfil de microdureza Vickers durante a solidificação transitória da liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Primeiramente foi preparada uma liga mãe com as seguintes quantidades: 21g Cu, 30g Ag e 100g Sn. A fusão foi realizada a vácuo o que minimizou a presença de óxidos e as eventuais perdas de composição. Uma Centrifuga do tipo Titancast 700 VAC, do fabricante *Linn High Therm* de procedência alemã foi utilizada nesta operação. Este lingote foi diluído em estanho no intuito de alcançar a composição desejada em peso: 99%Sn, 0,7%Cu e 1,0%Ag. Os elementos de interesse foram determinados em espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, modelo Vista, da marca Varian, a partir da digestão da amostra em forno de microondas em frascos fechados. Para preparar o material para o processo de diluição foram produzidos cavacos com auxílio de uma furadeira de bancada e estes fragmentos foram digeridos em meio ácido. A composição da liga segundo esta análise foi de 0,77%Cu e 0,24%Ag.

A solidificação direcional foi conduzida por meio da utilização de um dispositivo refrigerado a água capaz de promover o crescimento da fase sólida no sentido ascendente sem imposição de quaisquer parâmetros térmicos ao longo do processo. O lingote produzido permite não somente o exame microestrutural como também a extração de amostras para ensaios mecânicos. Detalhamentos do dispositivo utilizado nos experimento de solidificação direcional podem ser encontrados em trabalhos⁽¹⁰⁾ anteriores envolvendo solidificação ascendente. A liga foi fundida *in situ* e as resistências elétricas laterais do forno vertical tiveram sua potência controlada a fim de permitir a obtenção da temperatura desejada para o metal fundido: 270°C. Para começar a solidificação, as resistências elétricas foram desligadas e ao mesmo tempo o fluxo de água foi iniciado. As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de termopares tipo J (bainha de inox com 1,5 mm de diâmetro) localizados no lingote a diferentes posições a partir da interface metal/molde: posições 3 mm, 7 mm, 11 mm, 21 mm, 37 mm, 52 mm e 88 mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial a um registrador de dados interligado com um computador, e os dados de temperaturas foram adquiridos automaticamente.

As taxas de resfriamento (\dot{T}) para cada posição dos termopares foram obtidas experimentalmente a partir das interseções das retas de cada temperatura liquidus (T_L) com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares, e através do resultado da leitura direta do quociente das temperaturas imediatamente antes e depois da T_L e dos tempos correspondentes, isto é $\dot{T} = dT/dt$.

O lingote obtido foi seccionado longitudinalmente ao meio, lixado e atacado com uma solução composta por 5 mL de HCl, 10g FeCl₃ e 100 mL de H₂O. O lingote com estrutura colunar foi confirmado, o que permitiu uma caracterização mais precisa dos braços dendríticos primários.

Amostras de seções transversais foram extraídas ao longo do lingote, sendo escolhidas 8 posições de análise da microestrutura. As amostras foram polidas com suspensão de alumina 0,3 μ m e atacadas com o mesmo reagente utilizado para revelar macroestrutura. Em seguida, foram realizadas análises microscópicas com auxílio do sistema de processamento de imagens do microscópio ótico Olympus BX41M-LED, o qual foi utilizado para a quantificação dos espaçamentos dendríticos primários. O método do triângulo foi utilizado para quantificar os valores dos espaçamentos dendríticos primários (λ_1).⁽¹¹⁾ Uma amostragem de 20 medições foi obtida para cada uma das oito posições escolhidas. Após um ataque profundo (duração de 3 minutos com mesmo reagente mencionado) nas amostras transversais referentes às posições 5 mm, 30 mm e 70 mm, foi realizada uma preparação com tinta prata e metalização superficial com ouro para obtenção de imagens no MEV (Philips XL30, Field Emission Gun - FEG). Também foram realizadas investigações de composição química das fases por meio de microsonda EDS-MEV (Oxford Link ISIS 300).

As impressões de microdureza foram feitas com penetrador do tipo Vickers (Stiefelmayer, modelo KL2) de diamante piramidal de base quadrada e carga de 1.000 g nas posições 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 70 mm e 90 mm em relação à base. Para cada posição foram realizadas 10 medidas de microdureza com intervalo entre elas segundo previsto em norma. Tais medidas foram feitas de acordo com a Norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008⁽¹²⁾ e ABNT NBR NM ISO 6507-4:2008.⁽¹³⁾ Quatro amostras relativas às posições 5 mm, 30 mm, 70 mm e 100 mm foram preparadas para a análise por raios-X. As amostras foram

lixadas até granulação 1.200 *mesh*. O equipamento utilizado é da marca Siemens, modelo D5000, utilizando radiação do tipo Cu-K α (λ de 0,15406 nm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os perfis térmicos de solidificação obtidos para termopares tipo J posicionados a partir da interface metal/molde nas seguintes posições: 3 mm, 7 mm, 11 mm, 21 mm, 37 mm, 52 mm e 88 mm. Tais registros térmicos são utilizados como base experimental para determinação dos parâmetros cinéticos, tais como velocidade da isoterma liquidus (V_L) e taxa de resfriamento (\dot{T}).

O valor da temperatura *liquidus* foi aferido por meio da utilização do perfil térmico da posição 88mm, que apresentou mudanças de inclinação expressivas, possibilitando a determinação da temperatura *liquidus* de 225°C para a composição de Sn-0,7%Cu-1,0%Ag.

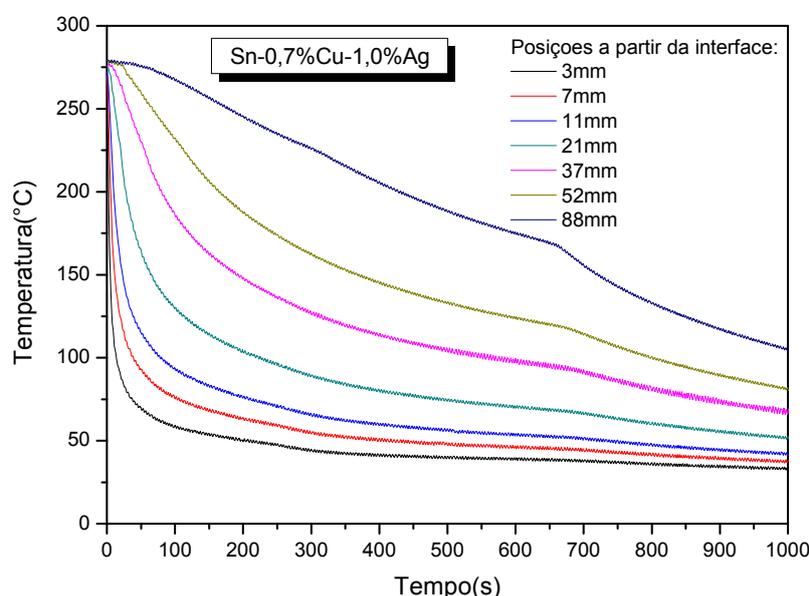


Figura 1. Perfis térmicos obtidos durante a solidificação direcional ascendente da liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag.

As leituras dos termopares foram utilizadas para gerar gráficos de posição (P) no lingote a partir da interface metal/molde em função do tempo (t) correspondente à passagem da frente *liquidus* por cada termopar. Através de uma técnica de ajuste por curva nesses pontos experimentais, foram produzidas funções de potência relacionando posição com o tempo. A partir das funções de potência representativas dos pontos experimentais na forma $P = a.(t)^b$, devidamente derivadas em função do tempo, obtêm-se valores para ambas as velocidades de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L).

A Figura 2 mostra o comportamento experimental das taxas de resfriamento e das velocidades de solidificação com a posição. A Figura 2 mostra não somente os pontos experimentais como também as respectivas tendências experimentais de evolução ao longo do lingote solidificado. Os valores de \dot{T} e V_L são menores para posições mais afastadas da interface metal/molde. O conhecimento destes parâmetros térmicos pode ser extremamente útil no controle dos processos industriais envolvendo soldagem de microcomponentes com ligas Sn-Ag-Cu. Evidentemente que a evolução não será necessariamente a mesma, mas

certamente a dependência da microestrutura resultante com estes parâmetros será obedecida.

A Figura 3 apresenta a macroestrutura da amostra a partir de um corte longitudinal do lingote, onde pode ser observado o predomínio de grãos colunares. Microestruturas típicas de solidificação observadas na seção transversal do lingote Sn-0,7%Cu-1,0%Ag são apresentadas na Figura 4.

Revelações com boa nitidez propiciaram condições favoráveis para aplicação imediata do método de medição dos espaçamentos dendríticos primários. A microestrutura resultante é composta de uma matriz dendrítica rica em Sn, havendo a coexistência de intermetálicos do tipo Cu_6Sn_5 e Ag_3Sn localizados nas regiões interdendríticas. A adição de Ag aliada às condições de solidificação fora do equilíbrio parece ter impedido a formação de uma estrutura eutética do tipo fibrosa, que é característica do eutético Sn-0,7Cu processado em equilíbrio termodinâmico.

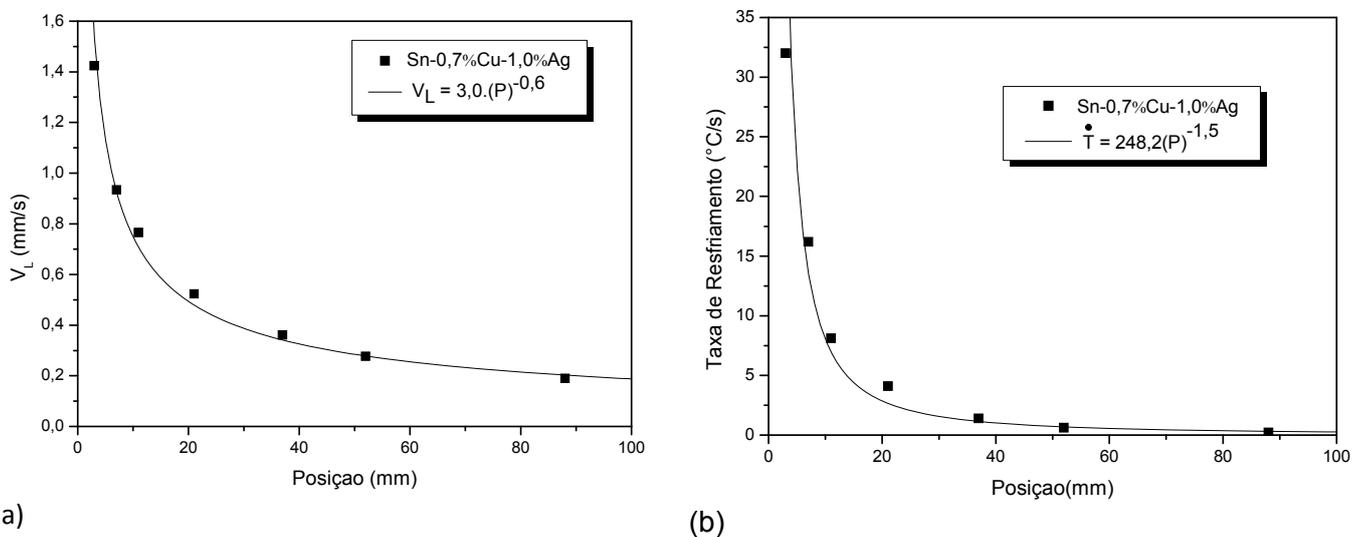
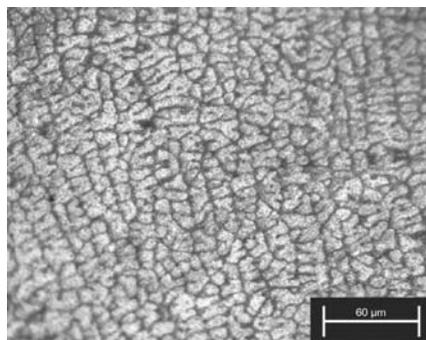


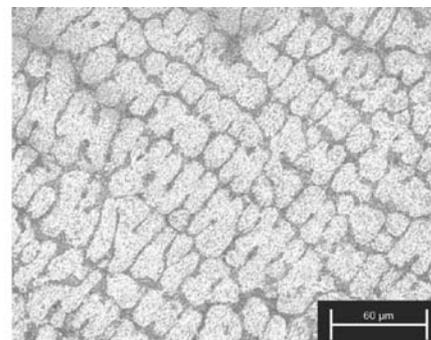
Figura 2. Comportamento da (a) velocidade de solidificação e (b) taxa de resfriamento experimental em função da posição.



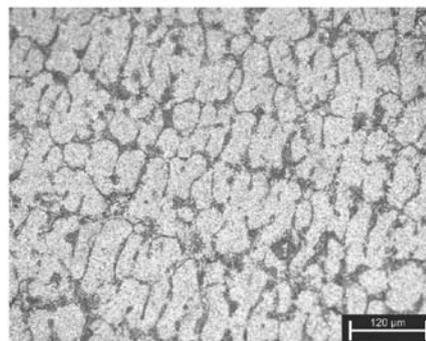
Figura 3. Macroestrutura longitudinal da liga Sn-1,0%Ag-0,7%Cu (escala 1:1,5).



Sn-0,7Cu-1,0Ag
P = 5 mm
 $\lambda_1 = 11,5 \mu\text{m}$
 $\dot{T} = 23,2 \text{ K/s}$
 $V_L = 1,15 \text{ mm/s}$



Sn-0,7Cu-1,0Ag
P = 20 mm
 $\lambda_1 = 38,7 \mu\text{m}$
 $\dot{T} = 4,0 \text{ K/s}$
 $V_L = 0,51 \text{ mm/s}$



Sn-0,7Cu-1,0Ag
P = 70 mm
 $\lambda_1 = 115,8 \mu\text{m}$
 $\dot{T} = 0,5 \text{ K/s}$
 $V_L = 0,23 \text{ mm/s}$

Figura 4. Microestruturas características da liga Sn-1,0%Ag-0,7%Cu. P é a posição relativa à interface metal/molde.

A Figura 5 mostra os espectros de raios-X obtidos para diferentes posições relativas à interface metal/molde e confirmam a presença das fases Cu_6Sn_5 e Ag_3Sn .

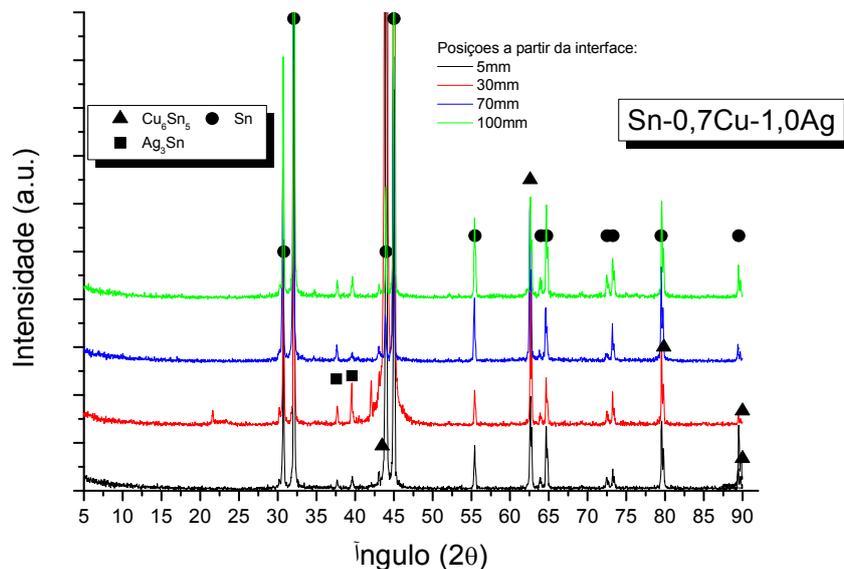


Figura 5. Difratomogramas obtidos para diferentes posições do lingote Sn-Ag-Cu.

A Figura 6 mostra aspectos morfológicos dos intermetálicos presentes e evidencia uma variação da forma de Ag_3Sn partindo de glóbulos para fibras e de fibras para placas à medida que são examinadas posições mais distantes da base do lingote. Os intermetálicos Cu_6Sn_5 são bastante mais grosseiros que os Ag_3Sn .

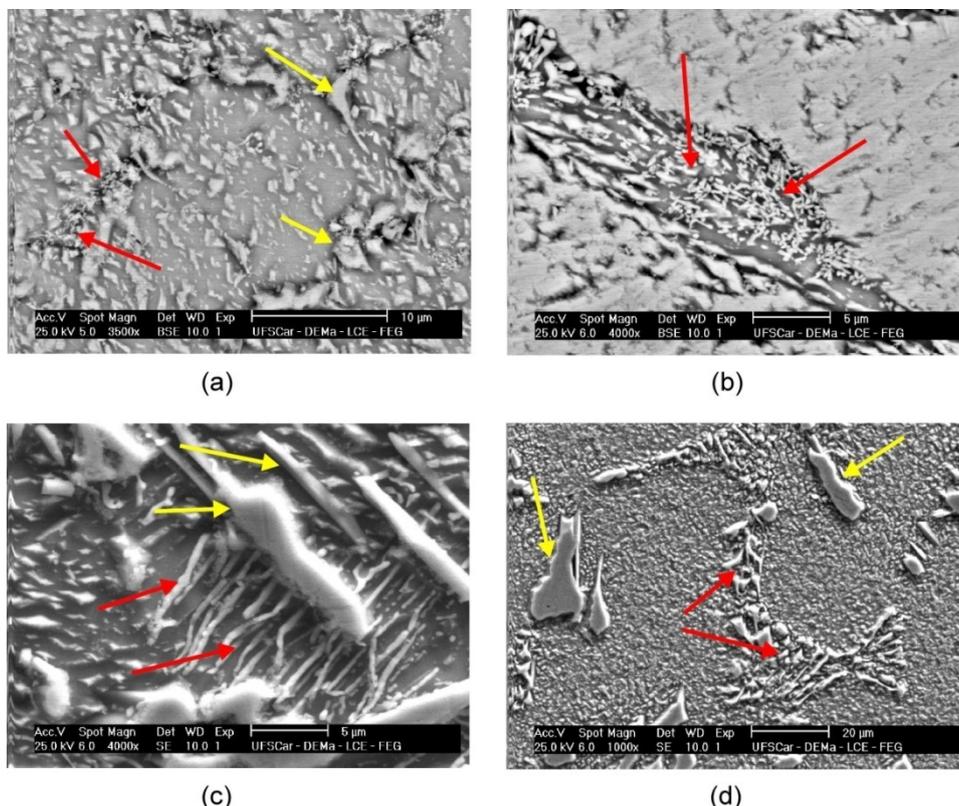


Figura 6. Imagens obtidas via MEV para as posições (a) 5 mm; (b), (c) 30 mm e (d) 70 mm da liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag. As setas amarelas indicam a fase Cu_6Sn_5 e as setas vermelhas indicam a fase Ag_3Sn .

Já é de senso comum na literatura especializada que a morfologia e o tamanho das partículas Ag_3Sn são extremamente dependentes da taxa de resfriamento. Lee e Chen⁽¹⁴⁾ afirma que estas partículas podem apresentar-se na forma globular, agulhas ou placas, a depender da taxa de resfriamento imposta e do teor de Ag. No entanto, investigações desse tipo são bastante escassas para o caso da liga Sn-Cu modificada com Ag. A formação associada de intermetálicos do tipo Cu_6Sn_5 na interface da junta soldada provoca um decréscimo expressivo na concentração de estanho e favorece o surgimento de novos sítios de nucleação heterogênea na interface. Este mecanismo facilita a formação primária de partículas Ag_3Sn a partir do líquido enriquecido em Ag. Assim, partículas grosseiras Ag_3Sn crescem rapidamente durante a solidificação da junta. O controle microestrutural nos processos de soldagem (evitando a presença de partículas grosseiras) pode ser obtido por meio da manipulação de parâmetros térmicos de solidificação como taxa de resfriamento e velocidade de solidificação, uma vez que o arranjo microestrutural resultante depende desses parâmetros de transferência de calor obtidos durante a solidificação.

Garcia, Osório e Garcia⁽¹⁵⁾ investigaram a dependência microestrutural da liga Sn-2,0%Ag com a taxa de resfriamento. Este trabalho foi realizado com a utilização de moldes de aço baixo carbono pré-aquecidos e de um dispositivo de solidificação unidirecional refrigerado à água com fluxo de calor transitório. Para taxas de resfriamento menores que $0,02^\circ C/s$ a microestrutura é formada por uma matriz dendrítica grosseira e uma mistura de fibras e placas Ag_3Sn nas regiões interdendríticas, com as fibras localizadas próximas da matriz. Para taxas variando entre $0,15^\circ C/s$ e $1,15^\circ C/s$ foi observada uma mistura de glóbulos e fibras, com os glóbulos localizados no centro da região interdendríticas. Para taxas de resfriamento superiores a $8,0^\circ C/s$ apenas glóbulos foram observados ao longo da mistura eutética. Concernente ao presente estudo com a liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag investigações adicionais serão conduzidas no sentido de detectar as faixas de taxa de resfriamento indicativas do predomínio de cada morfologia encontrada, na ordem: glóbulos, fibras e placas.

Foram realizadas ainda as medidas dos espaçamentos dendríticos primários. Os valores médios e respectivos valores de máximo e de mínimo são mostrados na Figura 7a. O valor de espaçamento dendrítico primário aumenta em torno de 8x em função do avanço da frente de solidificação. Isto ocorre como consequência das evoluções dos parâmetros térmicos de solidificação, conforme mostrados na Figura 2. A cinética de solidificação apresenta um comportamento de diminuição dos valores de V_L e \dot{T} ao longo do comprimento do lingote e este efeito translada-se para a microestrutura final (Figura 4). A evolução de λ_1 em função da taxa de resfriamento pode ser descrita por meio de uma função do tipo potência com expoente característico -0,55. Este expoente já mostrou ser válido para alguns sistemas binários e parece ser aplicável para traduzir os presentes resultados.

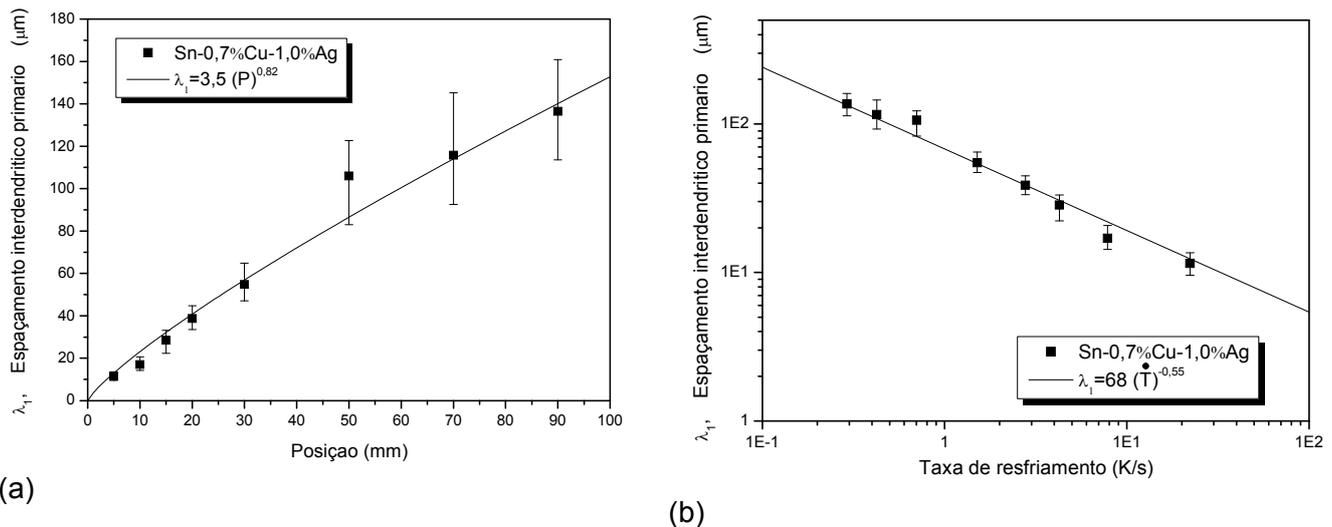


Figura 7. (a) Evolução do espaçamento interdendrítico primário para a liga Sn-0,7Cu-1,0Ag; (b) λ_1 vs. taxa de resfriamento para a liga Sn-0,7Cu-1,0Ag.

Na Figura 8 é mostrada a variação de microdureza em função da posição, com pequena redução contínua ao longo do lingote, sendo mais efetiva a redução para as primeiras posições analisadas. Para a posição à 2 mm da superfície refrigerada um valor de dureza ligeiramente menor foi encontrado, o que pode ser explicado pelo esgotamento de Ag medido por espectrometria de emissão ótica, alcançando valores da ordem de 0,04%Ag nas regiões próximas a superfície. A contaminação de Fe advindo da chapa-molde de aço 1020 durante as etapas de solidificação foi descartada por meio desta mesma análise.

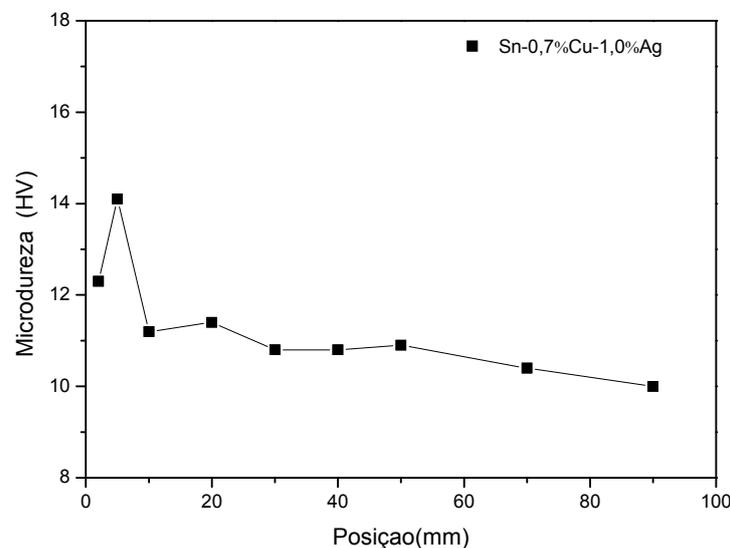


Figura 8. Perfil de microdureza Vickers ao longo do lingote Sn-0,7%Cu-1,0%Ag.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- Sob condições de fluxo de calor transitório os espaçamentos dendríticos primários da liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag diminuem com o aumento da taxa de resfriamento, tendo sua evolução expressa por uma equação experimental do tipo potência com expoente -0,55;

- A adição de Ag aliada às condições de solidificação fora do equilíbrio parece ter impedido a formação de uma estrutura eutética do tipo fibrosa, que é característica do eutético Sn-0,7Cu processado em equilíbrio termodinâmico. Os intermetálicos Cu₆Sn₅ apresentaram uma mesma morfologia ao longo do lingote ao passo que as partículas Ag₃Sn foram encontradas nas formas de partículas, fibras e placas a depender da taxa de resfriamento obtida.
- A microdureza Vickers variou sensivelmente em função da posição relativa à interface metal/molde, com maiores valores obtidos nas proximidades da superfície refrigerada, o que parece significar que menores valores de λ_1 propiciam maiores valores de dureza para a liga Sn-0,7%Cu-1,0%Ag.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 Nogueira, C.L.A., Queiroz-Neto, J.P., Manzato, L. O impacto do uso de solda Lead Free no processo de tecnologia de montagem em superfície (SMT), II **Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, João Pessoa, 2007
- 2 Grigolletto, E.M. Propriedades de tração e de fadiga isotérmica de uma junção de cobre com as ligas Sn63-Pb37, Sn62-Pb36-Ag2 e Sn42-Bi58. **Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica**, Universidade Estadual de Campinas, 2003, Tese de Doutorado.
- 3 Çadirli, E., Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., Marasli, N., Ülgen, A. Experimental investigation of the effect of solidification processing parameters on the rod spacing in the Sn-1.2wt.%Cu alloy, **Journal of Alloys and Compounds**, v. 486, pp. 199-206, 2009A.
- 4 Çadirli, E., Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., Marasli, N., Keslioglu, K., Ülgen, A. Investigation of the effect of solidification processing parameters on the rod spacings and variation of microhardness with the rod spacing in the Sn-Cu hypereutectic alloy, **Journal of Materials Science**, 2009B.
- 5 Frear, D.R., Jang, J.W., Lin, J.K., Zhang, C. Pb-free solders for flip-chip interconnects. **JOM**, v. 53, pp. 28-41, 2001.
- 6 Liang, J., Dariavach, N., Shangguan, D. Solidification Condition Effects on Microstructures and Creep Resistance of Sn-3.8Ag-0.7Cu Lead-Free Solder. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 38A, pp. 1530-1538, 2007.
- 7 Brush, L.N., Grugel, R.N. The effect of an electric current on rod-eutectic solidification in Sn-0.9 wt.% Cu alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 238, pp. 176-181, 1997
- 8 Hunt, J.D., International Conference on Solidification and Casting of Metals. In: **The Metals Society**, London (1979) 3-9
- 9 Spinelli, J E. ; Cheung, N; Goulart, P R. ; Quaresma, J M.V. ; Garcia, A. Design of mechanical properties of Al-alloys chill castings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 51, pp. 145-154, 2012.
- 10 SIQUEIRA, C., CHEUNG, N., GARCIA, A. Solidification thermal parameters affecting the columnar to equiaxed transition. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.33A, pp.2107 - 2118, 2002.
- 11 Gunduz, M and Çardili, E. Directional solidification of aluminium-copper alloys. **Materials Science Engineering. A**, v. 327, pp. 167-185, 2002.
- 12 ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers; Parte 1: Método de ensaio - Associação Brasileira de Normas Técnicas – 22 páginas.

- 13 ABNT NBR NM ISO 6507-4:2008 – Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers; Parte 4: Tabelas de valores de dureza - 103 páginas.
- 14 Lee, H., Chen, Y. Evolution of Ag₃Sn intermetallic compounds during solidification of eutectic Sn–3.5Ag solder. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, pp. 2510-2517, 2011.
- 15 Garcia, L.R., Osório, W.R., Garcia, A. The effect of cooling rate on the dendritic spacing and morphology of Ag₃Sn intermetallic particles of a SnAg solder alloy, **Materials and Design**, v. 32, pp. 3008–3012, 2011.