

PARÂMETROS TÉRMICOS, MACROESTRUTURA E MICROESTRUTURA NA SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL DA LIGA Al-20%Sn

Kleber Agustin Sabat da Cruz¹

Noé Cheung²

Amauri Garcia³

Resumo

As ligas Al-Sn são muito empregadas em aplicações tribológicas e seus componentes têm a característica de serem praticamente imiscíveis, sendo que o tipo de arranjo microestrutural decorrente induz boa resistência ao desgaste. Neste trabalho, foram realizadas análises térmicas e microestruturais ao longo de um lingote de liga Al-20%Sn, obtido por solidificação unidirecional transitória na direção vertical e sentido ascendente. O mapeamento térmico permitiu a obtenção do coeficiente global de transferência de calor metal/molde (h_g), com a utilização do método do confronto de perfis térmicos experimentais e simulados numericamente, e da evolução de variáveis térmicas (velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e taxa de resfriamento) durante o processo. A caracterização da microestrutura dendrítica foi feita por meio de medidas dos espaçamentos secundários (λ_2), que foram devidamente correlacionados com variáveis térmicas de solidificação. A liga Al-20%Sn mostrou um comportamento semelhante ao de outras ligas de alumínio, ou seja, a rede dendrítica tornou-se mais grosseira com a redução da taxa de resfriamento, indicando que a condição de imiscibilidade entre o alumínio e o estanho não interferiu na forma da relação entre espaçamento dendrítico e taxa de resfriamento. É determinada uma lei experimental de crescimento dendrítico.

Palavras-chave: Liga alumínio-estanho; Estrutura dendrítica; Parâmetros térmicos; Solidificação.

THERMAL PARAMETERS, MACROSTRUCTURE AND MICROSTRUCTURE DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF AN Al-20wt%Sn ALLOY

Abstract

Al-Sn alloys are widely used in tribological applications. Aluminium and tin form immiscible alloys and the type of the microstructural arrangement causes a good wear resistance. In this study, thermal and microstructural analysis were carried out along an Al-20wt%Sn alloy ingot produced by vertical upward directional transient solidification. The experimental thermal readings were fitted to numerical predictions in order to determine the global heat transfer coefficient (h_g) and were also used to calculate the evolution of thermal variables (tip growth rate and cooling rate) during solidification. The growth rate and the cooling rate play a key role in the microstructural formation. The dendritic microstructure has been characterized by secondary dendritic arm spacings (λ_2) which were experimentally determined and correlated to solidification thermal variables. The behavior presented by the Al-20wt%Sn alloy during solidification was similar to that of other aluminum alloys, i.e., the dendritic network became coarser with decreasing cooling rates, indicating that the immiscibility between aluminum and tin has not a significant effect on the relationship between the secondary dendritic arm spacing and cooling rate. An experimental dendritic growth law has been determined.

Key words: Alloy Al-Sn; Dendritic structure; Thermal parameters. Solidification.

¹Doutorando em Engenharia Mecânica na Área de Materiais e Processos do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). FEM - UNICAMP

CP6122 - 13083-970 - Campinas – SP. kleber@fem.unicamp.

²Pós-Doutorando em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). FEM – UNICAMP. CP6122 - 13083-970 - Campinas – SP. cheung@fem.unicamp.br

³Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). FEM – UNICAMP. CP6122 - 13083-970 - Campinas – SP. amaurig@fem.unicamp.br

I INTRODUÇÃO

O sistema binário Al-Sn é caracterizado por uma miscibilidade extremamente baixa do Sn no Al, e que se situa abaixo de 0,09% em peso. Nestas condições, as ligas com concentrações de Sn maiores do que 0,09% são constituídas por uma estrutura heterogênea caracterizada por uma matriz de alumínio com partículas de estanho disseminadas ao longo da matriz. Este tipo de arranjo estrutural determina o comportamento tribológico da liga, com a matriz tenaz sendo responsável pela resistência mecânica, enquanto as partículas de Sn atuam como um lubrificante sólido.⁽¹⁾ Esta classe de ligas apresenta um longo histórico de aplicações na fabricação de mancais, em função da combinação de resistência mecânica, boa conformabilidade e boas características de superfície. A liga mais comumente usada para este tipo de aplicação é a Al-20%Sn em peso, que reúne este conjunto de características mencionadas, embora tenha um custo relativamente alto.^(2,3) A importância dos espaçamentos celulares e dendríticos para as características mecânicas do produto solidificado tem incentivado pesquisas no sentido do desenvolvimento de leis de crescimento celular/dendrítico em função das variáveis térmicas de solidificação. A literatura relata que os espaçamentos celulares e dendríticos diminuem com o aumento da velocidade de solidificação e da taxa de resfriamento.^(4,5) Portanto, sistemas de solidificação que favoreçam essas condições devem contribuir para a obtenção de produtos de melhor resistência mecânica.

Mais recentemente, mostrou-se que os espaçamentos dendríticos têm um papel importante também na resistência à corrosão.^(6,7) No caso de ligas binárias são três os fatores de importância no que diz respeito a essa propriedade: (i) a taxa de resfriamento durante a solidificação, que define o arranjo da rede dendrítica; (ii) a forma de redistribuição de soluto durante a solidificação, e que depende do par metálico; e (iii) os comportamentos eletroquímicos anódico ou catódico de cada componente da liga.

Este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização térmica e estrutural de uma liga Al-20%Sn, tendo em vista a importância de tais informações para a concepção de microestruturas características de processos industriais que envolvam a liga Al-20%Sn, e que notadamente influenciam no seu comportamento mecânico.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga Al-20%Sn foi preparada no laboratório em um forno tipo mufla, e a sua composição foi aferida utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X. O experimento de solidificação unidirecional foi realizado em um dispositivo que provoca a solidificação unidirecional na direção vertical e sentido ascendente. Este dispositivo é constituído de forno a resistência elétrica, que comporta uma lingoteira bipartida de aço inox 310, com uma chapa molde de aço carbono 1020, com 3 mm de espessura, em sua base, que é refrigerada a água. Seu detalhamento pode ser visto em outros trabalhos que envolvem o estudo de estruturas de solidificação.⁽⁸⁻¹⁰⁾ Essas condições de solidificação conferem estabilidade ao líquido, já que não são induzidas correntes convectivas nem por fatores térmicos, já que a fonte extratora de calor está na base, nem por

fatores composicionais (diferenças de densidade), pois a rejeição de soluto provoca a formação de um líquido mais denso junto à fronteira sólido/líquido. Portanto, a convecção natural é minimizada.⁽¹¹⁾

A temperatura de início da solidificação foi de 639°C, ou seja, 2°C acima da temperatura *liquidus* da liga em estudo que é de 637°C. O mapeamento térmico durante o experimento de solidificação da liga foi feito através de termopares posicionados em sete pontos diferentes a partir da base refrigerada da lingoteira (5 mm; 10 mm; 15 mm; 30 mm; 50 mm; 70 mm). Os termopares utilizados foram do tipo “K” com bainha de aço inox com 1,6 mm de diâmetro. Estes termopares foram conectados a um registrador de dados, o qual estava interligado a um computador, no qual os perfis térmicos foram obtidos em tempo real. Na Figura 1, tem-se a representação esquemática do aparato utilizado neste estudo.

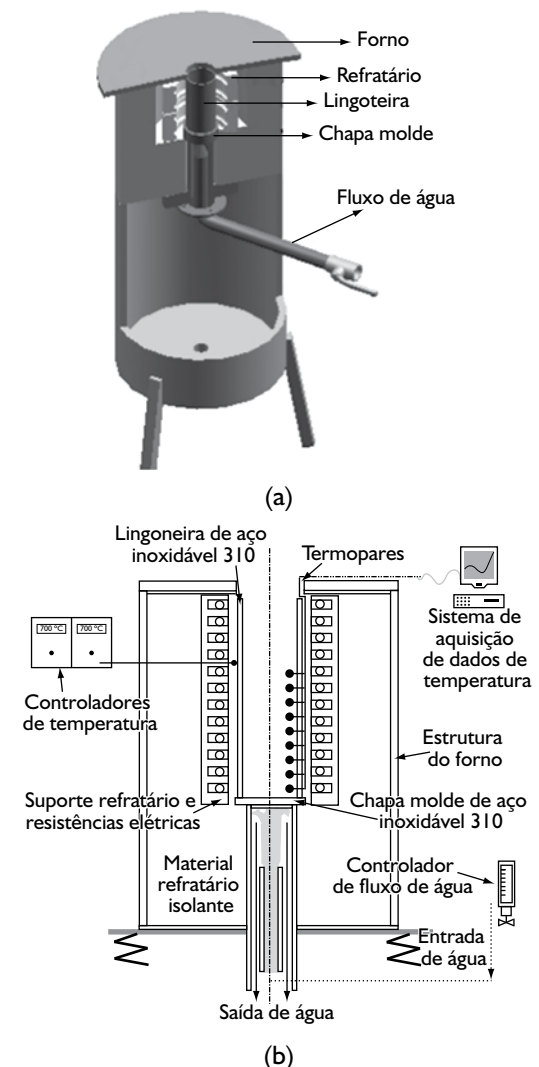


Figura 1. Dispositivo de solidificação unidirecional ascendente: a) vista em corte; e b) representação esquemática do corte longitudinal.

O lingote resultante (100 mm de comprimento) foi seccionado ao meio para a análise da macroestrutura (reagente de Tucker). Já para a análise da microestrutura, uma das metades foi seccionada de tal forma que fosse possível a visualização da rede dendrítica no plano longitudinal, objetivando a aferição e a caracterização dos espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) ao longo do lingote a partir da base. Na Figura 2, tem-se uma representação esquemática da metodologia adotada para retirada das amostras para a análise da microestrutura.

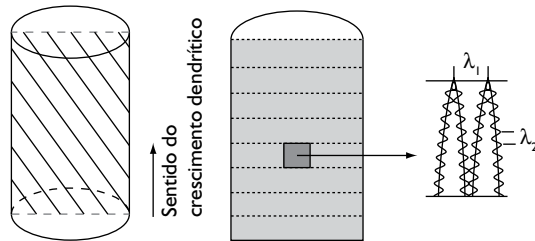


Figura 2. Representação esquemática da metodologia de obtenção das amostras para a caracterização microestrutural.

As amostras foram atacadas quimicamente para revelação da microestrutura usando uma solução de 0,5% HF em água. As estruturas foram visualizadas em um microscópio óptico (Neophot 32- Carl Zeiss, Esslingen, Germany) equipado com um sistema de análise de imagens (Leica Quantimet 500 MC), que possui o software usado para as medições dos espaçamentos dendríticos secundários (λ_2). Foram realizadas 30 medidas em cada posição considerada a partir da interface metal/molde.

3 RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Caracterização Térmica

A obtenção do coeficiente global de transferência de calor (h_g) foi a primeira ação realizada objetivando a caracterização térmica da liga Al-20%Sn. Por meio do método do confronto dos perfis térmicos teóricos e experimentais, foi determinado o coeficiente global transitório de transferência de calor para a liga em estudo. Este método baseia-se na comparação dos perfis térmicos obtidos experimentalmente com aqueles simulados utilizando-se um programa baseado no método de diferenças finitas (MDF).⁽¹²⁾ Esta comparação entre perfis é feita a partir de uma varredura de perfis arbitrários resultantes de um determinado perfil de coeficientes de transferência de calor metal/fluido de refrigeração, até que se obtenha um perfil simulado que melhor se ajuste aos perfis térmicos experimentais.

Na Figura 3, tem-se a ilustração do resultado da abordagem numérico-experimental das curvas de resfriamento obtidas para a liga Al-20%Sn. Nota-se que o coeficiente transitório atuante durante a solidificação da liga Al-20%Sn, utilizando uma fonte extratora de calor de aço carbono 1020 (3 mm de espessura), sendo refrigerada por água a 25°C, pode ser representado por $h_g = 10500.t^{-0.1}$, em que h_g é o coeficiente global de transferência de calor e t é o tempo.

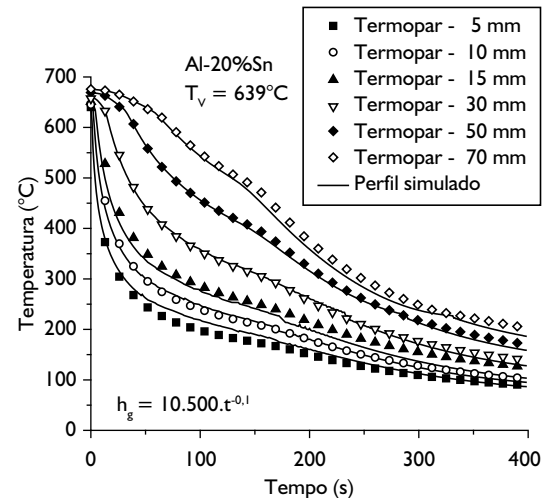


Figura 3. Comparação entre os perfis térmicos teóricos e experimentais obtidos na solidificação unidirecional de uma liga Al-20%Sn.

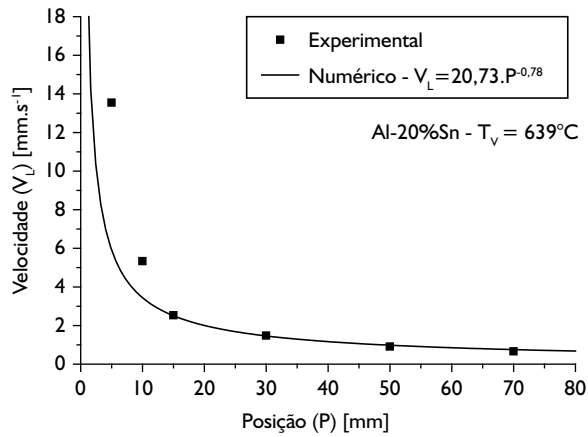
Após a obtenção do h_g , deduziram-se curvas que descrevem a evolução da velocidade da isoterma *liquidus* (V_L) e da taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus* (\dot{T}) a partir da base do lingote (Figura 4). A curva da velocidade é obtida a partir da derivada da curva que descreve a posição da isoterma *liquidus* com o tempo, a qual é extraída das curvas de resfriamento teóricas. Após essa etapa, faz-se a comparação dos dados experimentais da velocidade V_L para cada posição com a equação do tipo $V_L = C.P_L^{-n}$, que foi obtida numericamente.

A curva da taxa de resfriamento também é obtida dos perfis térmicos simulados e posteriormente confrontada com os dados experimentais. Na Figura 4, tem-se a apresentação das curvas, e nota-se que os dados experimentais e os resultados numéricos apresentam uma tendência coincidente.

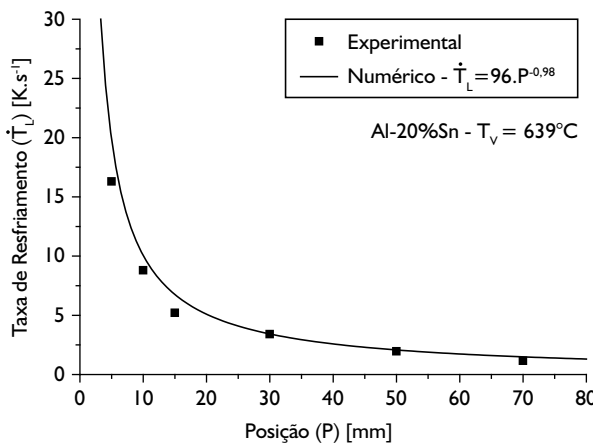
3.2 Caracterização Estrutural

3.2.1 Macroestrutura

A macroestrutura da liga em estudo foi obtida objetivando a visualização da morfologia granular predominante no lingote. De acordo com a Figura 5a, nota-se que houve uma predominância de grãos colunares ao longo de todo o lingote, mas com uma tendência de surgimento de grãos equiaxiais perto do topo do lingote. Em publicação recente abordam-se os critérios para transição colunar-equiaxial de ligas Al-Sn.⁽¹³⁾



(a)



(b)

Figura 4. Curvas que descrevem a evolução das variáveis térmicas de solidificação ao longo do lingote: a) velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus*; e b) taxa de resfriamento.

3.2.2 Microestruturas

Nas Figuras 5b a 5e, apresenta-se a ilustração da evolução da rede dendrítica em quatro posições diferentes, mostrando que a microestrutura vai se tornando mais grosseira à medida que se afasta da fonte extratora de calor. Este comportamento da estrutura pode ser explicado devido à relação existente entre a velocidade com que se processa a solidificação e espaçamento dendrítico secundário, que tende a aumentar com a redução da taxa de resfriamento. A taxa de resfriamento diminui gradativamente com o aumento da distância à superfície refrigerada ($B > E$, na Figura 5) e isto se reflete nas microestruturas visualizadas pelo engrossamento das ramificações dendríticas.

Na Figura 6, apresenta-se, em escala logarítmica, a evolução do espaçamento dendrítico secundário (λ_2) com a velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus*. Ao longo do lingote, a faixa de espaçamentos variou de 12 μm até cerca de 30 μm . A equação experimental que descreve o espaçamento secundário em função da velocidade é $\lambda_2 = 25.V_L^{-2/3}$.

Na Figura 7, apresenta-se λ_2 em função da taxa de resfriamento. Esta relação apresenta um fator exponencial igual a $-0,55$ e não pode ser vista como uma lei de crescimento dendrítico geral para o sistema Al-Sn, pois os resultados para apenas uma liga são insuficientes para determinar tal lei. O propósito deste estudo foi apenas caracterizar a liga térmica e estruturalmente, com o objetivo de apresentar uma primeira contribuição em direção à obtenção da lei que caracterize o crescimento dendrítico para o sistema Al-Sn, atualmente inexistente na literatura.

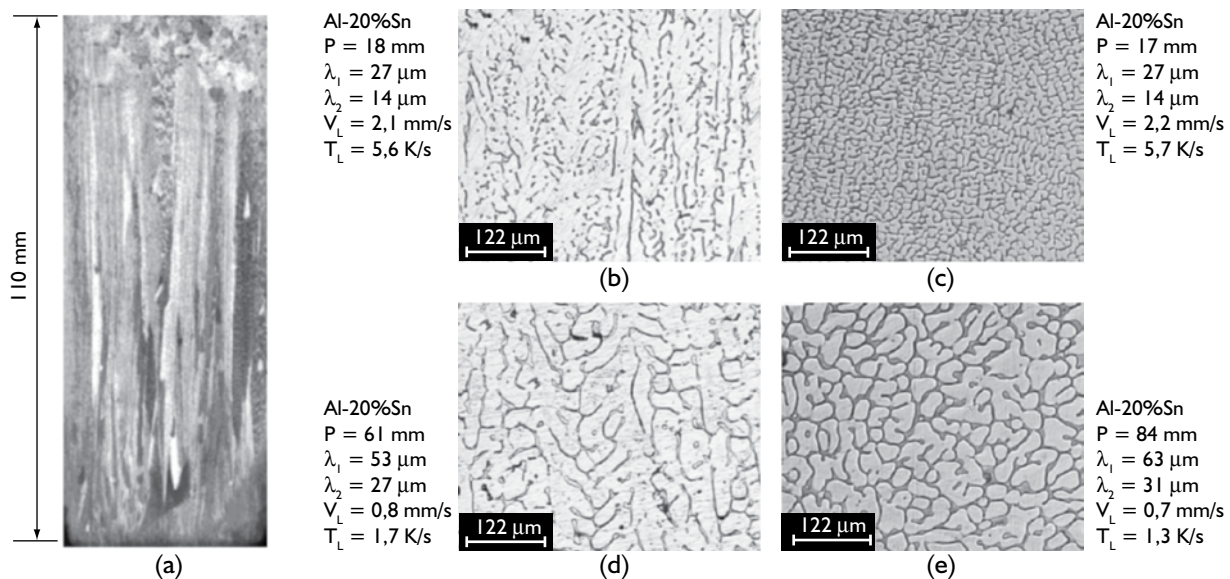


Figura 5. a) Macroestrutura da liga Al-20%Sn obtida neste estudo. Estruturas longitudinais obtidas em quatro diferentes distâncias da interface metal/molde: b) 18 mm; c) 17 mm; d) 61 mm; e e) 84 mm.

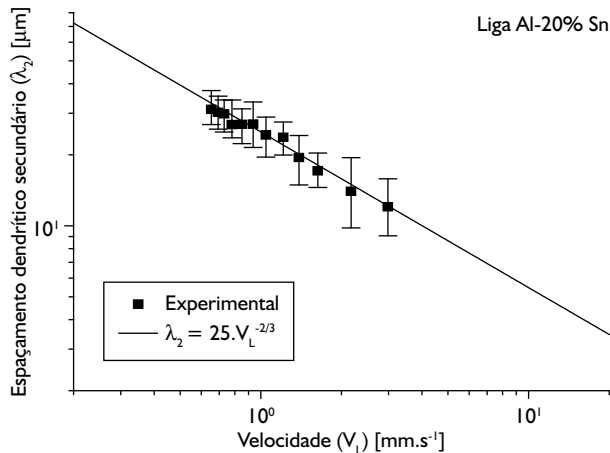


Figura 6. Espaçamento dendrítico secundário (λ_2) em função da velocidade de solidificação no lingote partindo da fonte extratora de calor.

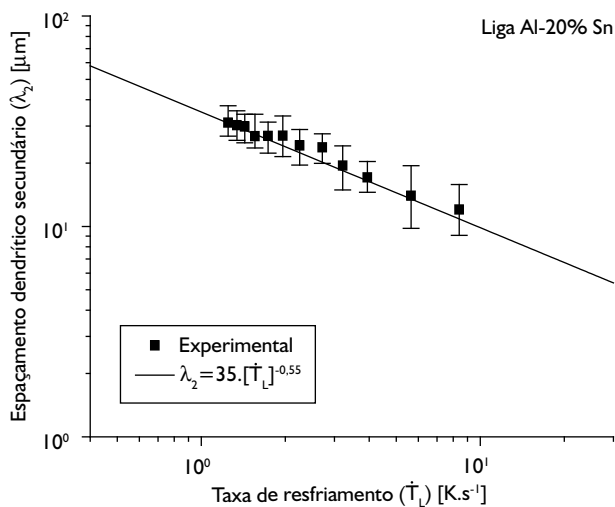


Figura 7. Espaçamento dendrítico secundário (λ_2) em função da taxa de resfriamento.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- O confronto entre os perfis térmicos teóricos e experimentais permitiu a determinação do coeficiente global transitório de transferência de calor metal/fluido de refrigeração, que é dado por $h_g = 10500 \cdot t^{-0,1}$, em que h_g ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) e o tempo t (s);
- A evolução da configuração da rede dendrítica, à medida que se afasta da fonte extratora de calor, assemelha-se a de ligas de outros sistemas⁽¹⁴⁾ como Al-Si, Al-Cu, Sn-Pb, ou seja, a estrutura dendrítica vai se tornando grosseira à medida que diminui a taxa de resfriamento. Portanto, a imiscibilidade quase que total dos componentes não interferiu na forma da relação entre o espaçamento e a taxa de resfriamento; e
- A relação entre espaçamento dendrítico secundário (λ_2) e velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L) foi obtida experimentalmente e é descrita pela equação: $\lambda_2 = 25 \cdot V_L^{-2/3}$. Já para a correlação entre λ_2 e taxa de resfriamento (\dot{T}_L), a relação funcional é $\lambda_2 = 35 \cdot \dot{T}_L^{-0,55}$. Estas relações não podem ser vistas como leis de crescimento dendrítico geral para o sistema Al-Sn, mas são uma primeira contribuição para a caracterização do crescimento dendrítico nesse sistema binário.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e à FAEPEX-UNICAMP pelo apoio financeiro para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 PERRONE, A. Al-Sn thin films deposited by pulsed laser ablation. **Materials Science and Engineering C**, v. 22, n. 2, p. 465-8, Dec. 2002.
- 2 PATHAK, J.P.; MOHAN, S. Tribological behavior of conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication. **Bulletin on Materials Science**, v. 26, n. 1, p. 315-20, Jan.-Dec. 2003.
- 3 YUAN, G.C.; LI, Z.J.; LOU, Y.X.; ZHANG, X.M. Study on crystallization and microstructure for new series of Al-Sn-Si alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 280, n. 1, p. 108-15, Mar. 2000.
- 4 BOUCHARD, D.; KIRKALDY, J.S. Prediction of dendrite arm spacings in unsteady and steady state heat flow of unidirectionally solidified binary alloys. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 28B, n. 4, p. 651-65, Aug. 1997.
- 5 HUNT, J.D.; LU, S.Z. Numerical modeling of cellular array growth: spacing and structure predictions. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27A, n. 3, p. 611-23, Mar. 1996.

- 6 OSÓRIO, W.R.; FREIRE, C.M.; GARCIA, A. The effect of the dendritic structure on the corrosion resistance of Zn-Al alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 397, n. 1-2, p. 179-91, July 2005.
- 7 OSÓRIO, W.R.; GOULART, P.R.; SANTOS, G.A.; MOURA NETO, C.; GARCIA, A. Effect of the dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al 9wt pct Si and Zn 27wt pct Al alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 37A, n. 8, p. 2525-38, Aug. 2006.
- 8 OSÓRIO, W.R.; SPINELLI, J.E.; FERREIRA, I.I.; GARCIA, A. The roles of macrosegregation and of dendritic array spacings on the electrochemical behavior of an Al-4.5wt%Cu alloy. **Electrochimica Acta**, v. 52, n.9, p. 3265-73, Feb. 2007.
- 9 ROCHA O.F.L.; SIQUEIRA, C.A.; GARCIA, A. Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 347, n. 9, p. 59-69, Feb. 2003.
- 10 SIQUEIRA, C.A.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. Solidification thermal parameters affecting the columnar-to-equiaxed transition. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33A, n. 7, p. 2107-18, July 2002.
- 11 MAGNUSSON, T.; ARNBERG, L. Density and solidification shrinkage of hypoeutectic aluminum-silicon alloys, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 32A, n. 10, p. 2605-2613, Oct. 2001.
- 12 SPIM, J. A.; GARCIA, A. A modified network approach for modeling solidification of complex-shaped domains. **Numerical Heat Transfer – B**, v. 38, n. 1, p. 75-92, July 2000.
- 13 CANTÉ, M.V.; CRUZ, K.S.; SPINELLI, J.E.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. Experimental analysis of the columnar-to-equiaxed transition in directionally solidified Al-Ni and Al-Sn alloys. **Materials Letters**, v. 61, n. 11-12, p. 2135-8, May 2007.
- 14 PERES, M.D, SIQUEIRA, C.A, GARCIA, A. Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions **Journal of Alloys and Compounds**, v. 381, n. 1-2, p. 168-81, Nov. 2004.

Recebido em: 27/03/08

Aceito em: 01/04/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.