

# CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E MICROESTRUTURAL DA LIGA Al-20%Sn<sup>1</sup>

Kleber A.S. Cruz<sup>2</sup>  
Noé Cheung<sup>3</sup>  
Amauri Garcia<sup>4</sup>

## Resumo

As ligas Al-Sn são bastante usadas em aplicações tribológicas. Os componentes dessas ligas possuem a característica de serem praticamente imiscíveis e o tipo de arranjo microestrutural decorrente induz boa resistência ao desgaste. Este trabalho realizou análises térmica e microestrutural 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 ( $h_g$ ), através 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. Essas variáveis são determinantes para a formação da microestrutura. A caracterização da microestrutura dendrítica foi feita através de medidas dos espaçamentos secundários ( $\lambda_2$ ), 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 se tornou 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. Obteve-se uma lei de crescimento dendrítico experimental, à qual tem como propósito contribuir para o entendimento do crescimento dendrítico do sistema Al-Sn.

**Palavras-chave:** Al-Sn; Estrutura dendrítica; Variáveis térmicas de solidificação.

## THERMAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE Al-20wt%Sn ALLOY

### Abstract

The Al-Sn alloys are widely used in tribological applications. Aluminium and tin form immiscible alloys and the type of the microstructural disposition causes a good wear resistance. In this study, thermal and microstructural analysis were carried out overthrough the Al-20wt%Sn ingot produced by vertical upward directional solidification in the unsteady-state conditions. The thermal mapping was analyzed by means of obtaining the global heat transfer coefficient ( $h_g$ ) and calculating the evolution of the thermal variables (tip growth rate and cooling rate) during the solidification process. The growth rate and the cooling rate play a key role in the microstrucutural formation. The dendritic microstructural characterization was studied through the secondary dendritic arm spacing ( $\lambda_2$ ) measurements and then the secondary spacings were correlated to solidification thermal variables. The behaviour presented by Al-20%wtSn alloy during solidification was similar to that for other aluminum alloys, in other words, the dendritic network became coarser with the reduction of the cooling rate, indicating that the immiscibility between aluminum and tin hasn't caused influence on the relationship between the secondary dendritic arm spacing and cooling rate. An experimental dendritic growing law was obtained in order to contribute to the understanding of the dendritic formation of this alloy system.

**Key words:** Al-Sn; Dendritic structure; Solidification thermal variables.

<sup>1</sup> Trabalho destinado ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Campinas (Dema-Unicamp)

<sup>3</sup> Pós-Doutorando em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Campinas (Dema-Unicamp)

<sup>4</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade estadual de Campinas (Dema-Unicamp)

## 1 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 de uma estrutura metalográfica 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.<sup>[1]</sup> 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.<sup>[2,3]</sup> A importância dos espaçamentos celulares e dendríticos para as características mecânicas do produto solidificado têm incentivado pesquisas no sentido do desenvolvimento de leis de crescimento dendrítico em função das variáveis térmicas de solidificação. A literatura mostra que os espaçamentos celulares e dendríticos diminuem com o aumento da velocidade de solidificação e da taxa de resfriamento.<sup>[4,5]</sup> 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.<sup>[6]</sup> No caso de ligas binárias são 03 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. Para ligas Zn-Al, verificou-se que as ligas hipoeutéticas que apresentam maiores resistências à corrosão são aquelas com espaçamentos dendríticos mais refinados. Já as ligas hipereutéticas Zn-Al tem a sua resistência à corrosão aumentada para estruturas dendríticas mais grosseiras.<sup>[7]</sup>

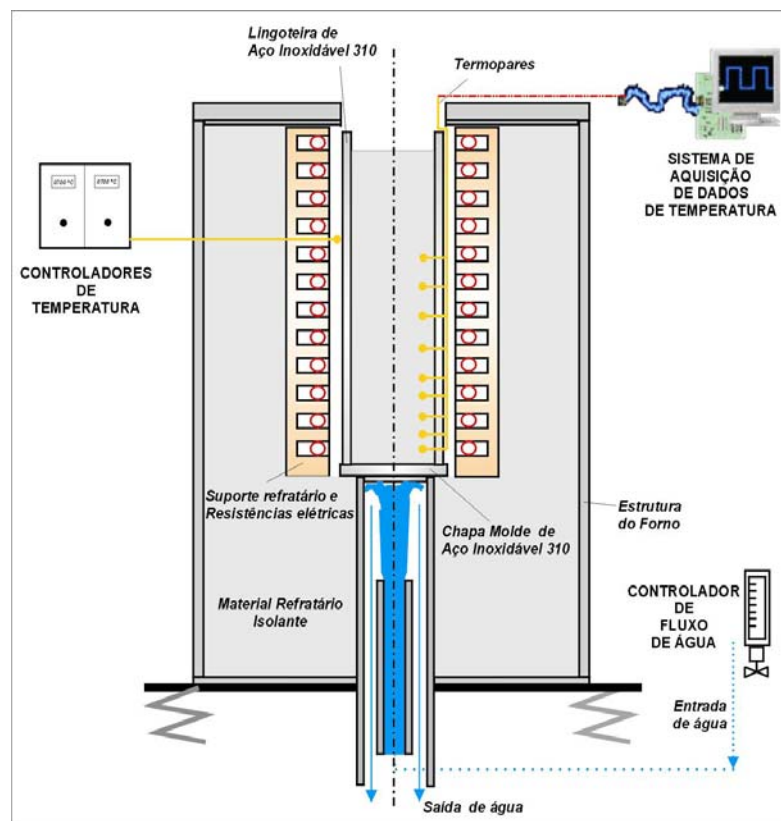
Este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização térmica e estrutural de uma liga Al-20%Sn, tendo em vista a importância de tais informações para a concepção de microestruturas características de processos industriais que envolvem as ligas Al-20%Sn e que influenciam no seu comportamento mecânico.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga Al-20%Sn foi preparada no laboratório em um forno tipo mufla, e a sua composição foi aferida através 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, o qual comporta uma lingoteira bipartida de aço inox 310, com uma chapa molde em sua base que é refrigerada a água. Seu detalhamento pode ser visto em outros trabalhos que envolvem o estudo de estruturas de solidificação.<sup>[8-10]</sup> 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

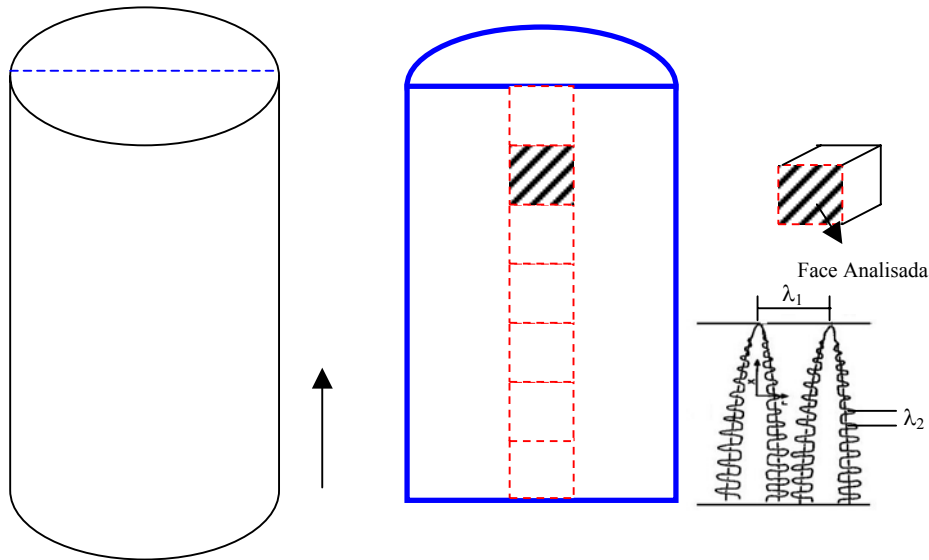
provoca a formação de um líquido mais denso junto à fronteira sólido/líquido. Portanto, a convecção natural é minimizada.<sup>[11]</sup>

A temperatura de início da solidificação foi de 643°C, ou seja, 6°C acima da temperatura *liquidus* da liga em estudo que é cerca 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 da lingoteira (3,5; 7,5; 11; 21; 35,5; 50,5 e 65 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 interfaceado a um computador, no qual os perfis térmicos foram formados em tempo real. Na Figura 1, tem-se a representação esquemática do aparato utilizado neste estudo.



**Figura 1-** Representação esquemática do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente

O lingote resultante (150mm 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 as ramificações primárias, objetivando a aferição e caracterização dos espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$ ) 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

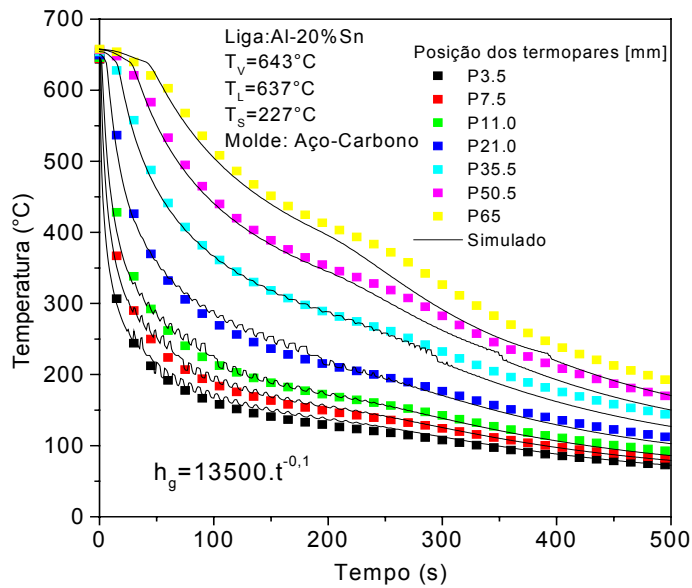
As amostras foram atacadas quimicamente para revelação da microestrutura usando uma solução de 0,5% HF em água, e as estruturas foram visualizadas em um microscópio óptico (*Neophot 32- Carl Zeiss, Esslingen, Germany*) equipado com o sistema *Leica Quantimet 500 MC*, o qual possui o software usado para as medições dos espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$ ). Foram feitas 30 medidas em cada posição considerada a partir da interface metal/molde.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS

#### 3.1 Caracterização Térmica

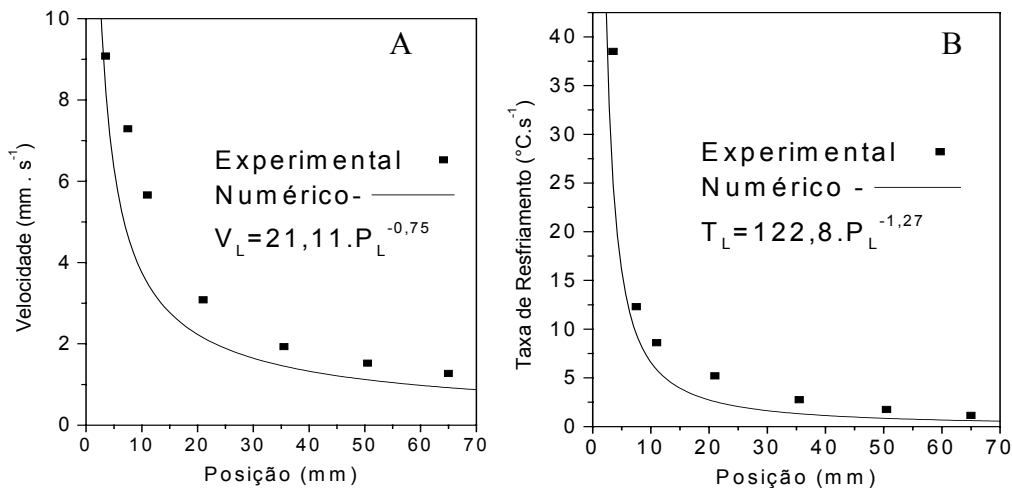
A obtenção do coeficiente global de transferência de calor ( $h_g$ ) foi a primeira ação feita objetivando a caracterização térmica da liga Al-20%Sn. Através do método do confronto dos perfis térmicos teóricos e experimentais, o coeficiente global transitório de transferência de calor para a liga em estudo foi determinado. Este método baseia-se na comparação dos perfis térmicos obtidos experimentalmente com aqueles simulados através de um programa baseado no método de diferenças finitas (MDF).<sup>[12]</sup> Esta comparação entre perfis é feita a partir de uma varredura de perfis arbitrários resultantes de um determinado coeficiente 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 que atuou durante a solidificação da liga Al-20%Sn, utilizando uma fonte extratora de calor de aço carbono 1020 (3mm de espessura), sendo refrigerada por água à 25°C, pode ser representado por  $h_g=13500.t^{0,1}$ , onde  $h_g$  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 isto, faz-se a comparação dos dados experimentais da velocidade  $V_L$  para cada posição com a equação do tipo  $V_L = C.P_L^{-n}$ , a qual 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 houve uma boa concordância entre os dados experimentais e os numéricos.



**Figura 4** - Curvas que descrevem a evolução das variáveis térmicas de solidificação ao longo do lingote (A) Velocidade de deslocamento da isoterma liquidus; (B) Taxa de resfriamento.

## 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 5, nota-se que houve uma predominância de grãos colunares ao longo de todo o lingote, mas com uma tendência de surgimento de grãos equiaxiais a uma altura de cerca de 100mm da base. Ocorreu, portanto, uma transição colunar-equiaxial neste ponto.

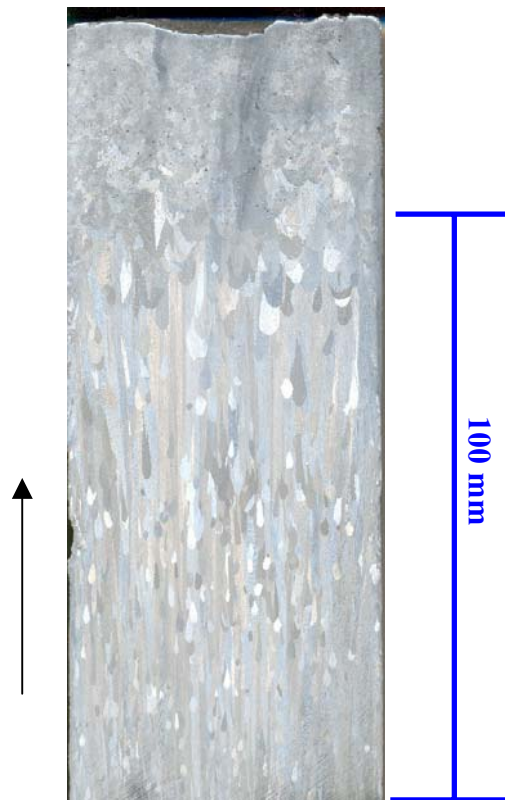


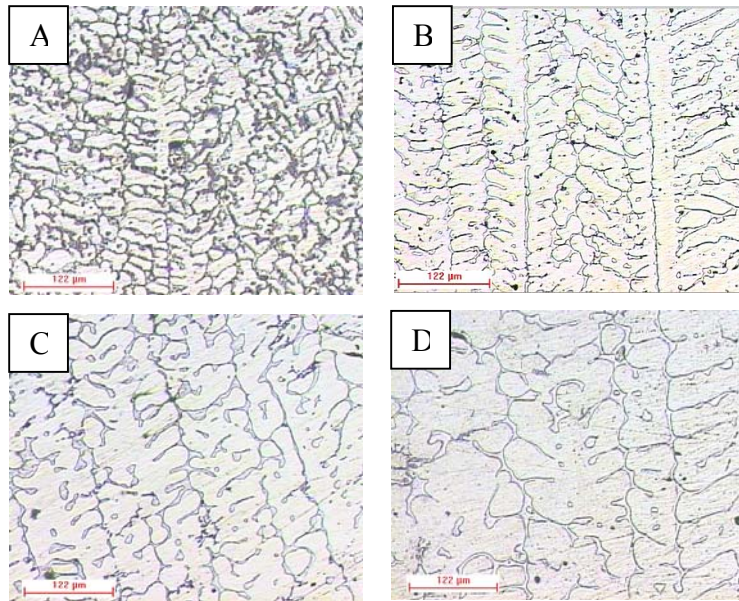
Figura 5 – Macroestrutura da liga Al-20%Sn obtida neste estudo

### 3.2.1 Microestruturas

As microestruturas foram analisadas na seção longitudinal do lingote, objetivando a caracterização e a medição dos espaçamentos dendríticos secundários.

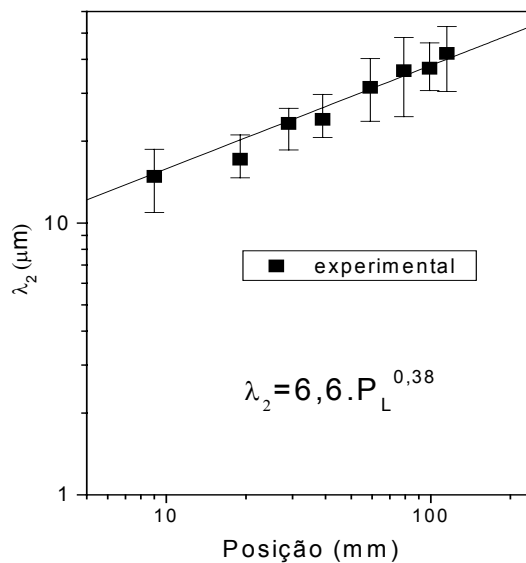
Na Figura 6, tem-se a ilustração da evolução da rede dendrítica em quatro posições diferentes, mostrando que a microestrutura vai se tornando mais grosseira à medida que afasta-se da fonte extratora de calor.

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 ( $A > D$  na Figura 6) e isto se reflete nas microestruturas visualizadas através do engrossamento das ramificações dendríticas.



**Figura 6.-** Microestruturas Longitudinais obtidas da liga Al-20%Sn em quatro diferentes distâncias da interface metal/molde (chapa-molde): ( A)9mm; (B)20mm; (C) 61mm; (D)83mm

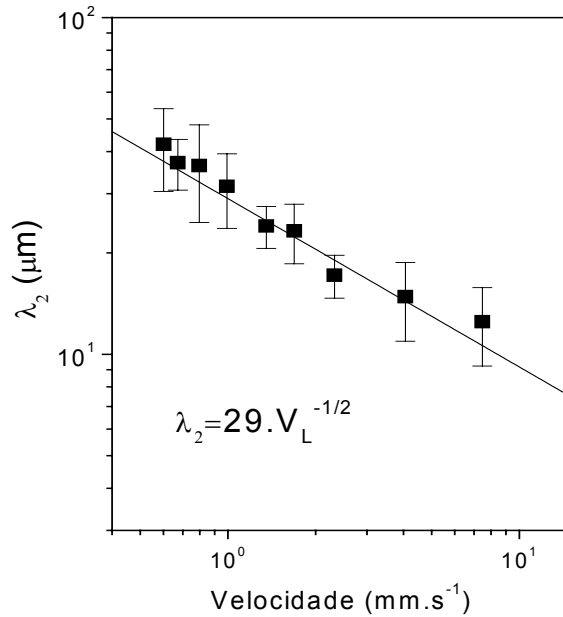
Na Figura 7, apresenta-se, em escala logarítmica, a evolução do espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) com a posição. Ao longo do lingote, a faixa de espaçamentos variou de 15 $\mu\text{m}$  até cerca de 45  $\mu\text{m}$ . A equação experimental que descreve o espaçamento secundário em função da posição foi  $\lambda_2 = 6,6 \cdot P_L^{0,38}$ .



**Figura 7.-** Espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) em função da posição no lingote partindo da fonte extratora de calor

Na Figura 8, apresenta-se  $\lambda_2$  em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus. Esta relação foi obtida experimentalmente 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 a caracterização térmica e estrutural da liga Al-Sn, mas também tem o objetivo de dar uma primeira contribuição em direção à obtenção da lei que caracterize o crescimento dendrítico para o sistema Al-Sn, atualmente inexistente na literatura.





**Figura 8** - Espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus

#### 4 CONCLUSÕES

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

1. 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  $h_g = 13500 \cdot t^{0,1}$ , onde  $h_g$  [ $W \cdot m^{-2} K^{-1}$ ] e o tempo  $t$  [s].
2. 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 <sup>[13]</sup>, 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.
3. A relação entre espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) e velocidade de solidificação ( $V_L$ ) foi obtida experimentalmente e é descrita pela equação:  $\lambda_2 = 29 \cdot V_L^{-1/2}$ . Esta relação não pode ser vista como uma lei de crescimento dendrítico geral para o sistema Al-Sn, mas é uma primeira contribuição para a caracterização do crescimento dendrítico nesse sistema binário.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, CNPq e 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*, vol. 22, pp. 465-468, 2002
- 2 PATHAK, J.P, MOHAN, S. Tribological Behavior of Conventional Al-Sn and Equivalent Al-Pb Alloys Under Lubrication, *Bulletin on Materials Science*, vol. 26, pp. 315-320, 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*, vol. 280, pp. 108-115, 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*. vol. 28B, pp. 651-665, 1997
- 5 HUNT, J.D., LU, S.Z. Numerical Modeling of Cellular Array Growth: Spacing and Structure Predictions, *Metallurgical and Materials Transactions A*. vol. 27A, pp. 611-623, 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*, vol. 397, pp. 179-191, 2005
- 7 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*, vol. 397, pp. 179-191, 2005
- 8 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*, vol. 397, pp. 179-191, 2005
- 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, pp. 59-69. 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, , pp. 2107-2118, 2002
- 11 MAGNUSSON, T.; ARNBERG, L.; Density and solidification shrinkage of hypoeutectic aluminum-silicon alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v 32A, pp. 2605-2613, 2001.
- 12 SPIM, J. A.; GARCIA, A.; A modified network approach for modeling solidification of complex-shaped domains, *Numerical Heat Transfer – B*, v. 38, pp. 75-92, 2000
- 13 PERES, M.D, SIQUEIRA, C.A, GARCIA, A. Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions *J. Alloys Compd.* Vol. 381 (2004) p. 168