

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DE SOLIDIFICAÇÃO NOS ESPAÇAMENTOS DENDRÍTICOS PRIMÁRIOS DE LIGAS Al-Cu

**Otávio F. L. da Rocha**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará- CEFET/PA, Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, E-mail: otavio.rocha@cefetpa.br

**Cláudio A. S. Filho**

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, PO Box 6122, CEP: 13083-970, E-mail: claudio@fem.unicamp.br

**Amauri Garcia**

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, PO Box 6122, CEP: 13083-970, E-mail: amaurig@fem.unicamp.br

**Resumo:** *Na grande maioria das condições reais de solidificação, como no caso dos processos de fundição e lingotamento contínuo, a morfologia da estrutura é tipicamente dendrítica e não apresenta alterações significativas ao longo da peça solidificada exceto pelo tamanho dos espaçamentos dendríticos. A elevada importância tecnológica desses processos, despertou o grande interesse de pesquisadores em todo mundo no sentido de correlacionar quantitativamente os parâmetros térmicos dos processos com os espaçamentos interdendríticos, pois, é sabido que espaçamentos interdendríticos menores proporcionam melhores propriedades mecânicas nos produtos fundidos. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura são para condições de extração de calor em regime estacionário. Este trabalho tem como objetivo principal investigar a influência dos parâmetros térmicos da solidificação como velocidade de crescimento ( $V_L$ ) e taxa de resfriamento ( $\dot{T}$ ) nos espaçamentos dendríticos primários em condições de solidificação em regime transitório. Para tanto, foi utilizado um sistema de solidificação unidirecional vertical refrigerado à água e três ligas do sistema Al-Cu (Al-5%; 8% e 15%Cu). Os resultados experimentais são comparados com modelos teóricos de crescimento dendríticos existentes na literatura para regime transitório de extração de calor.*

**Palavras-Chaves:** Solidificação Unidirecional, Espaçamentos Dendríticos, Modelos de Crescimento Dendríticos

## 1. INTRODUÇÃO

Uma interessante forma de estudar o crescimento de dendritas em peças fundidas é através da análise de estruturas brutas obtidas a partir de sistemas de solidificação unidirecional (Garcia, 2001). Modelos teóricos (Hunt, 1979; Kurz e Fisher, 1992; Hunt e Lu, 1996; Trivedi, 1984 e Bouchard e Kirkaldy 1997), fundamentados nesses sistemas de solidificação, foram desenvolvidos para examinar a influência dos parâmetros térmicos da solidificação sobre os espaçamentos celulares e dendríticos primários e secundários. Somente os modelos de Hunt-Lu (1996) e Bouchard-Kirkaldy (1997), foram elaborados para condições de solidificação em regime transitório de extração de calor, os demais são para regime estacionário. Esses estudos têm estabelecido um forte relacionamento desses parâmetros estruturais com os parâmetros térmicos de solidificação mostrado de forma generalizada pela Eq. (1).

$$(\lambda_C, \lambda_1, \lambda_2) = C(G_L, V_L, \dot{T})^{-n} \quad (1)$$

onde, C é uma constante que depende do tipo de liga e n é um expoente que tem sido determinado experimentalmente na literatura (Rocha et al, 2002 e 2003; Gunduz e Çardili, 2002; Osório e Garcia, 2002; Quaresma et al, 2000; Bouchard e Kirkaldy, 1997; Okamoto e Kishitake, 1975) para uma série de ligas,  $\lambda_C$ ,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , são respectivamente, os espaçamentos celulares e dendríticos primários e secundários,  $G_L$  é o gradiente de temperatura frente à isoterma liquidus,  $V_L$  é a velocidade de deslocamento da isoterma liquidus e  $\dot{T}(G_L, V_L)$  é a taxa de resfriamento.

O presente trabalho tem como objetivos principais correlacionar os parâmetros térmicos de solidificação ( $V_L$  e  $\dot{T}$ ) com os espaçamentos dendríticos primários ( $\lambda_1$ ) para condições de solidificação em regime transitório de extração de calor, bem como comparar os resultados experimentais de  $\lambda_1$  com os modelos de Hunt-Lu (1996) e Bouchard-Kirkaldy (1997) [Eqs. (2) a (5), respectivamente].

$$\lambda'_1 = 0.07798 V^{(a-0.75)} (V' - G')^{0.75} G'^{-0.6028} \quad (\text{Hunt-Lu}) \quad (2)$$

onde,

$$a = -1.131 - 0.1555 \log_{10}(G') - 0.007589 [\log_{10}(G')]^2 \quad (3)$$

$$\lambda'_1 = \frac{\lambda_1 \Delta T}{\Gamma k_0}, \quad G' = \frac{G_L \Gamma k_0}{\Delta T^2} \quad \text{and} \quad V' = \frac{V_L \Gamma k_0}{D \Delta T} \quad (4)$$

$$\lambda_1 = a_1 \left( \frac{16 C_0^{1/2} G_0 \varepsilon \Gamma D}{(1 - k_0) m_L G_L V_L} \right)^{1/2} \quad (\text{Bouchard-Kirkaldy}) \quad (5)$$

onde  $C_0$  é o teor de soluto (Cu),  $\Gamma$  é o coeficiente de Gibbs-Thomson,  $D$  é a difusividade de soluto no líquido,  $G_0 \varepsilon$  é um parâmetro característico  $\approx 600 \times 6 \text{ Kcm}^{-1}$ , valor esse definido para compostos orgânicos (Bouchard-Kirkaldy, 1997),  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas liquidus ( $T_L$ ) e solidus ( $T_S$ ) de equilíbrio,  $m_L$  é a inclinação da linha liquidus,  $k_0$  é o coeficiente de partição do soluto e  $a_1$  é o fator de calibração utilizado para corrigir o modelo correspondente. O valor de  $\lambda_1$  descrito no modelo de Hunt-Lu [Eqs. (2) a (4)] refere-se ao comprimento do raio da ponta da dendrita. Portanto, para que os valores calculados a partir das respectivas equações possam ser comparados com resultados experimentais, os mesmos precisam ser multiplicados por duas ou quatro vezes, cujos fatores representam os mínimos e máximos de uma faixa de valores.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas as ligas Al-5%, 8% e 15%Cu (% em peso), molde constituído de uma chapa de aço 1010 de formato circular com espessura de 3 mm e 50 mm de diâmetro interno, o qual foi fixado à base de um cilindro vazado de aço inoxidável de 110 mm de altura. Adotou-se superaquecimento de 10% acima das temperaturas liquidus das ligas analisadas.

As propriedades termofísicas das ligas Al-Cu assumidas neste trabalho foram baseadas na literatura (Bouchard e Kirkaldy, 1997; Quaresma et al, 2000, Rocha et al, 2002 e 2003; Siqueira et al, 2002).

O sistema completo de solidificação utilizado foi detalhado em artigos prévios (Rocha et al, 2002 e 2003) o qual foi projetado de tal modo que a extração de calor seja realizada somente pela parte inferior refrigerada a água, promovendo uma solidificação unidirecional vertical.

As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de 5 (cinco) termopares tipo K (1.6 mm diâmetro) localizados no metal líquido nas seguintes posições em relação à interface metal/molde: 5 mm, 10 mm, 15 mm, 30 mm e 50 mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial em um registrador de dados interfaceados com um computador, e os dados de temperatura foram adquiridos automaticamente.

Finalmente, os lingotes obtidos foram submetidos às técnicas metalográficas para caracterizar e quantificar as estruturas dendríticas resultantes. Nove corpos de provas, perpendiculares à extração de calor, foram retirados dos mesmos e a seguinte solução ácida foi utilizada na revelação microestrutural: NaOH 5%. A metodologia empregada para quantificar os espaçamentos dendríticos primários foi detalhada em artigos recentes<sup>[9-12, 16]</sup>.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada liga foram obtidos os mapeamentos de temperaturas para as cinco posições dos termopares no lingote, e através dos quais foram determinadas experimentalmente as velocidades de deslocamento da isoterma liquidus ( $V_L$ ) e as taxas de resfriamento ( $\dot{T}$ ), conforme procedimento descrito em artigo prévio (Rocha et al, 2002 e 2003).

As Figuras (1) a (3) apresentam à correlação entre os espaçamentos dendríticos primários com os respectivos parâmetros térmicos. Como esperado nota-se menores valores de  $\lambda_1$  para taxas de resfriamento e velocidades maiores.

Existem poucos trabalhos na literatura investigando o efeito do teor de soluto ( $C_0$ ) sobre o espaçamento dendrítico primário. Neste trabalho, para as ligas Al-Cu a influência de  $C_0$  nos valores dos espaçamentos dendríticos primários foi examinada através da comparação entre os pontos médios experimentais obtidos, em cada caso, conforme mostra a Fig. (1). Para as ligas Al-Cu,  $C_0$  tem pouca influência sobre  $\lambda_1$  com uma única lei de crescimento representando a variação dos espaçamentos com a taxa de resfriamento para todas as três ligas examinadas. Esses resultados estão concordantes com aqueles encontrados por Sharp e Hellawel (1969), os quais determinaram em seus experimentos para ligas Al-Cu que os espaçamentos dendríticos primários são independentes de  $C_0$ . Esses resultados contrariam a análise teórica/experimental de Okamoto e Kishitake (1975), na qual o espaçamento primário cresce com o aumento do teor de soluto.

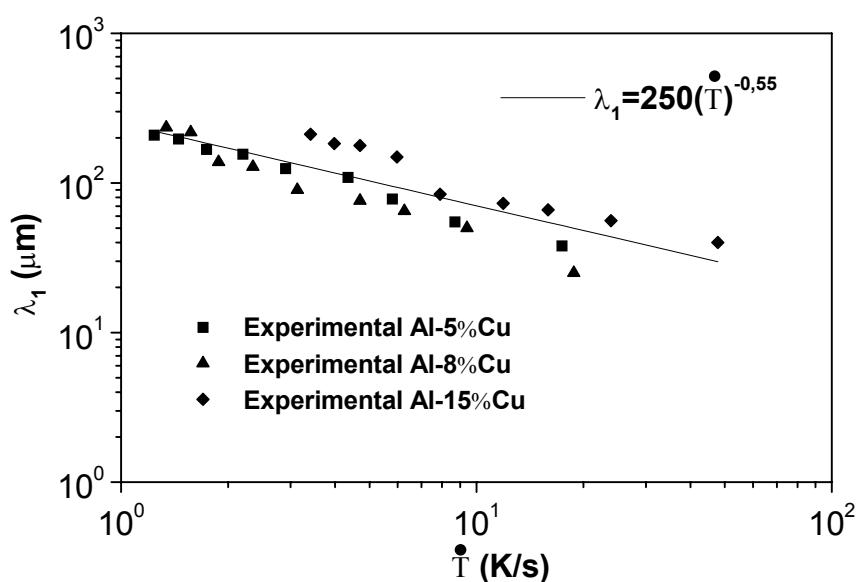


Figura 1. Espaçamentos dendríticos primários como uma função da taxa de resfriamento.

A Figura 2 apresenta a comparação entre os resultados experimentais de  $\lambda_1$  obtidos neste trabalho com os modelos teóricos propostos por Hunt-Lu (1996) [Eqs. (2) a (4)] e Bouchard-Kirkaldy (1997) [Eq. (5)]. O fator de correção  $a_1=250$  foi sugerido pelos respectivos autores. Observa-se, portanto, para as três ligas investigadas que o modelo de Hunt-Lu (1996) é bastante representativo quando comparado com os dados experimentais, ou seja, nota-se uma boa aproximação entre os resultados experimentais e os valores teóricos, mínimos ou máximos, obtidos a partir deste modelo. Por outro lado, o modelo de Bouchard-Kirkaldy (1997) gera valores superestimados em relação aos dados experimentais. Os valores de  $G_L$  experimentais utilizados no cálculo dos modelos teóricos foram obtidos a partir da relação de  $\dot{T}=G_L \cdot V_L$  (Garcia e Prates, 1978 e Rocha et al, 2002 e 2003).

O uso da água de refrigeração impõe elevados valores de velocidades e taxas de resfriamento próximo à base refrigerada, diminuindo ao longo do processo de solidificação devido ao aumento da resistência térmica pela formação gradativa de metal solidificado. Essa influência, para todas as composições analisadas, se translada para as observações realizadas para os espaçamentos dendríticos primários. A Figura (3), por exemplo, apresenta para a liga Al-5%Cu, os valores experimentais dos espaçamentos dendríticos primários como função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus. Observa-se, portanto, através das Figs. (2) e (3) que os espaçamentos diminuem com o aumento de  $\dot{T}$  e  $V_L$ , respectivamente. A Figura (3) apresenta algumas microestruturas resultantes para a liga Al-5%Cu, donde se confirma a observação anterior pelo fato da mesma mostrar estruturas dendríticas refinadas para maiores velocidades de solidificação, próxima a base refrigerada.

As expressões analíticas descritas na literatura (Garcia e Prates, 1978 e Garcia, 2001) que definem o gradiente térmico ( $G_L$ ) e a velocidade de crescimento da isoterma liquidus ( $V_L$ ) mostram que para solidificação em regime transitório,  $G_L$  se correlaciona com  $V_L$  através de uma expressão da forma  $G_L=\text{constante}(V_L)$ , e consequentemente  $\dot{T}=\text{constante}(V_L)^2$ . Neste caso, um expoente de  $-1,1$  encontrado, para todas as ligas analisadas, caracteriza a lei experimental dos espaçamentos dendríticos primários com  $V_L$ . As expressões analíticas em questão foram validadas em artigos recentes para vários sistemas de ligas: Sn-Pb (Rocha, 2002 e 2003) e Al-Cu (Quaresma et al, 2000 e Rocha et al, 2003) e Zn-Al (Osório e Garcia, 2002). O expoente  $-0,55$  obtido para a lei de crescimento de  $\lambda_1$  com  $\dot{T}$ , apresenta-se coerente com o valor  $-0,50$  encontrado por Bouchard-Kirkaldy (1997).

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro provido pela FAPESP e CNPQ, a SECTAM-PA e ao CEFET-PA, pelo financiamento da bolsa e total liberação para realização do Doutordo na UNICAMP, respectivamente.

#### 5. CONCLUSÃO

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

1. Sob condições de fluxo de calor transitório os espaçamentos dendríticos primários diminuem com o aumento da velocidade de crescimento da isoterma liquidus e com o aumento da taxa de resfriamento;
2. Para as ligas Al-Cu investigadas o espaçamento dendrítico primário não varia de forma significativa com o teor de soluto;

Para condições de solidificação em regime transitório os modelos de Hunt-Lu e Bouchard-Kirkaldy geraram e não geraram, respectivamente, uma boa concordância com os dados experimentais obtidos para as três ligas do sistema Al-Cu examinadas neste trabalho.

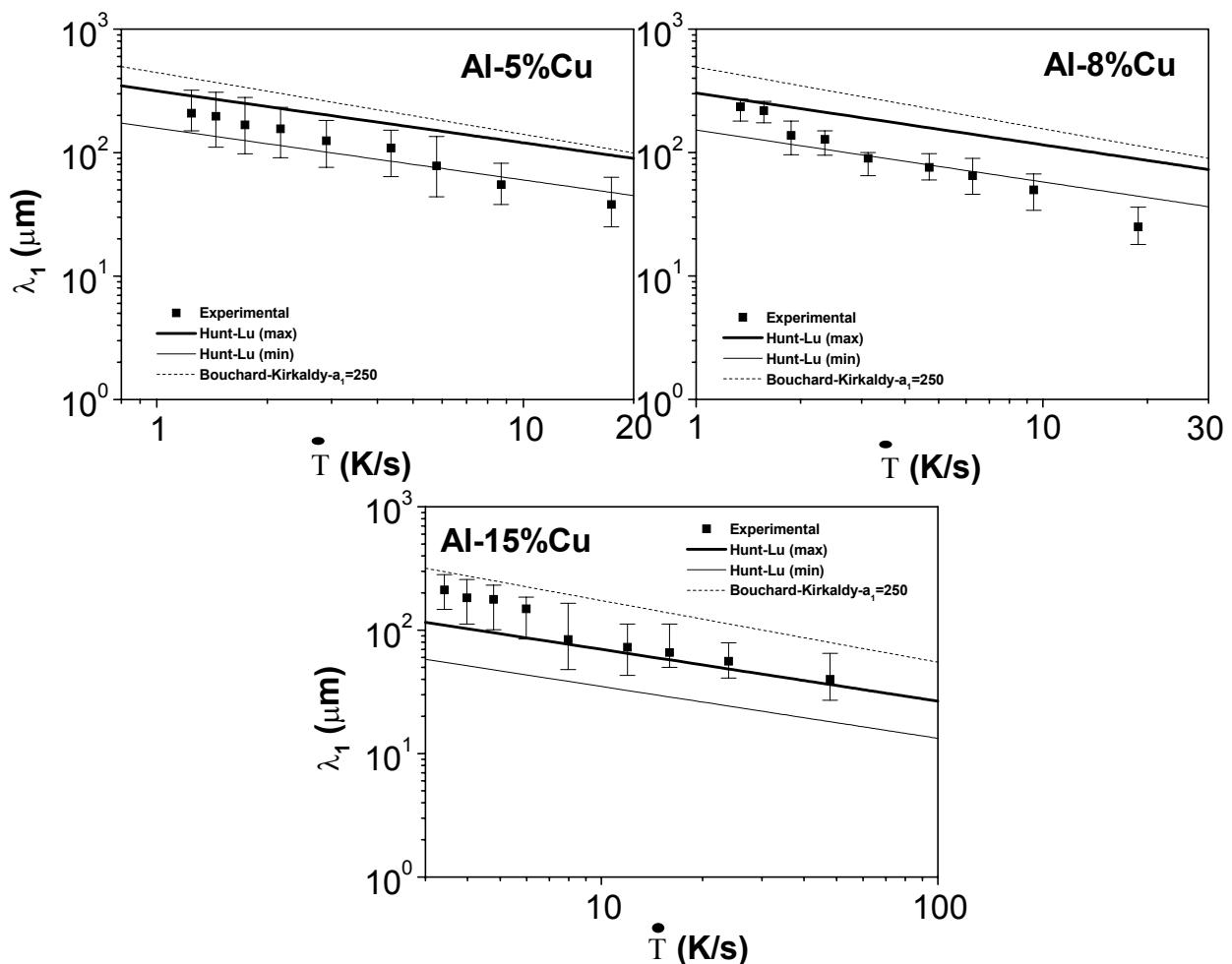


Figura 2. Comparação entre os valores experimentais e teóricos dos espaçamentos dendríticos primários em função da taxa de resfriamento .

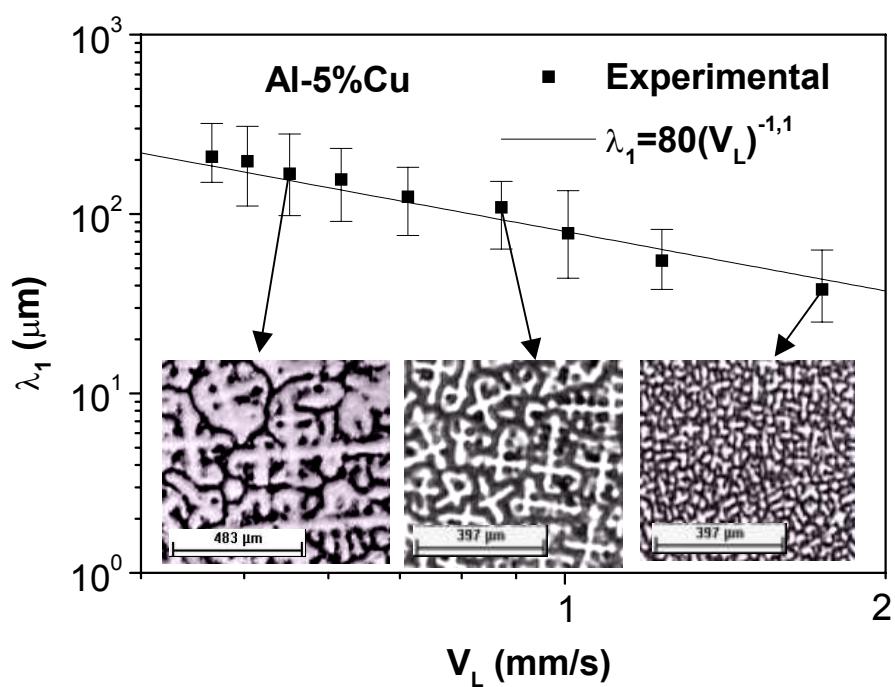


Figura 3. Representação do efeito da velocidade da isoterma liquidus nos espaçamentos dendríticos primários.

## REFERÊNCIAS

- Garcia, A., 2001, Solidificação: “Fundamentos e Aplicação”, Ed. Unicamp, São Paulo, Brazil, 201-242.
- Gündüz M.; Çardili, E. Directional solidification of aluminium-copper alloys, Materials Science and Engineering A, v. 327, 2002, pp. 167-185.
- Hunt, J. D., 1979, International Conference on Solidification and Casting of Metals, London, Metals Society, pp. 3-9.
- Kurz, W. and Fisher, D. J., 1992, “Fundamentals of Solidification”, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 85-87.
- Hunt, J. D. e Lu, S. Z., 1996, “Numerical Modeling of Cellular Array Growth: Spacing and Structure Predictions”, Metallurgical and Materials Transactions, Numerical A, Vol. 27A, pp. 611-623.
- Trivedi, R., 1984, “Interdentric Spacing”, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 15A, n. 6, pp. 977-982.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2002, “Theoretical-Experimental Analysis of the Cellular/Dendritic Transition During Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys”, Materials Research, pp.391-397.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, “Cellular/Dendritic Transition During Unsteady-State Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys”, Materials Science Engineering, A, Vol. 347, pp.59-69.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, “Cellular Spacings in Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys”, Materials Science Engineering, A, Vol. 361, pp.111-118.
- Rocha O. F. L; Siqueira, C. A.; Garcia, A., 2003, “Heat Flow Parameters Affecting Dendrite Apacings During Unsteady State Solidification of Sn-Pb and Al-Cu Alloys”, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 34, pp.995-1005.
- Bouchard D.; Kirkaldy, J. S., 1997, “Predictions of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys”, Metallurgical and Materials
- Quaresma, J. M. V.; Santos, C. A.; Garcia, A., 2000, “Correlation Between Unsteady-State Solidification Conditions”, Dendrite Spacings and Mechanical Properties, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 31, pp.3167-3178.
- Osório W. R.; Garcia A., 2002, “Modeling Dendritic Structure and Mechanical Properties of Zn-Al Alloys as a Function of Solidification Condition”, Materials Science Engineering A, Vol. 325, pp.103-111.
- Garcia, A; Prates M.; 1978, “Mathematical Model for the Unidirectional Solidification of Metals I: Cooled Molds, Metallurgical Transactions, Vol. 98, pp.449-453.
- Siqueira, C. A; Cheung N.; Garcia, A., 2002, “Solidification Thermal Parameters Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition”, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 33, pp. 2107-2118.
- Sharp R. M. and Hellawell A., 1969, “The Microscopy and Composition of Quenched Solid-Liquid Interfaces: Journal of Crystal Growth, Vol. 5, pp. 155-161.
- Okamoto, T. and Kishitake, K., 1975, “Dendritic Structure in Unidirectionally Solidified Aluminum, Tin, and Zinc Base Binary Alloys”, Journal of Crystal Growth, Vol. 29, pp.137-146.

# INFLUENCE OF SOLIDIFICATION THERMAL PARAMETERS ON DENDRITIC SPACINGS OF Al-Cu ALLOYS

12007

In the great majority of real solidification conditions, like in foundry processes and continuous casting, the morphology of the structure is typically dendritic and it is essentially the same along the casting, except for the size of dendritic spacings. The high technological importance of the processes has generated a number of research works correlating the thermal parameters of the processes with the corresponding parameters, because, it is well known that smaller spacings provide casting with better mechanical properties. Most of the works found in the literature have involved solidification in steady-state heat flow conditions. This work has as main objective to investigate the influence of solidification thermal parameters, such as growth rate ( $V_L$ ) and cooling rate  $\dot{T}$ , on primary dendritic spacings for unsteady-state solidification. A vertical water-cooled unidirectional solidification system and three Al-Cu alloys were used (Al-5%; 8% and 15%Cu). The experimental results are compared with theoretical predictions of dendritic growth models existing in the literature for unsteady-state growth.

Keywords: Unsteady-State Unidirectional Solidification, Dendritic Spacing, Dendritic Growth Models.