

ANÁLISES TEÓRICA E EXPERIMENTAL DOS ESPAÇAMENTOS DENDRÍTICOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DE LIGAS Al-Si ¹

Peres, M.D.²
Siqueira, C.A.³
Garcia, A.⁴

Resumo

Os espaçamentos dendríticos primários e secundários (λ_1 e λ_2) representam importantes parâmetros microestruturais resultantes do processo de solidificação de peças fundidas, visto que, esses parâmetros influenciam diretamente as propriedades mecânicas desses materiais. Algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no sentido de identificar e quantificar os fatores que afetam a formação de estruturas dendríticas na solidificação em condições transitórias de fluxo de calor. Neste trabalho, os efeitos da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus (V_L), taxa de resfriamento (T) e do teor de soluto (C_0) nos espaçamentos dendríticos primários e secundários foram investigados em ligas hipoeutéticas do sistema Al-Si sob condições de solidificação unidirecional. Para tanto, foi utilizado um sistema de solidificação unidirecional vertical ascendente, refrigerado a água, e as seguintes ligas do sistema Al-Si: Al-3%Si; Al-5%Si; Al-7%Si e Al-9%Si. Esses parâmetros estruturais, determinados experimentalmente, foram comparados com os principais modelos teóricos de crescimento dendrítico propostos na literatura.

Palavras-chave: Microestrutura dendrítica, Solidificação unidirecional, ligas hipoeutéticas Al-Si.

¹ Contribuição técnica a ser apresentada no XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória, 16-18 maio de 2005.

² Prof. Dr. Department of Materials Construction Federal university of Pará, Belém-Pará;

³ Prof. Dr. Department of Mechanics Engineering Federal university of Pará, Belém-Pará;

⁴ Prof. Dr. Department of Materials Engineering State University of Campinas-UNICAMP, Campinas, SP. Brazil

1 INTRODUÇÃO

Espaçamentos dendríticos e celulares são importantes parâmetros microestruturais resultante do processo de solidificação, pois exerce significativa influencia nas propriedades produtos fundidos. Eles afetam a segregação microscópica existente entre as ramificações celulares e dendríticas, tendo uma influencia nas propriedades mecânicas.⁽¹⁾

Dentre os modelos teóricos existentes na literatura somente aqueles propostos por Hunt e Lu⁽²⁾ para espaçamentos dendríticos primários e Bouchard-Kirkaldy⁽³⁾ para espaçamentos primários e secundários assumem solidificação em condições de fluxo de calor não estacionário. Hunt,⁽⁴⁾ Kurz e Fisher⁽⁵⁾ e Trivedi⁽⁶⁾ tem formulas derivadas para espaçamentos dendríticos primários em condições estacionário. Os modelos teóricos para determinação dos espaçamentos dendríticos propostos por esses autores são mostrados a seguir:

$$\lambda_1 = 2.83[\Gamma m_L C_0(1 - k_0)D]^{1/4} G_L^{-1/2} V_L^{-1/4} \quad (\text{Hunt, celular/ dendrítico}) \quad (1)$$

$$\lambda_1 = 4.3 \left(\frac{\Gamma \Delta T D}{k_0} \right)^{1/4} G_L^{-1/2} V_L^{-1/4} \quad (\text{Kurz and Fisher, celular/dendrítico}) \quad (2)$$

$$\lambda_1 = 2.83[L\Gamma m_L C_0(1 - k_0)D]^{1/4} G_L^{-1/2} V_L^{-1/4} \quad (\text{Trivedi, dendrítico}) \quad (3)$$

$$\lambda'_1 = 0.07798 V'^{(a-0.75)} (V' - G')^{0.75} G'^{-0.6028} \quad (\text{Hunt-Lu, dendrítico}) \quad (4)$$

onde,

$$a = -1.131 - 0.1555 \log_{10}(G') - 0.007589 (\log_{10}(G'))^2 \quad (5)$$

$$\lambda'_1 = \frac{\lambda_1 \Delta T}{\Gamma k_0}, \quad G' = \frac{G_L \Gamma k_0}{\Delta T^2} \quad \text{and} \quad V' = \frac{V_L \Gamma k_0}{D \Delta T} \quad (6)$$

$$\lambda_1 = a_1 \left(\frac{16 C_0^{1/2} G_0 \varepsilon \Gamma D}{(1 - k_0) m_L G_L V_L} \right)^{1/2} \quad (\text{Bouchard-Kirkaldy, espaçamento primário}) \quad (7)$$

onde λ_1 é o espaçamento dendrítico primário, Γ coeficiente de Gibbs-Thomson, m_L inclinação da linha liquius, k_0 coeficiente de partição do soluto, C_0 composição da liga, D difusividade do soluto líquido, ΔT diferença entre as temperaturas liquidus e solidus, V_L velocidade de crescimento na ponta da dendrita, G_L gradiente de temperatura a frente da isoterma liquius, G_0 parâmetro característico $\approx 600 \times 6 \text{ K cm}^{-1}$ e a_1 é o fator de calibração do espaçamento dendrítico primário. Assim o espaçamento proposto por Hunt e Lu precisa ser multiplicado por 2-4 para comparação com os espaçamentos medidos experimentalmente.

O modelo de Trivedi é um resultado da modificação do modelo de Hunt's, onde L é uma constante que depende de perturbações harmônicas. De acordo com Trivedi, para crescimento dendrítico, L é igual a 28.

Para espaçamentos dendríticos secundários, Bouchard-Kirkaldy derivaram a expressão, que é muito similar a de Mullins e Sekeda, que é dada por:

$$\lambda_2 = 2\pi a_2 \left(\frac{4\Gamma}{C_0(1-k_0)^2 T_F} \left(\frac{D}{V_L} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Onde a_1 é o fator de calibração do espaçamento dendrítico secundário, que depende da composição da liga e da temperatura de fusão do solvente. O modelo de espaçamento dado por Bouchard-Kirkaldy refere-se ao crescimento dendrítico inicial. O fator de calibração é incorporado a executar-se entre os valores ao longo de outras incertezas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O sistema completo de solidificação utilizado é detalhado em artigos prévios,⁽⁷⁾ 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 ascendente.

As temperaturas no metal foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de nove (9) termopares tipo K, localizados no metal líquido nas seguintes posições em relação à interface metal/molde: 4, 8, 12, 17, 22, 38, 53, 68 e 88 mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial em um registrador de dados interfaceado com um computador, os dados de temperatura foram adquiridos automaticamente.

Finalmente, os lingotes obtidos foram submetidos à técnicas metalográficas para caracterizar e quantificar as estruturas dendríticas resultantes. Nove corpos de prova foram retirados dos mesmos e a seguinte solução ácida foi utilizada na revelação microestrutural: 0,5 % de HF em água.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Exemplos típicos das curvas de resfriamento para os nove termopares inseridos no metal durante a solidificação para a liga Al-3%Si, é mostrada na Figura 1.

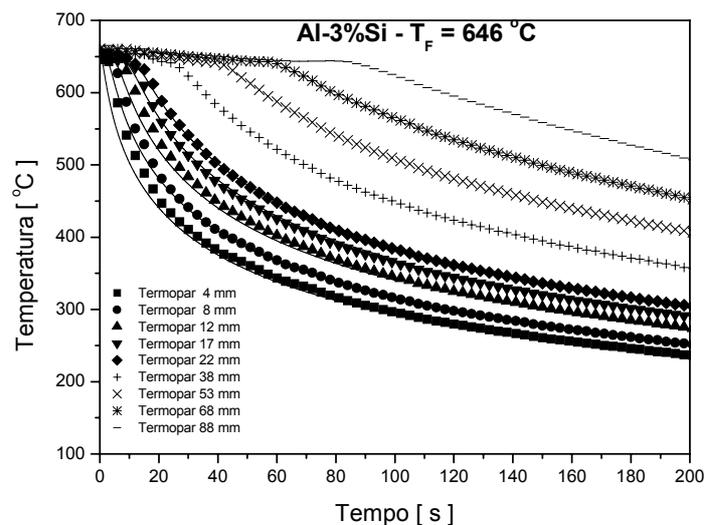


Figura 1. Curvas de resfriamento Experimental para nove termopares inseridos no metal líquido. T_F é a temperatura e vazamento do metal.

Os resultados da análise térmica experimental foram utilizados para determinar velocidade da isoterma liquidus, a taxa de resfriamento o tempo local de solidificação. As Figuras 2, mostram, respectivamente, a comparação entre as curvas obtidas experimentalmente para as velocidades da isoterma liquidus (V_L) e para a taxas de resfriamento (\dot{T}) em função da posição, onde observa-se que os valores de V_L e \dot{T} permanecem muito próximo ao longo do lingote e u a composição da liga parece não exercer influência significativa sobre esses valores.

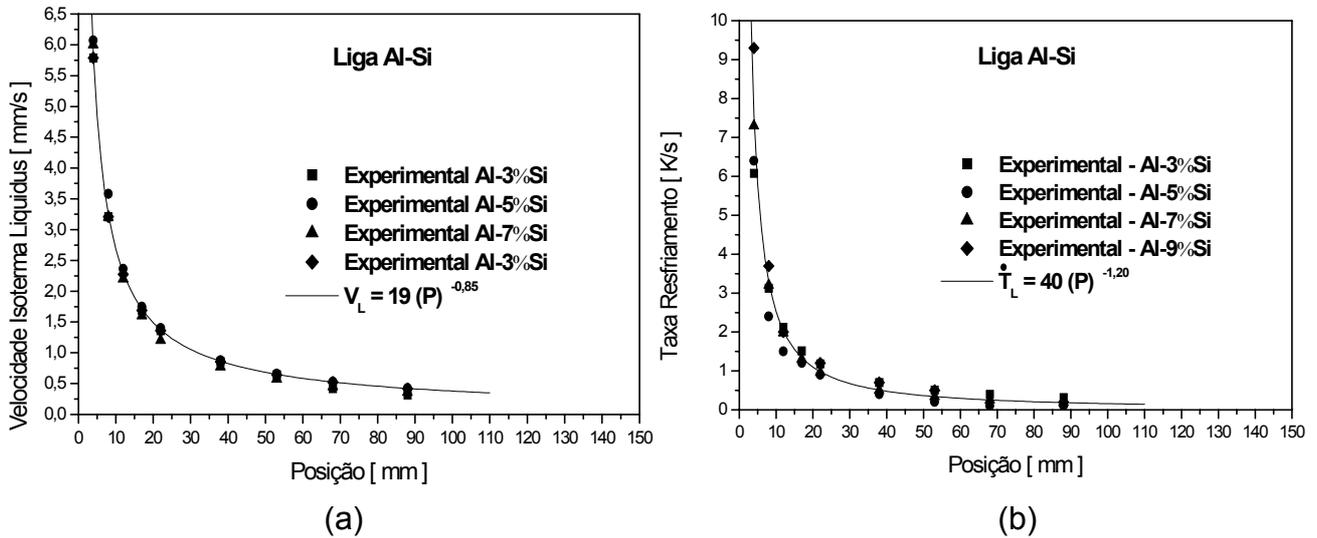


Figura 2. (a) Velocidade experimental da isoterma liquidus em função da posição e (b) Taxa de resfriamento experimental em unção da posição para as ligas: Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si.

A Figura 3, mostra a comparação entre os resultados experimentais dos espaçamentos primários com os modelos propostos na literatura para solidificação em regime não estacionário. Esses modelos são: Hunt-Lu's (HL) e Bouchard-Kirkaldy's (BK), com um fator de calibração a_1 de 250 para a liga Al-Si, como sugerido por esses autores. Os dados do modelo de HL's, somente foram checados recentemente, juntamente com os resultados experimentais da solidificação em regime não estacionário para as ligas Al-Cu e Sn-Pb, e as previsões teóricas não tem generalizado as observações experimentais. Verifica-se que em geral os resultados experimentais estão dispersos entre um valor máximo e mínimo de λ_1 previstos pelo modelo e HL's. As previsões do modelo de BK's são muito fechadas para valores acima do modelo de HL's, e são localizados geralmente levemente acima dos pontos experimentais.

Na Figura 4, é feita uma comparação entre os resultados dos espaçamentos primários experimentais em regime não estacionário e resultados teóricos em solidificação estacionaria para a liga Al-Si. Observa-se que para algumas composições examinadas, as dispersões experimentais encontram-se entre os valores calculados pelos modelos de Trivedi e Kurz-Fisher. Verifica-se que a tendência da inclinação das linhas experimentais diferem significativamente para essas caracterizações dos modelos teóricos.

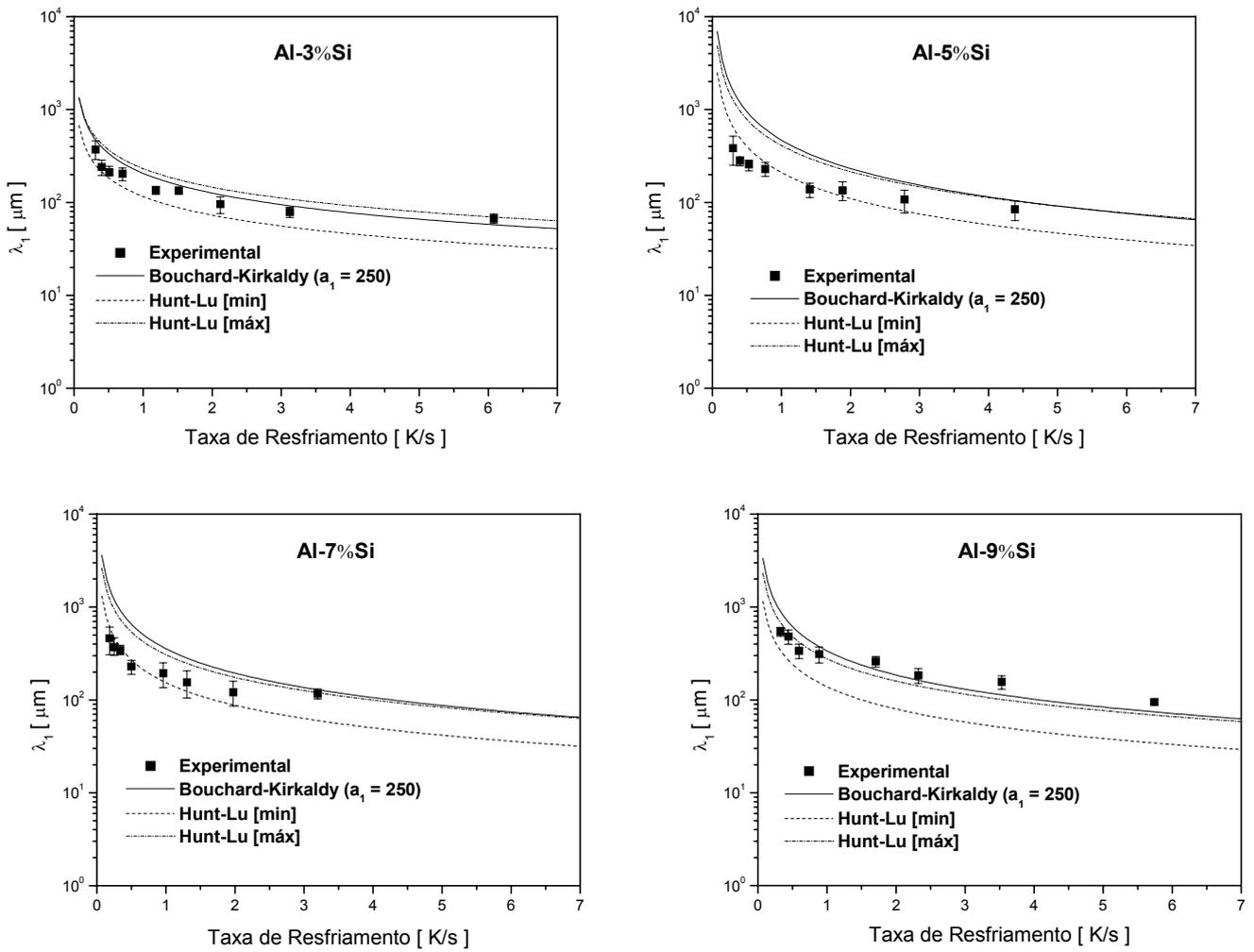


Figura 3. Comparação dos espaçamentos dendríticos primários experimental e teórico em função da taxa de resfriamento na solidificação direcional para a liga Al-Si.

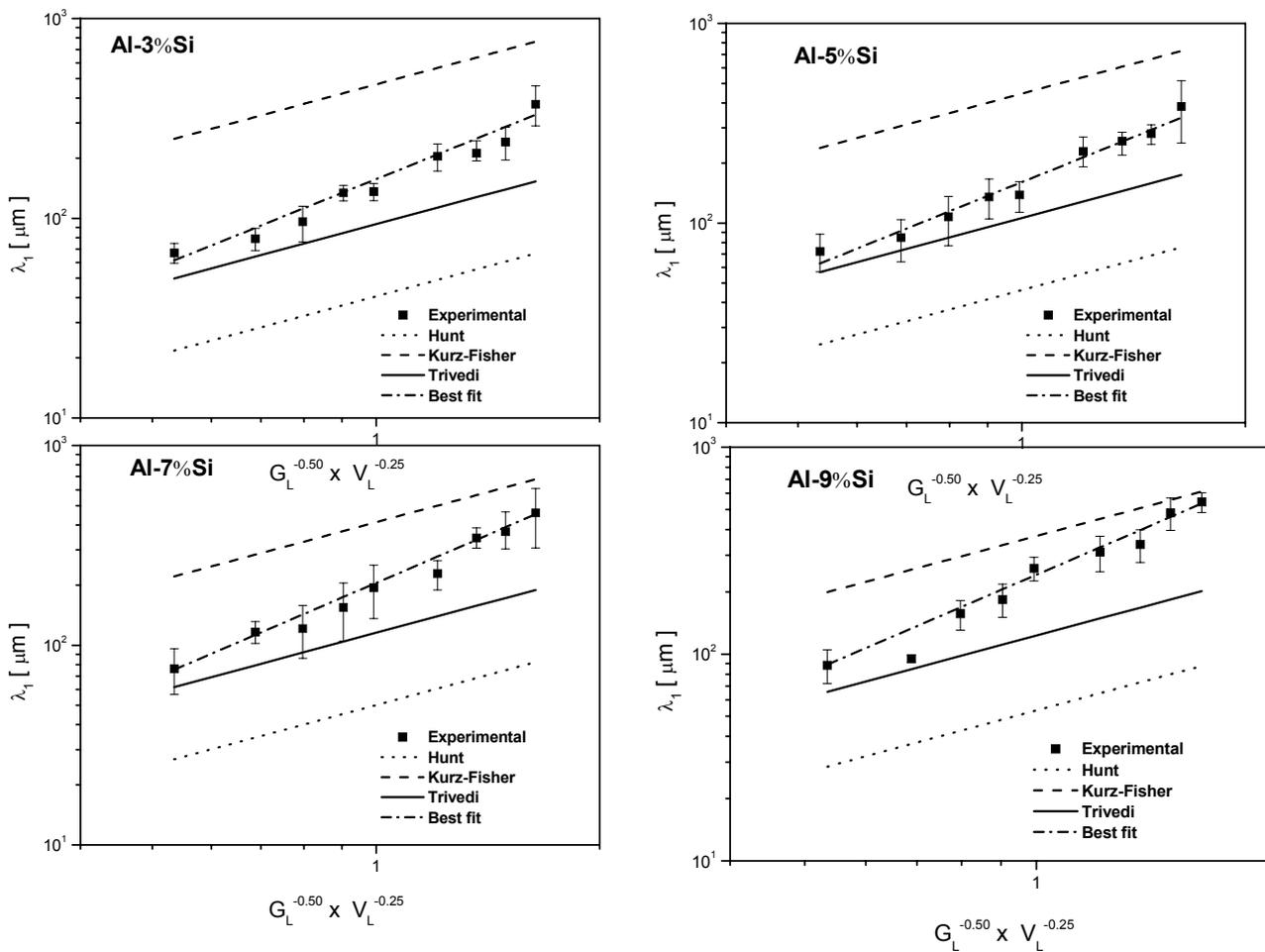


Figura 4. Comparação entre os resultados dos espaçamentos primários experimentais em regime não estacionário e resultados teóricos em solidificação estacionaria para a liga Al-Si.

A Figura 5 mostra comparação entre os presentes resultados experimentais para o espaçamento dendrítico secundário com o teórico previstos pelos modelos de BK's com um fator de calibração a_2 de 9 para a liga Al-Si, como sugerido por esses autores. Uma boa concordância pode ser observada para as ligas examinadas.

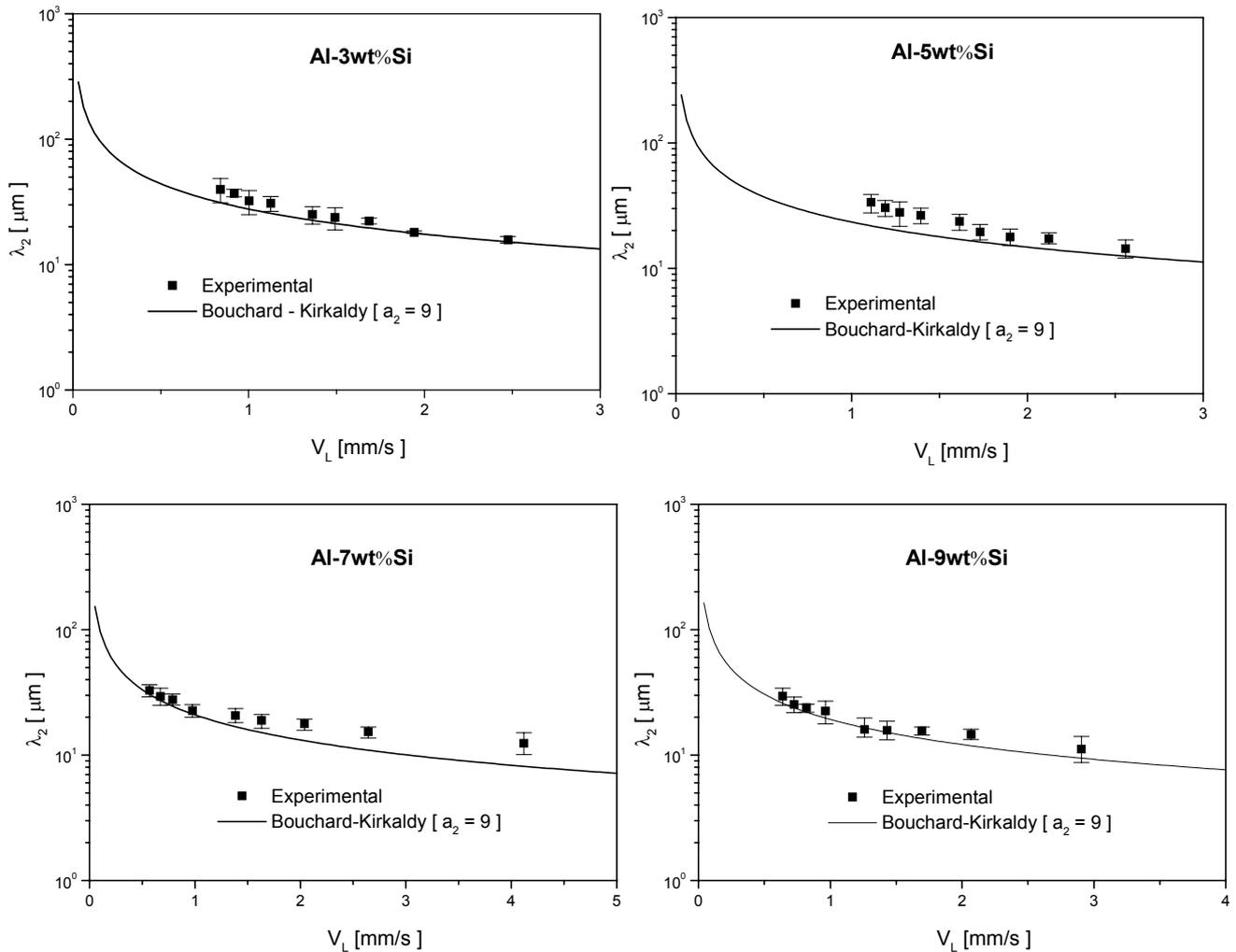


Figura 5. Comparação dos espaçamentos dendríticos secundários experimentais e teóricos em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus para as ligas Al-Si.

4 CONCLUSÃO

Em condições não estacionárias. Os espaçamentos dendríticos primário e secundário tende a decrescer com a taxa de resfriamento ou aumentar com a velocidade da isoterma liquidus para s composições estudadas. O espaçamento dendrítico primário mostrou-se independente da composição, e o secundário decresce com o aumento de soluto. Os valores do espaçamento dendrítico primário estão incluídos dentro de uma faixa mínima e máxima de valores previstos pelo modelo de Hunt-Lu, já no modelo de Bouchard-Kirkaldy esses valores são geralmente menores do que os experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP e CNPQ pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 GARCIA, A. **Solidificação**: fundamentos e aplicações. Campinas: Unicamp, 2001. p. 201-242.
- 2 HUNT, J. D.; LU, S. Z. Numerical modeling of cellular array growth: spacing and structure predictions. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27A, p. 611-623, 1996.
- 3 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.?, p.651-663, 1997.
- 4 HUNT, J. D. Cellular and primary dendrite spacings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLIDIFICATION AND CASTING OF METALS, 1979, London. Local de publicação: Metals Society, 1979. p.3-9.
- 5 KURZ, W.; FISHER, D. J. **Fundamentals of solidification**. Switzerland: Trans Tech Publications, 1992. p.85-87
- 6 TRIVEDI, R. Título do artigo. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 15A, 6, p. 977-982, 1984.
- 7 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. 168-181, Nov. 2004.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSES OF SPACINGS DENDRITICS PRIMARY AND SECONDARY DURING THE SOLIDIFICATION UNIDIRECTIONAL OF ALLOYS AL-SI

Peres, M.D
Siqueira, C.A.
Garcia, A.

Abstract

The spacings dendritics primary and secondary (λ_1 and λ_2) represent important parameters microstrutural resultant of the solidification process of molten pieces, since, these parameters influence directly the mechanical properties of these material. Some researches have been developed in the sense of identifying and to quantify the factors that affect the structures dendritics formation in the solidification in heat flow transitory terms. In this work, the effects of the displacement speed of the isothermal *liquidus* (V_L), cooling rate (T) and of the soluto content (C_0) in the spacings dendritics primary and secondary were investigated in leagues hipoeutetics of the system Al-himself under solidification unidirectional terms. For so much, it was used a solidification unidirectional system ascending vertical, refrigerated the water, and the next alloys of the system Al-Si: Al-3%Si; Al-5%Si; Al-7%Si and Al-9%Si. These structural parameters, determinated experimentally, were compared with the main theoretical models of growth dendritic proposed in the literature.

Key-words: *Microstructure dendritic, Solidification unidirectional, hipoeutetics alloys Al-Si.*