

ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESPAÇAMENTOS DENDRÍTICOS SECUNDÁRIOS DA LIGA Sn-15%Pb EM SISTEMAS DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL: "HORIZONTAL X VERTICAL"

Isabella CHAVES (1); Daniel MOUTINHO (2); José NAZARENO (3) Otávio ROCHA (4); Antonio MOREIRA (5)

(1) Graduanda de Engenharia de Materiais do CEFET-PA, Av. Almirante Barroso, 1155,
(91) 320117-42,

(1) CEFET-PA, e-mail: belaseal@hotmail.com

(2) CEFET-PA, e-mail: djcmoutinho@hotmail.com

(3) CEFET-PA, e-mail: jo.nazareno@hotmail.com

(4) CEFET-PA, e-mail: otvrocha@oi.com.br

(5) UFPA, e-mail: lmoreira@amazon.com.br

RESUMO:

Inúmeros processos industriais que consideram o fenômeno da solidificação sofrem influência dos modos de convecção térmica e constitucional. Processos similares de solidificação unidirecional servem como fonte de estudos dos efeitos produzidos pela convecção. Quando o processo é realizado na forma vertical ascendente, a influência da convecção é minimizada pois o soluto rejeitado para as regiões interdendríticas promove a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume global de metal líquido. A solidificação descendente ocorre sempre na presença de algum movimento convectivo, devido diferenças de temperatura no líquido ou por diferenças de densidade. Na solidificação unidirecional horizontal a convecção em função dos gradientes de composição no líquido sempre vai ocorrer. Como a microestrutura mais observada em fundidos é a dendrítica, numerosos estudos sobre solidificação unidirecional com objetivo de caracterizar espaçamentos dendríticos têm sido desenvolvidos, em sua grande maioria para fluxo de calor em regime estacionário. Este trabalho apresenta um estudo comparativo dos espaçamentos dendríticos secundários da liga Sn-15%Pb solidificada unidirecionalmente nas formas horizontal, vertical ascendente e vertical descendente sob condições transitórias de extração de calor. Os resultados encontrados para λ_2 em função de V_L nos sistemas verticais ascendente e descendente evidencia que as curvas experimentais e teóricas localizam-se entre os valores máximos e mínimos obtidos no sistema horizontal.

Palavras-chave: solidificação unidirecional; regime transitório de extração de calor; espaçamento dendrítico secundário; liga Sn-15%Pb.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A solidificação unidirecional tem sido bastante estudada experimentalmente no que se refere a aspectos relacionados à macroestrutura, microestrutura e análise da segregação de soluto. Estes estudos podem ser divididos em duas categorias: aqueles que tratam da solidificação sob condições estacionárias de fluxo de calor e os que abordam a solidificação em regime transitório. Na primeira situação, o gradiente de temperatura, G_L , e a velocidade de crescimento, V_L , são controlados independentemente e mantidos constantes ao longo do experimento. Por outro lado, a análise da solidificação em condições transitórias de fluxo de calor é de fundamental importância uma vez que inclui a maioria dos processos industriais que envolvem a solidificação. Nesta condição, tanto o gradiente de temperatura quanto a velocidade de crescimento variam com o tempo e com a posição da interface sólido/líquido durante o processo. Na literatura são raros, os modelos teóricos de crescimento dendrítico desenvolvidos especificamente para esta situação e, mesmo assim, estes poucos modelos ainda não foram validados por resultados experimentais ou foram comparados com resultados que representam aplicações práticas específicas.

Inúmeros processos industriais que envolvem o fenômeno da solidificação são influenciados pelos modos de convecção térmica e constitucional. Quando o processo, por exemplo, é realizado na forma vertical ascendente, em condições de gradiente de temperatura positivo no líquido, a influência da convecção é minimizada quando o soluto é rejeitado para as regiões interdendríticas proporcionando a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume global de metal líquido, o que faz com que não ocorram correntes convectivas nem por diferenças de temperatura e nem por diferenças de densidade. A solidificação descendente ocorre sempre na presença de algum movimento convectivo, já que o perfil de temperatura do líquido é crescente em direção à base do lingote (isolada termicamente), o que significa que ocorrerá pelo menos convecção por diferenças de temperatura no líquido. Naturalmente que, se o soluto rejeitado provocar um líquido interdendrítico de maior densidade do que o líquido nominal ocorrerá também movimento convectivo por diferenças de densidade. Na solidificação unidirecional horizontal a convecção em função dos gradientes de composição no líquido sempre vai ocorrer. Solutos mais densos ou menos densos podem induzir correntes por decantação ou flutuação do líquido rico em soluto rejeitado Rocha (2003).

Em face desta situação, torna-se extremamente importante a análise comparativa dos espaçamentos dendríticos secundários da liga Sn-15% Pb em sistemas de solidificação unidirecional: "horizontal x vertical" através dos resultados teórico-experimentais obtidos em função da velocidade de crescimento, em condições de regime transitório. Para tanto, é importante que esta análise leve em consideração os resultados obtidos por Rocha (2003; 2008) e Spinelli (2005).

1.2. Mecanismos de Formação da Microestrutura

A rejeição do soluto ou do solvente origina o Super-Resfriamento Constitucional (SRC) pela formação de um gradiente térmico, à frente da interface sólido/líquido, menor que o gradiente térmico do perfil de temperaturas liquidus (T_L). Dependendo do valor do SRC a instabilidade térmica origina diferentes morfologias que, por ordem crescente desse valor, são denominadas por planar, celular e dendrítica, conforme esquema apresentado na Figura 1.

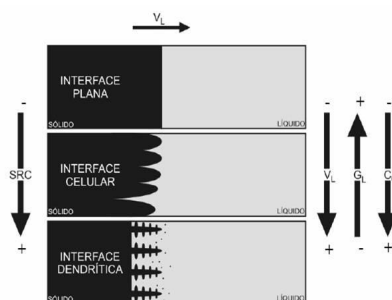


Figura 1 - Representação esquemática da atuação dos fatores de influência na formação das estruturas de solidificação: SRC (grau de super-resfriamento); G_L (gradiente térmico à frente da interface); V_L (velocidade da interface) e C_0 (concentração de soluto). Rocha (2002, 2003) e Spinelli (2005, 2006).

A grande maioria dos resultados experimentais relacionados a espaçamentos dendríticos e os correspondentes modelos teóricos de crescimento dendrítico existentes na literatura referem-se geralmente à condição de solidificação estacionária enquanto que para a solidificação transitória, típica da grande maioria dos processos industriais, são raras as abordagens teóricas e experimentais desenvolvidas. No que diz respeito à análise do efeito da convecção, são praticamente inexistentes as investigações na literatura levando em consideração a última situação, com exceção dos trabalhos recentemente desenvolvidos por Spinelli (2005, 2006) para solidificação vertical descendente.

Os modelos matemáticos para crescimento dendrítico secundário em condições de regime transitório apresentam-se bastante difundidos na literatura, mostrando que os mesmos diminuem com o aumento da taxa de resfriamento (\dot{T}) e aumentam com o tempo local de solidificação (t_{SL}), sendo este parâmetro definido como a diferença entre o tempo de passagem da isoterma solidus e o tempo de passagem da isoterma liquidus por um determinado ponto da peça que solidifica. De maneira geral, os referidos modelos representam o espaçamento dendrítico secundário por meio das Equações 1, 2 e 3 desenvolvidas, respectivamente, por Kirkwood (1985) e Bouchard-Kirkaldy (1997).

$$\lambda_2 = 5,5(Mt_{SL})^{1/3} \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde,

$$\left[M = - \frac{\Gamma D_L}{(1 - k_0)m_L(C_E - C_0)} \right] \ln \frac{C_E}{C_0} \quad [\text{Eq. 02}]$$

e Γ é o coeficiente de Gibbs-Thomson, D a difusividade de soluto no líquido, k_0 o coeficiente de partição de soluto, m_L a inclinação da linha liquidus, C_E a composição do eutético da liga, C_0 a composição nominal de soluto da liga.

$$\lambda_2 = 2\pi a_2 \left[\frac{4\sigma_{SL}}{C_0(1 - k_0)^2 L_V} \left(\frac{D_L}{V_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde, σ_{SL} é a tensão superficial da interface sólido/líquido, L_V é o calor latente na base volumétrica e a_2 é um fator de calibração que corrige as incertezas devido as simplificações consideradas na difusividade térmica e no engrossamento das ramificações secundárias o qual pode variar de 1 a 10. Para ligas do sistema Sn-Pb adota-se, segundo os autores do modelo, o fator de calibração 5.

Recentemente, Rocha (2003) e Spinelli (2005, 2006), propuseram para a liga Sn-15%Pb equações experimentais para o crescimento dos espaçamentos dendríticos secundários em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus. Ambos utilizaram um dispositivo vertical que promove a solidificação ascendente e descendente, respectivamente, sob condições transitórias de extração de calor. As equações 4 e 5 propostas pelos autores encontram-se representadas abaixo:

$$\lambda_2 = 11(V_L)^{-2/3} \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$\lambda_2 = 16,5(V_L)^{-2/3} \quad [\text{Eq. 05}]$$

Spinelli (2005, 2006) ainda propôs em seu trabalho, para a liga Sn-15%Pb, uma lei de crescimento em função do tempo local de solidificação, representada pela Equação 6, semelhante à lei teórica de Kirkwood (1985), representada pela Equação 1.

$$\lambda_2 = 7,5(t_{SL})^{1/3} \quad [\text{Eq. 06}]$$

2. METODOLOGIA

As Figuras 2 e 3 apresentam esquematicamente os dispositivos de solidificação unidirecional na forma vertical ascendente e descendente. As Figuras 4 e 5 mostram o dispositivo de solidificação na horizontal, indicando a vista lateral do mesmo, representando o efeito da convecção termosolutal na quebra dos braços dendríticos limitando desta forma o crescimento das dendritas colunares.

Os perfis de temperatura foram obtidos através de cinco termopares posicionados a 5, 10, 15, 30 e 50 mm em relação à interface metal/molde objetivando a posterior determinação da variável térmica de solidificação (V_L). Os pontos de intersecção entre a temperatura liquidus e os perfis térmicos permitiram determinar, para cada posição de termopar, um par posição x tempo. A velocidade V_L foi determinada através das derivadas da função $P = f(t)$ obtida experimentalmente.

Os espaçamentos dendríticos secundários são normalmente correlacionados com o tempo local de solidificação t_{SL} ou com a velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* V_L , considerada neste trabalho.

As Figuras 6 e 7 apresentam a técnica utilizada por Rocha (2003, 2008) e Spinelli (2005) para quantificação dos espaçamentos dendríticos secundários. Nove corpos de provas foram retirados de uma região central, ao longo do comprimento longitudinal do lingote, nas posições correspondentes a 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 mm em relação interface metal/molde. Os sistemas de processamento de imagem Neophot 32 e Leica Q-500 MC foram utilizados para caracterizar e quantificar a estrutura dendrítica.

As propriedades termofísicas utilizadas para o cálculo dos modelos matemáticos apresentados pelas Equações 2 e 3, encontram-se especificadas em trabalhos anteriores Siqueira (2002); Rocha (2003) e Spinelli, (2005).

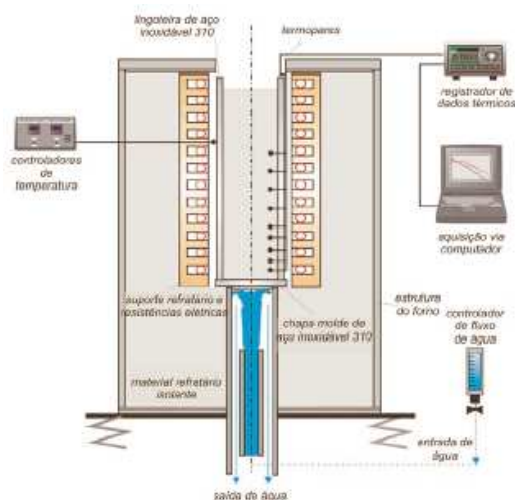


Figura 2 - Dispositivo de solidificação vertical ascendente utilizado por Rocha (2003).

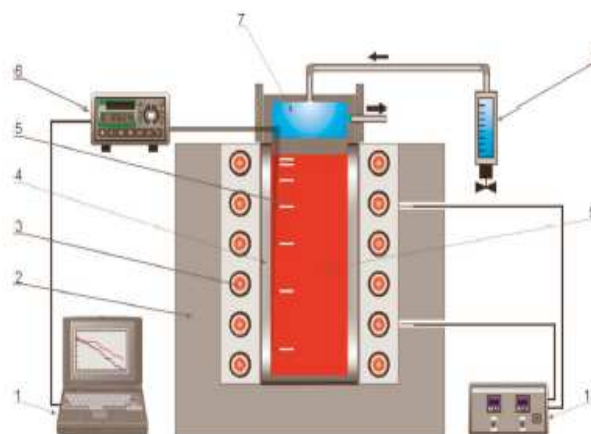


Figura 3 - Dispositivo de solidificação vertical descendente utilizado por Spinelli (2005).

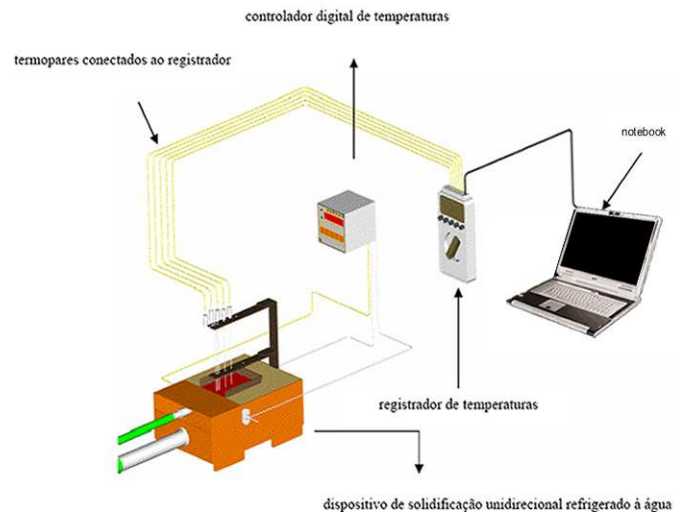


Figura 4 - Dispositivo de solidificação horizontal desenvolvido por Silva (2007) mostrando sua interface com o sistema de registro de temperaturas utilizado por Rocha (2008).

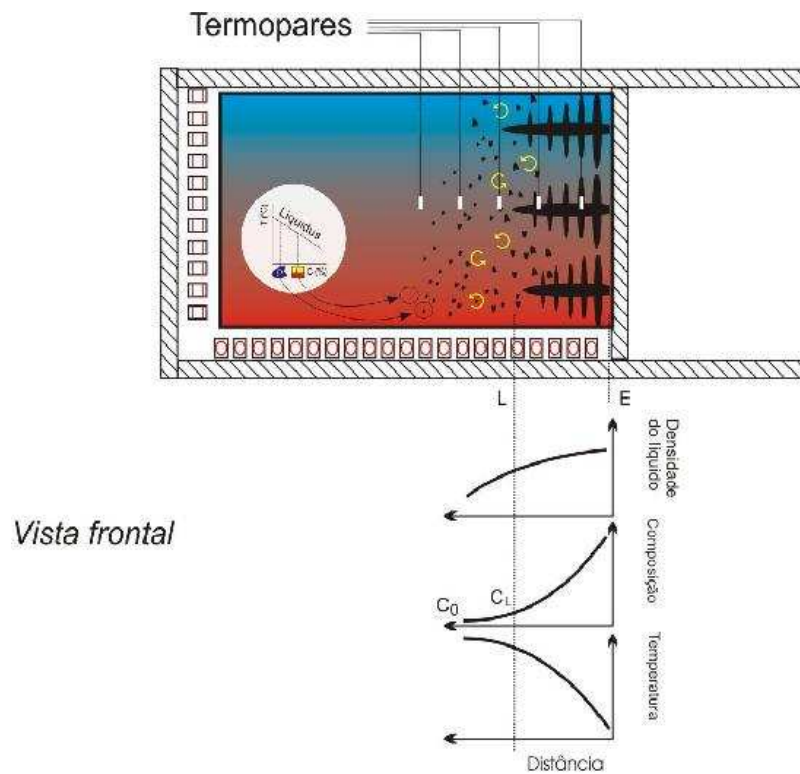


Figura 5 - Esquema da vista lateral do dispositivo de solidificação mostrando os fragmentos de partículas sólidas e o líquido. As partículas sólidas, mais densas e menos enriquecidas em soluto que o líquido, tendem a decantar e sobrevivem porque apresentam temperaturas liquidus maiores que o líquido ao seu redor (Rocha, 2008).

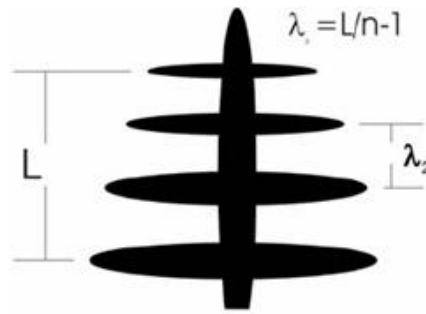


Figura 6 - Esquema representativo da técnica utilizada para quantificar os espaçamentos dendríticos secundários onde n é o número de braços secundários (Spinelli, 2005).

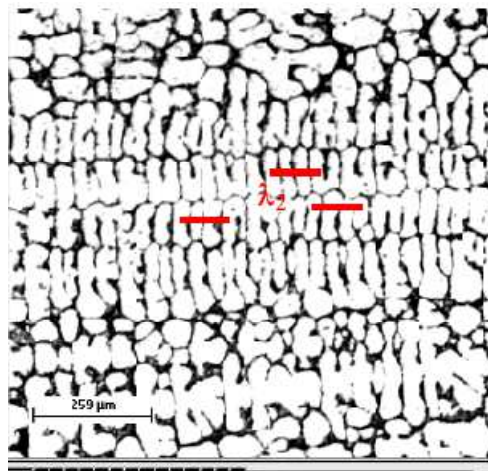


Figura 7 - medidas dos espaçamentos dendríticos secundários (Goulart, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Rocha (2003), estudando a liga Sn-15%Pb solidificada na forma unidirecional vertical ascendente sob condições transitórias de extração de calor, onde o efeito da convecção devido o soluto não é considerada, obteve os valores mostrados na Figura 8.

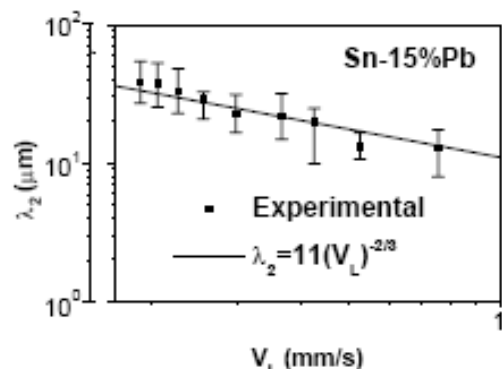


Figura 8 - Espaçamentos dendríticos secundários em função da velocidade de crescimento da isoterma liquidus para liga Sn-15%Pb obtidos por Rocha (2003).

Spinelli (2005), visando contribuir com os estudos anteriormente realizados com relação aos efeitos da convecção promovidos pela rejeição de soluto nos valores dos espaçamentos dendríticos secundários determinados experimentalmente na liga Sn-15%Pb, desenvolveu um dispositivo de solidificação unidirecional vertical descendente, também sob condições transitórias de extração de calor, conseguindo os resultados mostrados na Figura 9.

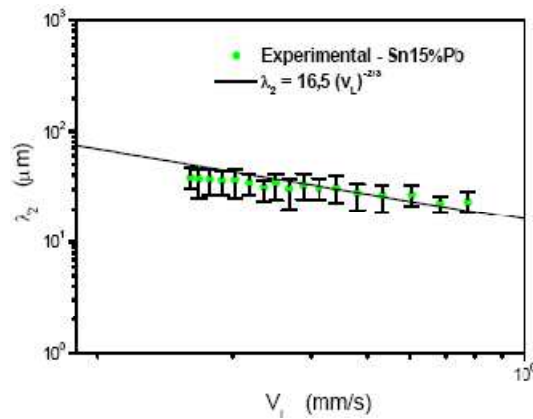


Figura 9 - Espaços dendríticos secundários em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus para a liga Sn15%Pb obtidos por Spinelli (2005) .

Por outro lado, Rocha (2008), utilizando o dispositivo de solidificação horizontal apresentado na Figura 4, onde a convecção devido o soluto é levada em consideração, determinou os valores dos espaçamentos dendríticos secundários em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus da liga Sn-15% Pb. A Figura 10 apresenta os resultados alcançados pelo respectivo autor.

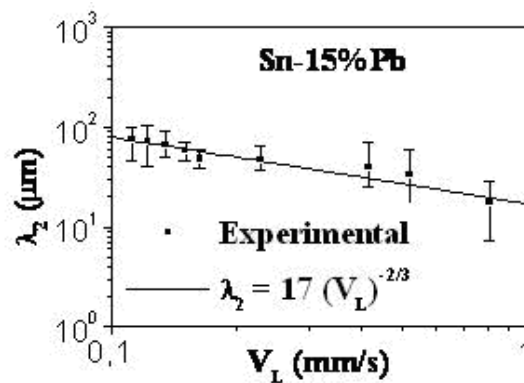


Figura 10 - Espaços dendríticos secundários em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus.

A Figura 11 ilustra a comparação entre os resultados experimentais obtidos por Rocha (2003), Spinelli (2005) e Rocha (2008) durante a solidificação direcional da liga Sn-15%Pb, respectivamente, nos sistemas vertical ascendente, vertical descendente e horizontal com os valores teóricos dos espaçamentos dendríticos secundários obtidos por modelos propostos na literatura por Bouchard et al (1997), para $a_2 = 5$ sugerido pelos autores para o sistema binário Sn-Pb. Observa-se uma boa aproximação entre os resultados teóricos e experimentais para os modelos em questão.

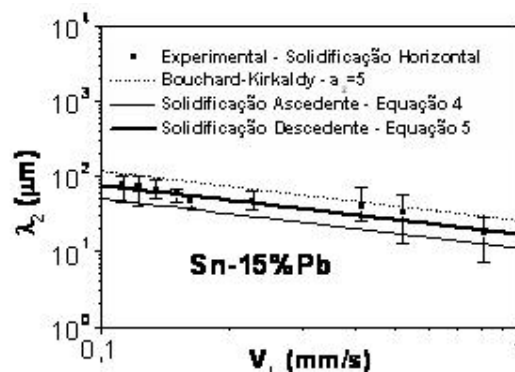


Figura 11 - Comparação experimental e teórica em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus.

4. CONCLUSÕES

4.1. O estudo do crescimento dos espaçamentos dendríticos secundários da liga Sn-15%Pb solidificada unidirecionalmente sob condições transitórias de extração de calor em um sistema horizontal refrigerado à água, apresentou boa concordância com as previsões de modelos matemáticos e métodos experimentais propostos na literatura.

4.2. Conforme observado por meio da Figura 10, os valores experimentais dos espaçamentos dendríticos secundários em função da velocidade de deslocamento da isoterma liquidus, diminuem com o aumento de V_L . O expoente correspondente a $-2/3$, caracteriza a lei de crescimento dendrítico secundário com a velocidade de deslocamento da isoterma liquidus. Esse resultado está em perfeita conformidade com o modelo teórico de Bouchard et al (1997), equação 3, bem como com os resultados experimentais obtidos por Rocha (2003) e Spinelli (2005), respectivamente, equações 4 e 5.

4.3. O crescimento dos espaçamentos dendríticos secundários da liga Sn-15%Pb em função da V_L podem ser representados por meio da mesma lei experimental tanto para a solidificação vertical ascendente quanto para a solidificação vertical descendente. Os efeitos convectivos, promovidos pelo gradiente térmico e pelo gradiente de concentração de soluto no líquido, durante a solidificação horizontal comparados com aqueles da solidificação vertical não apresentaram influência significativa na magnitude dos espaçamentos dendríticos secundários.

4.4. Finalmente, a comparação entre os casos de solidificação unidirecional horizontal, vertical ascendente e vertical descendente, com modelos teóricos para o fluxo de calor em regime transitório, evidencia que as curvas experimentais e teóricas de tendência de λ_2 em função da V_L , dos autores Rocha (2003), Spinelli (2005), Bouchard (1997) e Kirkwood (1985), localizam-se entre os valores experimentais máximos e mínimos obtidos por Rocha (2008) através da solidificação horizontal. Portanto, uma única lei para a liga investigada pode ser sugerida para ambos os sentidos de solidificação.

REFERÊNCIAS

Bouchard, D. and 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, 651 p, 1997.

Garcia, A., **“Solidificação: Fundamentos e Aplicações”**, Ed. da Unicamp, São Paulo, 2001.

Goulart, Pedro Roberto; **Variáveis Térmicas de Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Hipoeutéticas Al-Si**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 2005.

Kirkwood, D. H., **A Simple model for dendrite arm coarsening during solidification**, Materials Science and Engineering, Vol. 73, 1985.

Rocha, O. F. L.; Siqueira, C. A. and Garcia, A., **“Theoretical-experimental analysis of the cellular/dendritic transition during unidirectional solidification”**, Materials Research, Vol. 5, No 3, pp. 391-397, 2002.

Rocha, O. L.; Siqueira C. A. and Garcia, A., **Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys**, Materials Science Engineering A, Vol. 347, No 1-2, pp. 59-69, 2003.

Rocha, O. L.; Siqueira C. A. and Garcia, A., **Heat flow parameters affecting dendrite spacing during unsteady state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys**, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 34A, pp. 995-1006, 2003.

Silva, J. N. S., **Projeto, construção e aferição de um dispositivo de solidificação unidirecional refrigerado à água**, Universidade Federal do Pará, Dissertação de Mestrado, 2007.

Spinelli, E., **Influência da Convecção no Líquido nas Variáveis Térmicas e Estruturais na Solidificação Descendente de Ligas Sn-Pb**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 2005.

Spinelli, E., **The Influence of Melt Convection on Dendritic Spacing of Downward Unsteady-State Directionally Solidified Sn-Pb Alloys**, Materials Research, Vol. 9, No 1, pp. 51-57, 2006.

Siqueira, C. A., **Influência de Parâmetros Térmicos de Solidificação na Transição Colunar/equiaxial**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 2003.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho somente foi possível devido o apoio financeiro fornecido pelo CEFET-PA e a parceria de cooperação técnico-científica entre o CEFET-PA, UFPA e UNICAMP.