

# INFLUÊNCIA DA CONVECÇÃO NA TRANSIÇÃO COLUNAR/EQUIAXIAL E NA MICROESTRUTURA PARA LIGAS DO SISTEMA Sn-Pb SOLIDIFICADAS DIRECIONALMENTE E NA DESCENDENTE

José Eduardo Spinelli <sup>1</sup>  
Ivaldo Leão Ferreira <sup>2</sup>  
Amauri Garcia <sup>3</sup>

**Resumo:** Um dispositivo de solidificação unidirecional vertical descendente foi desenvolvido. Uma lingoteira de Aço Inoxidável 310 e uma Câmara de Refrigeração de aço inoxidável 310 com espessura útil de 3,0 mm foram utilizadas no processo de solidificação. Os experimentos foram conduzidos para ligas hipoeutéticas do sistema Sn-Pb. As temperaturas no lingote foram registradas através da colocação de termopares tipo J no seu interior. Por fim, os lingotes foram seccionados para que fossem aplicados os procedimentos metalográficos e de microscopia óptica. Os objetivos do trabalho são: *i.* Determinar o coeficiente de transferência de calor metal/molde e os parâmetros térmicos envolvidos; *ii.* Investigar como a transição colunar/equiaxial e os espaçamentos dendríticos são afetados pela convecção presente no líquido; e, *iii.* Analisar comparativamente os resultados obtidos para ligas do sistema Sn-Pb nos sentidos descendente e ascendente de solidificação. Verificou-se que o critério proposto recentemente para a transição colunar/equiaxial baseado numa taxa de resfriamento crítica é aplicável também para este sentido de solidificação. Esta transição é antecipada devido à ocorrência de fragmentos dendríticos formadores dos grãos equiaxiais, causados pelas correntes convectivas. Por sua vez, os espaçamentos dendríticos primários experimentais diminuem no caso da solidificação vertical descendente se comparados com espaçamentos obtidos na solidificação ascendente em condições idênticas de taxa de resfriamento.

**Palavras-chave:** TRANSIÇÃO COLUNAR/EQUIAXIAL, Sn-Pb, CONVECÇÃO.

**Endereço:** Departamento de Engenharia de Materiais, DEMA/GPS, UNICAMP, C. P. 6122, 13083-970, Campinas/SP/Brasil.

\* Trabalho a ser submetido para o V SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO DA ABM, 17 a 19 de maio de 2004 - Salvador - BA.

1 - Doutorando GPS/DEMA

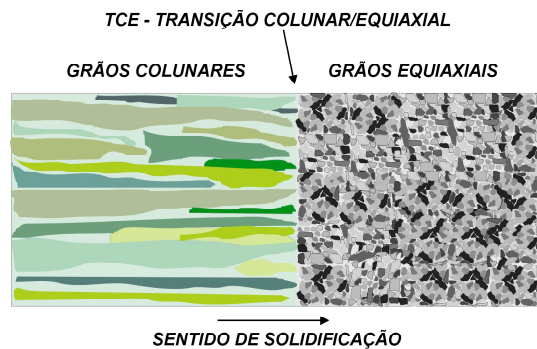
2 - Doutorando GPS/DEMA

3 - Professor Titular e Coordenador do GPS.

## 1. Introdução

A macroestrutura de solidificação de peças fundidas ou lingotes pode apresentar-se na forma de grãos completamente colunares ou totalmente equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Uma forma estrutural mais complexa é composta pelas duas zonas estruturais. Essa forma mista de solidificação ocorre quando os grãos equiaxiais encontram condições de nuclear e crescer no líquido, à frente da fronteira colunar de crescimento, provocando a transição colunar/equiaxial (TCE), conforme ilustrado na **Figura 1** [Chalmers, 1964; Kurz, 1992].

A previsão dessa transição é de grande interesse na programação das propriedades mecânicas de produtos fundidos. Peças com estrutura completamente equiaxiais são mais apropriadas para inúmeras aplicações, uma vez que apresentam isotropia de propriedades físicas e mecânicas. Por outro lado, a anisotropia das propriedades das estruturas colunares permite aplicações tecnológicas importantes, como por exemplo, no crescimento de lâminas de turbinas de motores a jato, onde o crescimento colunar deve coincidir com a direção de máxima sollicitação mecânica durante o funcionamento das turbinas. A transição colunar/equiaxial tem sido alvo de diferentes abordagens de pesquisa, e a literatura mostra indicações de que a competição entre esses dois tipos de crescimento é fundamentalmente governada pelas condições do sistema metal/molde, tais como: composição da liga, densidade de núcleos no volume de metal líquido, superaquecimento do metal líquido, difusividade de calor do material de molde, aquecimento do molde, coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde, e convecção no metal líquido [Garcia, 2001; Rappaz, 1996; Wang, 1994; Suri, 1991]. Pode-se afirmar, de forma qualitativa, que a TCE é antecipada à medida que a concentração de soluto da liga cresce, que a temperatura de vazamento é diminuída e que as correntes de convecção no metal líquido sejam mais intensas. Entretanto, a quantificação dessa transição exige uma investigação mais aprofundada dos mecanismos físicos envolvidos. Em peças de tamanho industrial, o perfil de temperaturas no metal durante a solidificação afeta de forma significativa os tamanhos das zonas colunar e equiaxial, já que o crescimento colunar é condicionado pelo movimento das isoterms *liquidus* e *solidus*, e o crescimento equiaxial à frente da fronteira colunar altera o perfil térmico no líquido em função da liberação de calor latente. Esses fenômenos agindo simultaneamente tornam a modelagem matemática da transição colunar/equiaxial uma tarefa complexa. Para a análise quantitativa dessa transição, a literatura apresenta o modelo de Hunt e Flood [Garcia, 2001], no qual expressões analíticas apresentadas em função de gradientes térmicos, velocidade de solidificação, composição química e parâmetros de nucleação permitem definir uma região de transição. Uma análise dos trabalhos mais significativos apresentados na literatura sobre o assunto mostra a necessidade da realização de trabalhos experimentais mais controlados que, conjugados a uma análise teórica pertinente, possam contribuir para uma análise quantitativa mais confiável da TCE. Muitos desses estudos desenvolveram procedimentos numéricos para determinar um critério de previsão da transição



**Figura 1.** Transição colunar/equiaxial em ligas metálicas.

colunar/equiaxial, sendo geralmente baseados nas velocidades da isoterma liquidus ( $V_L$ ), e nos gradientes térmicos ( $G_L$ ) à frente da fronteira colunar.

**Siqueira [2002]** apresenta uma investigação para um sistema de solidificação vertical ascendente das ligas Al-Cu e Sn-Pb. Esse estudo propõe um critério baseado em taxas de resfriamento críticas de 0,2 °C/s para o sistema Al-Cu e de 0,014 °C/s para o sistema Sn-Pb, sendo que o crescimento colunar prevalece para taxas maiores que esses valores críticos.

**Rocha [2003]** estudou recentemente o crescimento celular e dendrítico primário sobre condições transitórias de solidificação, tendo mostrado que muitos modelos teóricos existentes na literatura não representam as observações experimentais realizadas.

Poucos estudos têm analisado os efeitos da convecção interdendrítica, bem como a influência da direção de crescimento nos espaçamentos dendríticos. Para investigar os efeitos do fluxo de soluto e da direção de crescimento nos espaçamentos dendríticos primários, **Burden [1976]** conduziu experimentos para um sistema de cloreto de amônia (solvente) e água (soluto). No caso do crescimento descendente, o líquido, mais leve, rico em água tende a fluir ascendentemente e preencher os espaços interdendríticos. Já no caso de crescimento ascendente, o líquido interdendrítico tende a fluir para a região líquida da amostra. Assim, os espaçamentos primários para o crescimento descendente apresentaram valores de uma ordem de magnitude maior que aqueles observados no caso do crescimento ascendente.

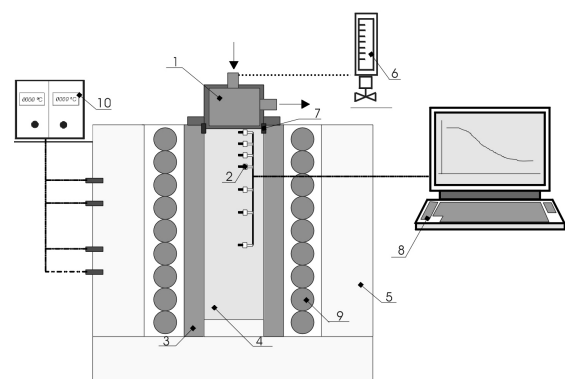
O presente estudo investiga os efeitos da convecção no líquido na transição colunar/equiaxial e nos espaçamentos dendríticos, para as particularidades próprias da solidificação vertical descendente de ligas hipoeutéticas de Sn-Pb, considerando-se um regime transitório de extração de calor. Uma abordagem teórico/experimental foi desenvolvida para a quantificação das variáveis térmicas de solidificação, tais como: coeficientes de transferência de calor metal/molde, velocidades de solidificação e taxas de resfriamento. Foram também realizadas análises comparativas entre resultados obtidos para solidificação vertical ascendente e descendente de ligas Sn5%Pb, Sn15%Pb e Sn20%Pb.

## 2. Procedimento Experimental

Foram utilizadas ligas dos sistemas Sn-Pb, câmara de refrigeração, construída em aço inoxidável 310, de formato circular com espessura útil de contato de 3,0 mm e superfície polida, a qual foi apoiada sobre um cilindro vazado de aço inoxidável 310, com 157 mm de altura. Adotou-se, para todas as ligas superaquecimento de 3% acima das temperaturas *liquidus* de cada liga.

O aparato de solidificação [**Figura 2**] foi projetado de tal modo que a extração de calor seja realizada somente pela parte superior refrigerada a água, promovendo uma solidificação direcional vertical descendente.

As ligas foram fundidas *in situ* e as resistências elétricas laterais do forno vertical tiveram sua potência controlada a fim de permitir a obtenção de níveis de



**Figura 2.** Aparato experimental: 1) Refrigerador; 2) Termopares; 3) Lingoteira; 4) Lingote; 5) Paredes de Isolamento; 6) Rotâmetro; 7) Isolamento superior; 8) Registrador; 9) Resistências Elétricas; 10) Controle de Temperatura.

superaquecimentos desejados. Para começar a solidificação, as resistências elétricas foram desligadas e ao mesmo tempo o fluxo de água foi iniciado. As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de sete termopares tipo J (bainha de inox com 1,5mm de diâmetro) localizados no metal líquido nas seguintes posições em relação à interface metal/câmara: 5mm, 8mm, 13mm, 27mm, 41mm, 62mm e 90mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial a um registrador de dados interligado com um computador, e os dados de temperaturas foram adquiridos automaticamente.

Os termopares foram inseridos lateralmente devido ao fato dessa configuração minimizar os erros de distorção da temperatura real. Portanto, quando instalados os termopares paralelos às isotermas no metal, os erros tornam-se menos agravados do que na situação de posicionamento na direção preferencial do fluxo de calor.

Os lingotes foram seccionados longitudinalmente ao meio, usinados em operação de fresamento e atacados com uma solução ácida (100ml H<sub>2</sub>O, 2ml HCl e 10g FeCl<sub>3</sub>) para revelação da macroestrutura. A posição da transição colunar/equiaxial foi medida a partir da superfície superior do lingote.

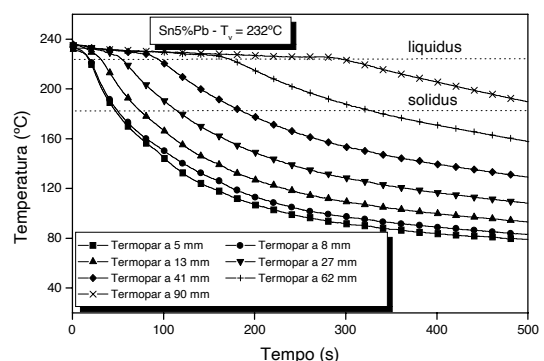
Amostras de seções longitudinais e transversais foram extraídas dos lingotes, sendo escolhidas 18 posições de análise da microestrutura ao longo do lingote. As amostras foram eletropolidas e atacadas com uma solução ácida (50ml de glicerina, 35ml de ácido acético e 15ml de HNO<sub>3</sub>, em temperatura mantida entre 38 e 40° C). Em seguida, foram realizadas análises microscópicas com auxílio do sistema de processamento de imagens Neophot 32 (Carl Zeiss, Esslingen, Germany) e Leica Quantimet 500 MC (Leica Imaging Systems Ltd, Cambridge, England), os quais foram utilizados para a quantificação dos espaçamentos dendríticos. Para medição dos espaçamentos dendríticos primários foi adotado o método dos triângulos. Ao passo que, para os espaçamentos dendríticos secundários utilizou-se a técnica das interseções entre os braços adjacentes de uma dendrita primária. Em ambos os métodos, 40 medidas de  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  foram realizadas para cada uma das posições previamente selecionadas.

### 3. Resultados e Discussão

Os registros térmicos experimentais foram obtidos para as três ligas estudadas, mostrando a evolução da solidificação para os sete termopares posicionados no interior do metal. A **Figura 3** apresenta o resultado para a liga Sn5%Pb.

Nos moldes refrigerados, o fluxo de calor total pode ser definido pela associação de uma série de resistências térmicas. A resistência térmica da interface entre o metal e a superfície da câmara de refrigeração ( $1/h_{m/m}$ ) é a maior, e a resistência térmica total ( $1/h_i$ ) é dada por:

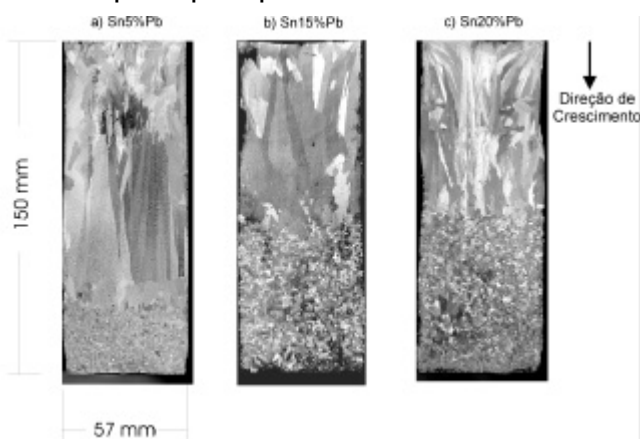
$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{h_{m/m}} + \frac{e_s}{K_s} + \frac{1}{h_w}, \quad (1)$$



**Figura 3.** Perfil térmico experimental para a liga Sn5%Pb.

sendo que  $h_i$  é o coeficiente transitório de transferência de calor entre a superfície do metal e o fluido refrigerante,  $h_{m/m}$  é o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do metal e a superfície da câmara de refrigeração posicionada no topo da lingoteira metálica,  $e_s$  é a espessura da câmara de refrigeração,  $k_s$  é a condutividade térmica do aço inoxidável e  $h_w$  é o coeficiente de transferência de calor entre a câmara de refrigeração e o fluido refrigerante.

Geralmente, maiores taxas de extração de calor pelo molde favorecem o desenvolvimento da região colunar, porque os gradientes térmicos resultantes impedem o desenvolvimento de uma zona equiaxial à frente dos grãos colunares, o que impossibilita o crescimento equiaxial. Entretanto, durante a solidificação descendente os efeitos de convecção e o teor de soluto devem ser considerados como principais parâmetros de influência na extensão do crescimento colunar.



**Figura 4.** Macroestruturas obtidas.

As macroestruturas resultantes da solidificação direcional são mostradas na **Figura 4**. A transição colunar/equiaxial ocorreu a 120mm, 83mm e 76mm, em relação à interface entre metal e câmara refrigerada, para as ligas Sn5%Pb, Sn15%Pb e Sn20%Pb, respectivamente. As macroestruturas mostram a influência da composição da liga, com a antecipação da transição ocorrendo para ligas de maior teor de soluto.

Os resultados das análises térmicas experimentais são usados na determinação das velocidades de solidificação ( $V_L$ ) e das taxas de resfriamento ( $\dot{T}_L$ ). As taxas de resfriamento imediatamente depois da passagem da frente de solidificação foram obtidas experimentalmente a partir das interseções das retas de cada temperatura *liquidus* ( $T_L$ ) com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares, e através do resultado da leitura direta do quociente das temperaturas imediatamente antes e depois da  $T_L$  e dos tempos correspondentes, isto é  $\dot{T}_L = \Delta T / \Delta t$ . A TCE é dependente das variáveis térmicas de solidificação ( $G_L$ ,  $V_L$  e  $\dot{T}_L$ ), sendo que todas elas variam com o tempo e a posição durante a solidificação. Para uma determinação mais precisa dos valores desses parâmetros foram comparados os pontos experimentais obtidos com as curvas numericamente geradas, o que propiciou interpolações mais precisas para os resultados finais.

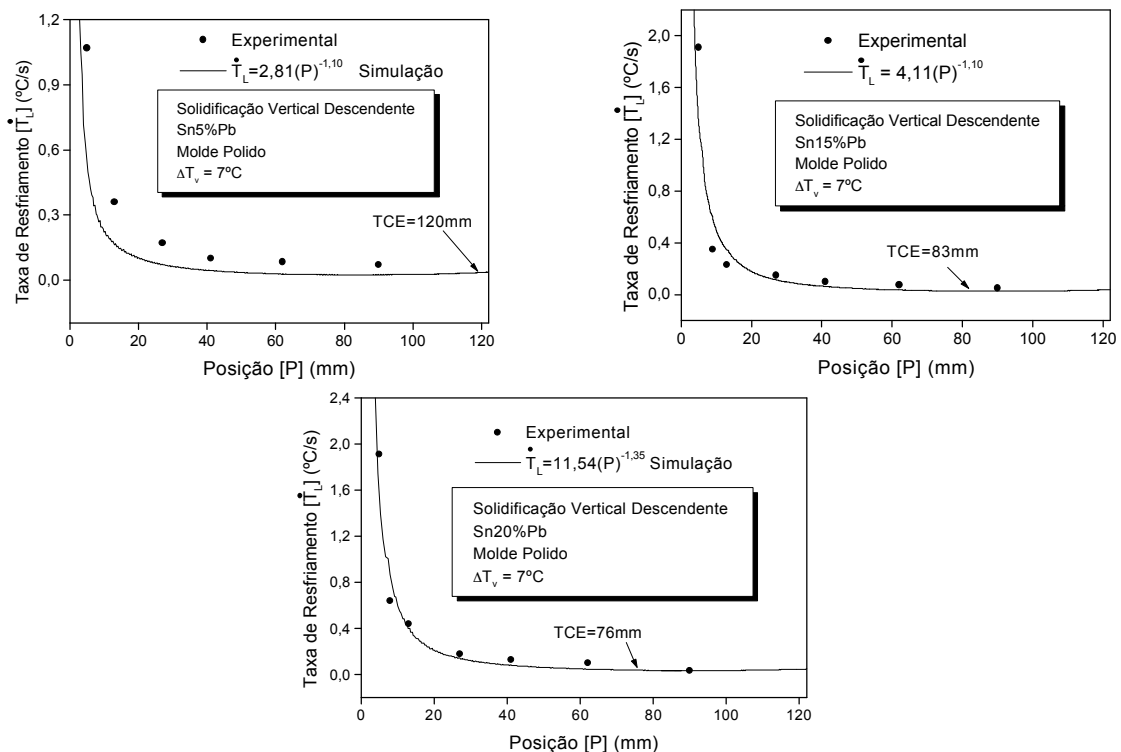
Um modelo numérico foi usado para simular a solidificação de ligas binárias em uma cavidade cilíndrica resfriada a partir da superfície superior. Inicialmente, as ligas foram assumidas em estado líquido e uniformemente misturadas, com temperaturas de vazamento excedendo as temperaturas *liquidus*. Foram ainda considerados no modelo: convecção no líquido e transporte de soluto no estado sólido. O fundo da cavidade e as paredes laterais foram considerados barreiras completamente isoladas termicamente, o que favorece a extração da energia do sistema apenas a partir do topo da cavidade cilíndrica. O coeficiente transitório de transferência de calor metal/molde governa a taxa de extração de calor. A formulação matemática do problema de solidificação é baseada na proposta de **Voller [1998]**. Apenas algumas modificações foram incorporadas, tais como: uso de diferentes propriedades termofísicas para as fases líquida e sólida, e também a

inserção do coeficiente transitório de transferência de calor metal/molde [Ferreira, 2003].

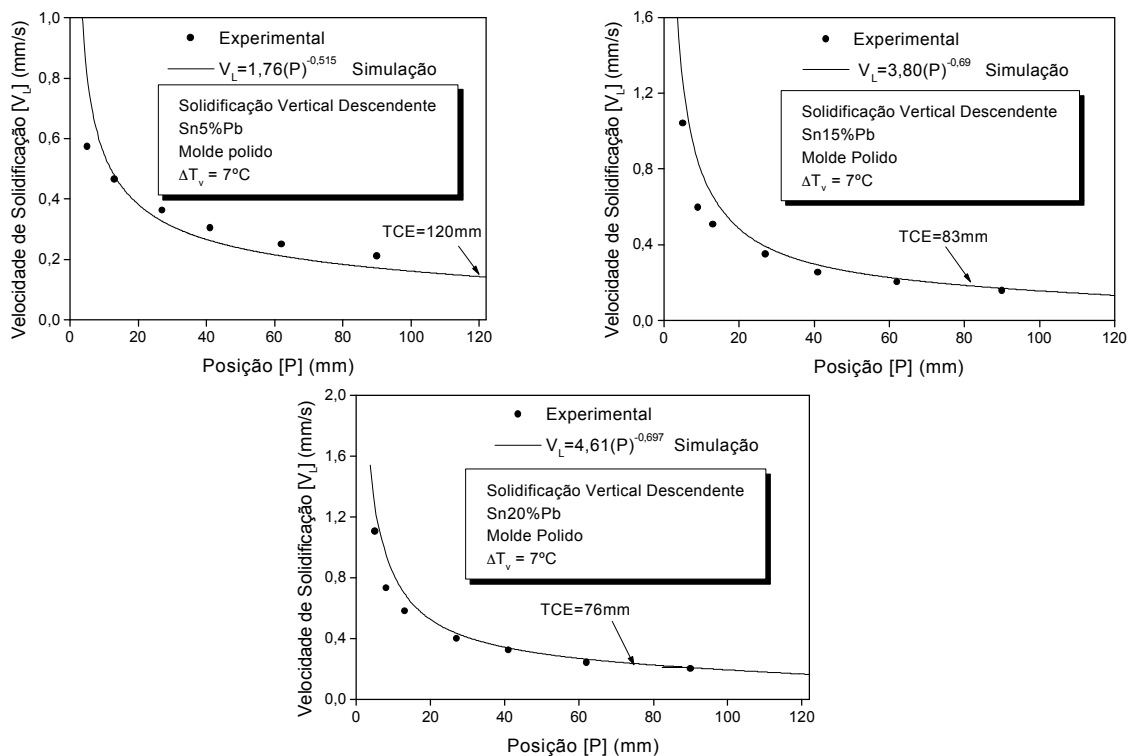
Dessa maneira, o modelo numérico foi a ferramenta de cálculo utilizada para a determinação das variáveis de solidificação associadas com a TCE e com os espaçamentos dendríticos. A boa concordância entre os resultados simulados numericamente e aqueles obtidos experimentalmente pode ser vista nas **Figura 5 e 6**. A **Tabela 1** lista os valores obtidos para  $V_L$ ,  $G_L$  e  $\dot{T}_L$ , contemplando as posições experimentais das transições colunar/equiaxial para as ligas analisadas.

Ligas Sn-Pb	Sn-5%Pb	Sn-15%Pb	Sn-20%Pb
<b>CET (mm)</b>	120	83	76
<b><math>h_i</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>	1650 t <sup>-0,001</sup>	1700 t <sup>-0,001</sup>	2100 t <sup>-0,001</sup>
<b><math>G_L</math> (°C/mm)</b>	0,192	0,155	0,142
<b><math>V_L</math> (mm/s)</b>	0,160	0,180	0,227
<b><math>\dot{T}_L</math> (°C/s)</b>	<u>0,030</u>	<u>0,028</u>	<u>0,032</u>

**Tabela 1.** Posições das transições e parâmetros térmicos de solidificação.



**Figura 5.** Taxa de Resfriamento em função da posição relativa à interface metal/câmara.



**Figura 6.** Velocidade de deslocamento da isoterma liquidus em função da posição relativa à interface

Apesar das diferenças observadas em  $V_L$  e  $G_L$ , as taxas de resfriamento na posição correspondente à transição colunar/equiaxial foram essencialmente as mesmas (em torno de  $0,03 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ) para os três casos analisados [Tabela 1]. Portanto, o critério para TCE baseado numa taxa de resfriamento crítica, dependente apenas do sistema binário de liga e proposto recentemente na literatura [Siqueira, 2002 e 2003], pode ser aplicado para os presentes resultados experimentais, excetuando-se apenas o valor nominal da taxa crítica de resfriamento. Assim, o final da zona colunar é abreviado como resultado de um valor crítico duas vezes maior que aquele observado durante a solidificação unidirecional ascendente de ligas hipoeutéticas do sistema Sn-Pb ( $\dot{T}_L = 0.014 \text{ K/s}$ ).

A rejeição de soluto durante a solidificação resulta no crescimento da densidade do líquido remanescente. A diferença de densidades induz o efeito de convecção interdendrítica. Dessa forma, inicia-se a nucleação de novos sólidos originados do desprendimento de braços dendríticos nas regiões interdendríticas, que crescem como novos grãos equiaxiais, contribuindo para o aumento da frente de bloqueio ao crescimento colunar. Dependendo da quantidade de grãos equiaxiais gerados na região interdendrítica um acúmulo desses grãos pode provocar o impedimento do crescimento colunar, o que estimulará a ocorrência da TCE. Embora os novos núcleos sólidos arrancados das dendritas sejam mais leves que o líquido interdendrítico remanescente, eles apresentam temperaturas *liquidus* maiores que a do líquido ao redor, o que garante sua sobrevivência. O crescimento colunar pode, portanto, ser bloqueado, e a TCE é antecipada quando se compara a presente configuração com o caso da solidificação direcional ascendente.

Entre os inúmeros modelos da literatura desenvolvidos com o objetivo de colaborar na seleção dos espaçamentos dendríticos primários e secundários, apenas aqueles desenvolvidos por Hunt-Lu [1996] para espaçamentos primários e por Bouchard [1997] para espaçamentos secundários atendem as condições impostas pela solidificação em regime transitório de extração de calor. No entanto,

um trabalho recentemente proposto mostra que esses modelos não apresentam boa similaridade com os resultados experimentais observados para espaçamentos dendríticos primários [Rocha, 2003]. Esse estudo foi desenvolvido para o caso da solidificação vertical ascendente de ligas do sistema Sn-Pb.

Esse estudo apresenta uma equação experimental para os espaçamentos dendríticos primários baseada na taxa de resfriamento local, que é dada por:

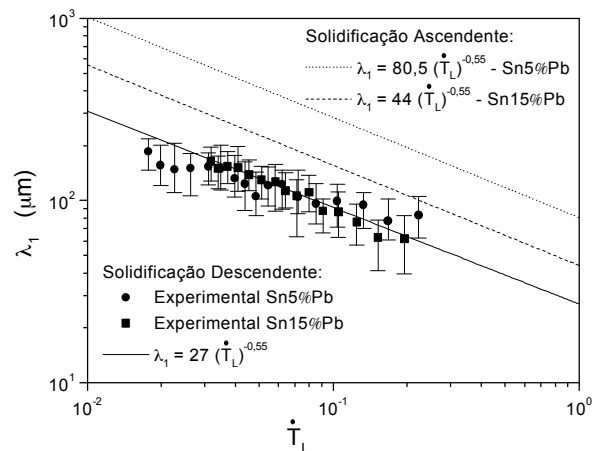
$$\lambda_1 = A (\dot{T}_L)^{-0.55}, \quad (2)$$

onde  $\lambda_1$  [ $\mu\text{m}$ ];  $\dot{T}_L$  [ $^{\circ}\text{C/s}$ ] e  $A = 80,5$  e  $44$ , para Sn5%Pb e Sn15%Pb, respectivamente. Para os espaçamentos dendríticos secundários, a lei experimental, como função da velocidade de solidificação, é dada por:

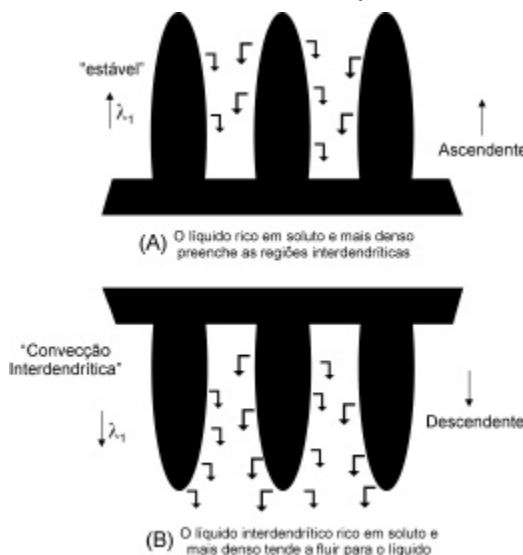
$$\lambda_2 = B(V_L)^{-2/3}, \quad (3)$$

onde  $\lambda_2$  [ $\mu\text{m}$ ];  $V_L$  [mm/s] e  $B = 25$  e  $11$ , para Sn5%Pb e Sn15%Pb, respectivamente.

A **Figura 7** mostra a média dos espaçamentos dendríticos experimentais ao longo das posições relativas, incluindo os respectivos desvios padrões. Os espaçamentos primários são apresentados como uma função da taxa de resfriamento. As linhas representam funções empíricas obtidas a partir dos pontos experimentais. No caso da solidificação vertical descendente uma mesma lei representa a variação dos espaçamentos primários com a taxa de resfriamento para as ligas Sn5%Pb e Sn15%Pb. A **Figura 7** mostra também uma comparação dessa lei comum com as leis experimentais obtidas na solidificação direcional ascendente.



**Figura 7.** Espaçamentos dendríticos primários em função da taxa de resfriamento.



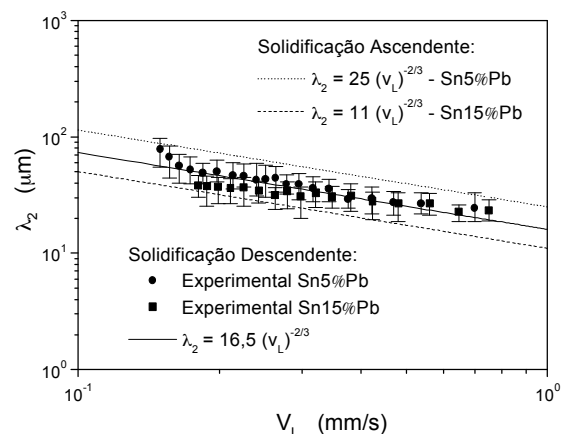
**Figura 8.** Representação esquemática do movimento de soluto. A) ascendente; B) descendente.

tende a movimentar-se no sentido descendente, para dentro da região líquida do lingote. Conforme Burden [1976], a primeira situação ajuda o transporte radial de material e favorece espaçamentos maiores, enquanto que a segunda situação apresentada (caso descendente) potencializa o efeito da rejeição de soluto e a



necessidade da segregação lateral, o que favorece a redução dos espaçamentos dendríticos.

A **Figura 9** apresenta a média dos espaçamentos dendríticos secundários experimentais ao longo das posições relativas, incluindo os respectivos desvios padrões. Os espaçamentos são apresentados como função da velocidade de solidificação. Uma mesma lei experimental representa a variação dos espaçamentos secundários para as ligas Sn5%Pb e Sn15%Pb. Quando compara-se os valores médios de  $\lambda_2$  obtidos na presente investigação com aqueles medidos experimentalmente para o caso da solidificação ascendente, observa-se uma tendência de redução dos espaçamentos dendríticos secundários para a liga Sn5%Pb solidificada na descendente. Porém, não fica evidente se há influência do movimento convectivo do líquido sobre  $\lambda_2$ , já que os valores experimentais para a liga Sn15%Pb apresentam-se bastante similares em ambos os casos.



**Figura 9.** Espaçamentos secundários como função da velocidade de solidificação.

#### 4. Conclusões

O critério proposto para previsão da TCE, baseado em uma taxa crítica de resfriamento, mostrou-se aplicável às condições de solidificação estudadas, sofrendo apenas alteração no valor crítico estabelecido ( $0,03^{\circ}\text{C/s}$ ), o que ocorreu devido a antecipação da ocorrência da transição, estimulada pela presença intensa de convecção no líquido. Os espaçamentos dendríticos primários experimentais diminuíram para uma mesma taxa de resfriamento, quando comparados com o caso

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP e do CNPq.

#### 6. Referências Bibliográficas

- BOUCHARD, D., KIRKALDY, S. Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-state Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys. **Metallurgical Transactions**, v.28B, p.651, 1997.
- BURDEN, M.H., HUNT, J.D. Some Observations on Primary Dendrite Spacings. **M. Sci.**, p.156, 1976.
- CHALMERS, B. The structure of ingots, **JAIM**, v.8, p.255, 1963.
- FERREIRA, I.L., SIQUEIRA, C.A., SANTOS, C.A., GARCIA, A. Theoretical and Experimental Analysis of Inverse Segregation During Unidirectional Solidification of an Al 6.2wt% Cu Alloy. **Scripta Materialia**, v.49, p.339, 2003.
- GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.
- HUNT, J. D., LU, S.Z. Numerical Modeling of Cellular/Dendritic Array Growth: Spacing and Structure Predictions. **Metallurgical Transactions**, v.27A, p.611, 1996.
- KURZ, W., FISHER, D. **Fundamentals of Solidification**. Suíça: TransTech Publications, 1992.
- RAPPAZ, M., GANDIN, A., DESBIOLLES, J. L., THEVOZ, P. Prediction of Grain Structures in Various Solidification Processes. **Metallurgical Transactions**, v.27A, p.695, 1996.
- ROCHA, O.L. SIQUEIRA, C. A., GARCIA, A. Heat Flow Parameters Affecting Dendrite Spacings during Unsteady-state Solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. **MSA**, v.347, p.59, 2003.
- SIQUEIRA, C. A., GARCIA, A. Solidification Thermal Parameter Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition. **Metallurgical Transactions**, v.33A, p.2107, 2002.
- SIQUEIRA, C.A., CHEUNG, N., GARCIA, A. The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v.351, p.126, 2003.
- SURI, V. K., ÉL-KADDAH, N., BERRY, J. T. Part I: Determination of Columnar/Equiaxed Transition for Al4,5%Cu Alloy. **AFS Transactions**, v.99, p.187, 1991.
- VOLLER, V.R. A Numerical Scheme for Solidification of an Alloy. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v.37, p.169, 1998.
- WANG, F. Y., BECKERMANN, C. Prediction of Columnar-to-Equiaxed Transition During Diffusion-controlled Dendritic Alloy Solidification. **Metallurgical Transactions**, v.25A, p.1081, 1994.

# INFLUENCE OF MELT CONVECTION ON THE COLUMNAR TO EQUIAXED TRANSITION AND MICROSTRUCTURE OF DOWNWARD UNSTEADY-STATE DIRECTIONALLY SOLIDIFIED Sn-Pb ALLOYS

José Eduardo Spinelli <sup>1</sup>  
Ivaldo Leão Ferreira <sup>2</sup>  
Amauri Garcia <sup>3</sup>

**Abstract:** A combined theoretical and experimental approach is developed to quantitatively determine the solidification thermal parameters: transient heat transfer coefficients, tip growth rates and cooling rates during downward unsteady state solidification of hypoeutectic Sn-Pb alloys. For the growth conditions examined, solid in the top and melt below, with gravity pointing down, the rejection of solute into the melt during solidification results in increased melt density. The resulting thermosolutal convection can start in the melt both within the interdendritic region and ahead of the dendrite array. The experimental results have shown that melt convection may be causing pileup of fractionated dendritic arms, which must stimulate the CET occurrence. The results have supported a criterion recently proposed based on a critical cooling rate. For upward unidirectional condition this critical value was found to about 0.014 K/s for hypoeutectic Sn-Pb alloys. In the present study, in conditions of downward solidification, melt convection seems to favor the structural transition, which is anticipated and occurs for a critical cooling rate of about 0.03 K/s, for any of three hypoeutectic alloys experimentally examined. Primary dendritic arm spacings have been affected by the direction of growth, decreasing in conditions of downward vertical solidification when compared with those grown vertically upwards. A tendency of reduction of secondary dendritic arms has also been observed for the Sn 5wt pct Pb alloy solidified downwards when compared with those grown vertically upwards.

**Keywords:** COLUMNAR TO EQUIAXED TRANSITION, Sn-Pb ALLOYS, MELT CONVECTION.

**Address:** Department of Materials Engineering, State University of Campinas, UNICAMP, 13083-970, Campinas, SP, Brazil.

\* Work submitted to the V SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO DA ABM, May 2004 - Salvador - BA.

1 - Doctoral Student at GPS/DEMA

2 - Doctoral Student at GPS/DEMA

3 - Professor at DEMA/FEM and Coordinator at GPS.