

# **Influência da Convecção no Líquido na Transição Colunar/Equiaxial e na Macroestrutura para ligas Sn-Pb durante Solidificação Direcional Descendente**

**12003**

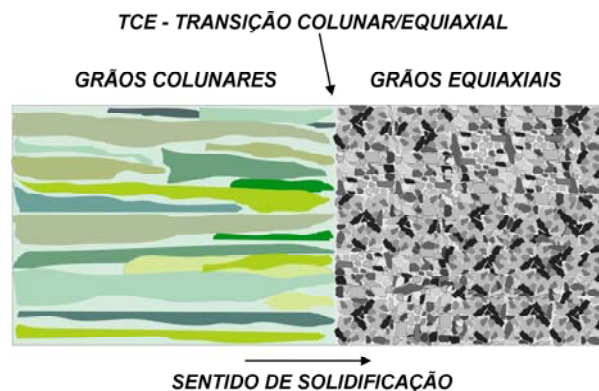
Foram determinados os parâmetros térmicos de solidificação presentes, tais como: coeficiente de transferência de calor ( $h_i$ ), velocidade da isoterma liquidus (VL), gradiente térmico (GL) e taxa de resfriamento. O sistema de ligas estudado foi o binário Sn-Pb, para as ligas Sn5%Pb, Sn15%Pb e Sn20%Pb. O dispositivo construído permitiu a solidificação vertical descendente dessas ligas, mantendo regime transitório de extração de calor. A rejeição de soluto para o líquido durante o processo resultou em aumento da densidade do líquido interdendrítico em relação à densidade global do metal líquido. Nestas condições, ocorre movimento convectivo nas regiões interdendríticas e nas zonas imediatamente posteriores à frente de solidificação. Os resultados mostram que o efeito convectivo fragmenta ramificações dendríticas que se acumulam entre os braços dendríticos, estimulando a ocorrência da transição colunar/equiaxial (TCE). O critério utilizado para determinação da TCE, já estabelecido para o caso da solidificação ascendente, baseia-se na determinação de um valor crítico para a taxa de resfriamento. Notou-se apenas a alteração desse valor quando confrontados os casos ascendente (0,014K/s) e descendente (0,03K/s), já que a transição é antecipada por conta do efeito convectivo.

***Palavras-chave:*** transição colunar/equiaxial, sistema Sn-Pb, convecção.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Macroestrutura e Transição Colunar/equiaxial

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].



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

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 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 teórico-experimental para a 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.

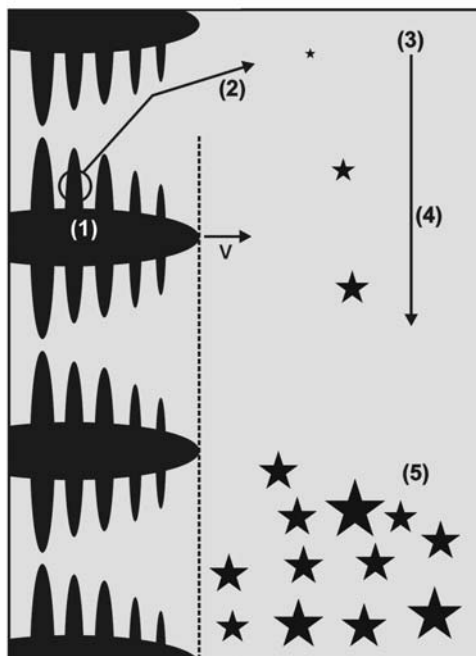
## 1.2 Fragmentação de Braços Dendríticos

Na ausência de partículas inoculantes no líquido, a formação de grãos equiaxiais é geralmente atribuída a duas causas: as condições de resfriamento (gradiente térmico, velocidade de solidificação e concentração dos elementos de liga) ou a fragmentação de braços dendríticos. O último dos fenômenos permite explicar porque é possível a obtenção de um crescimento equiaxial quando os modelos teóricos predizem um crescimento colunar. A fragmentação de dendritas é ainda um fenômeno pouco abordado na literatura, tendo seus mecanismos sido descritos somente por alguns autores [**Campanella, 2003**].

**Hellawell [1997]** definiu cinco etapas para a formação de grãos equiaxiais através da fragmentação de braços dendríticos [**Figura 2**]:

1. *A fragmentação dos braços das dendritas por refusão local.* Como a fragmentação não é um fenômeno ainda bem conhecido, algumas deduções para a solidificação de ligas orgânicas vêm sendo utilizadas [**Paradies, 1997; Sato, 1987**]. **Jackson [1966]**, **Sato [1987]** e **Paradies [1997]**. Estes trabalhos atribuem a fragmentação como consequência de uma refusão local das seções mais finas dos braços dendríticos. **Liu [2002]** concluiu que a fragmentação pode ser induzida pela desaceleração da velocidade de resfriamento. Além disso, **Liu** minimiza o fenômeno da refusão térmica dos braços dendríticos, afirmando ser possível sua ocorrência, mesmo não tendo observado tal fenômeno para seus experimentos. **Gu [1997]** e **Hellawell [1993]** atribuem a formação dos fragmentos à rejeição de soluto das formações dendríticas. **Pilling [1996]** concluiu que deformações mecânicas induzidas pela convecção do líquido interdendrítico não podem ser a causa do desprendimento dos braços dendríticos.
2. *O transporte de fragmentos da zona pastosa através do líquido imediatamente após a frente de crescimento da estrutura colunar.* Esse fenômeno de transporte requer uma convecção natural ou forçada nessa região. **Hellawell [1997]** afirma que a convecção interdendrítica é responsável pelo transporte de fragmentos da zona pastosa em direção ao líquido.
3. *A sobrevivência dos fragmentos.* Os fragmentos são conduzidos para as regiões mais quentes, dependendo sua sobrevivência do percurso que vão perfazer dentro do líquido aquecido (ou se distanciando, ou se aproximando da frente de solidificação), podendo refundir-se completamente ou dar origem à nucleação de grãos equiaxiais posicionados à frente de interface de solidificação. **Han [1997]** estimou as velocidades de refusão dos fragmentos analisando um caso simples de partículas esféricas no líquido, não considerando convecção. Por sua vez, **Gu [1997]** levou em consideração a influência do percurso do fragmento para estudar sua sobrevivência através da modelagem numérica do problema, considerando somente a refusão devido à variação composicional do soluto e convecção natural.
4. *O crescimento e a sedimentação.* Caso os fragmentos dendríticos sobrevivam, pode ocorrer o crescimento dos mesmos. O crescimento pode acontecer (o fragmento pode sedimentar-se, dando origem a núcleos formadores de grãos equiaxiais) ou não (a frente de solidificação pode absorver o fragmento).

5. *A formação da estrutura equiaxial.* A formação de grãos equiaxiais bloqueia o crescimento das dendritas colunares. A estrutura passa a ser equiaxial. Sendo um dos raros autores a estudar esse fenômeno, associando sua ocorrência à fragmentação, **Jang [1991]** estimou as velocidades de sedimentação para uma liga orgânica, utilizando critérios de escoamento de “*Stokes*”, e ainda outro critério analítico do bloqueio do crescimento colunar na frente de solidificação.



**Figura 2.** Etapas da criação de grãos equiaxiais através da fragmentação de braços dendríticos.

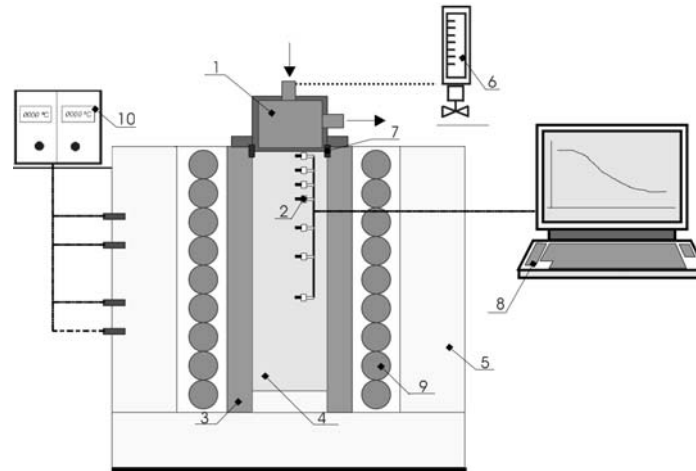
As condições para as quais ocorre fragmentação de ramificações dendríticas permanecem ainda com uma certa controvérsia. Porém, analisando alguns estudos no assunto é possível destacar alguns parâmetros preponderantes ou influentes: *i. a velocidade de convecção*: maiores velocidades diminuem os gradientes térmicos e químicos próximos à interface de solidificação, o que torna o refinamento dos grãos mais efetivo; *ii. o modo de escoamento*: a presença da convecção turbulenta ou laminar pode influenciar na macroestrutura obtida, ou seja, na morfologia e tamanho dos grãos resultantes; *iii. a concentração de elementos de liga*: quanto maior a concentração maior a extensão da região super-resfriada à frente da interface de solidificação, facilitando a sobrevivência de fragmentos e a refusão de braços secundários; *iv. a desaceleração da taxa de resfriamento*: pode indicar um aumento de temperatura e de concentração nas regiões interdendríticas, contribuindo para a refusão dos braços dendríticos.

O presente estudo investiga os efeitos da ocorrência de convecção no líquido na transição colunar/equiaxial, para as particularidades apresentadas durante a 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 deslocamento da isoterma liquidus e taxas de resfriamento da frente colunar. Realizou-se também uma análise comparativa 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 (Sn5%Pb, Sn15%Pb e Sn20%Pb), câmara de refrigeração a água 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* características das mesmas.

O aparato de solidificação [Figura 3] 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.



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

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 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 (encapsulados em 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.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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.

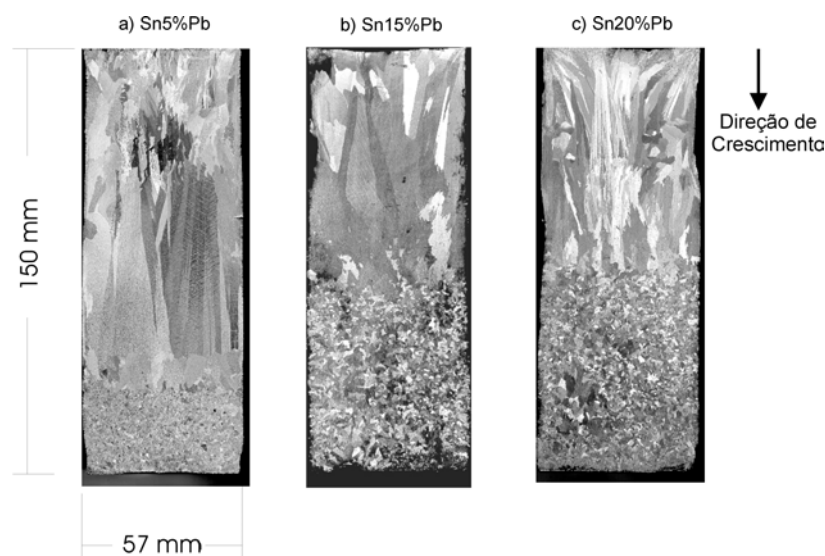
Nos moldes refrigerados, o fluxo de calor total pode ser definido pela associação de uma série de resistências térmicas. A resistência térmica da interface entre o metal e a superfície da câmara de refrigeração ( $1/h_{m/m}$ ) é a maior, e a resistência térmica total ( $1/h_i$ ) é dada por:

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

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 superfície externa da 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.

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.



**Figura 4.** Macroestruturas obtidas.

Os resultados das análises térmicas experimentais foram usados na determinação das velocidades de deslocamento da isoterma liquidus ( $V_L$ ) e das taxas de resfriamento junto à frente colunar ( $\dot{T}_L$ ). 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.

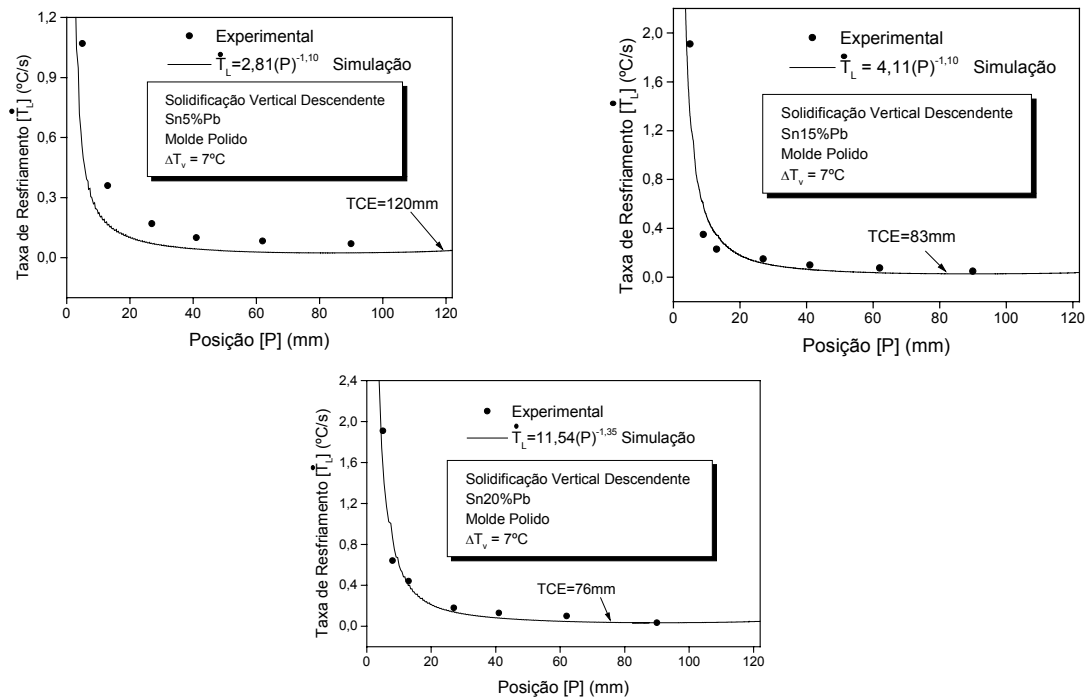
Um modelo numérico foi usado para simular a solidificação de ligas binárias em uma cavidade cilíndrica resfriada a partir da superfície superior. Inicialmente, as ligas foram assumidas em estado líquido e uniformemente misturadas, com temperaturas de vazamento excedendo as temperaturas *liquidus*. Foram 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 condiciona a extração da energia térmica 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**].

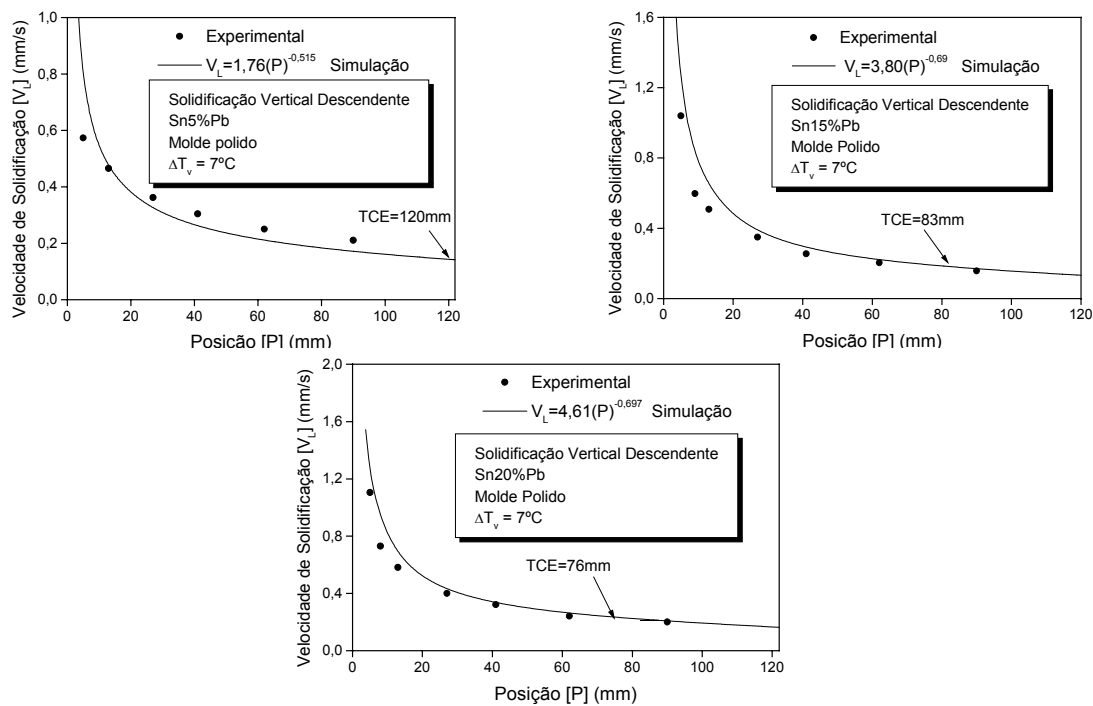
Dessa maneira, o modelo numérico foi a ferramenta de cálculo utilizada para a determinação das variáveis de solidificação associadas com a TCE e com os espaçamentos dendríticos. A boa concordância entre os resultados simulados numericamente e aqueles obtidos experimentalmente pode ser vista nas **Figura 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.

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

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



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



**Figura 6.** Velocidade de solidificação em função da posição relativa à interface metal/câmara.

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  $0,03^\circ\text{C/s}$ ) para os três casos analisados [Tabela 1]. Portanto, o critério para TCE baseado numa taxa de resfriamento crítica, dependente apenas do sistema binário e proposto recentemente na literatura [Siqueira, 2002], pode ser aplicado para os presentes resultados experimentais. O final da zona colunar é abreviado na solidificação descendente (comparativamente à solidificação ascendente) por conta da convecção interdendrítica e que conduz a uma taxa de resfriamento crítica duas vezes maior que aquela observada 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 aumento da densidade do líquido interdendrítico em relação ao volume de metal líquido. A diferença de densidades induz convecção na região interdendrítica. Dessa forma, inicia-se a nucleação de novos sólidos originados dos fragmentos de braços dendríticos rompidos pela ação das correntes convectivas nas regiões interdendríticas, que crescem como novos grãos equiaxiais, contribuindo para o adensamento de grãos equiaxiais até um ponto que ocorre o bloqueio 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 o que impede sua refusão e 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.

#### 4. CONCLUSÃO

O critério para previsão da TCE, baseado em uma taxa crítica de resfriamento, mostrou-se também aplicável às condições de solidificação unidirecional descendente, sofrendo apenas alteração no valor crítico estabelecido ( $0,03^\circ\text{C/s}$  no presente caso), o que ocorreu devido a antecipação da ocorrência da transição, estimulada pela presença intensa de convecção no líquido, e pela conseqüente fragmentação de ramos dendríticos que atuam como núcleos estimuladores de crescimento equiaxial. A solidificação unidirecional ascendente ocorre em condições estáveis no



líquido sem ocorrência de convecção por gradientes de temperatura nem por diferenças de densidade.

## 5. AGRADECIMENTOS

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

## 6. BIBLIOGRAFIA

CAMPANELLA, T. Étude de L'effet du Brassage Électromagnétique sur les Microstructures d'alliages Cuivreux. **Tese de Doutorado**, École Polytechnique Fédérale De Lausanne (EPFL), 188p., Lausanne, 2003.

CHALMERS, B. The structure of ingots, **JAIME**, 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.

GU, J.P., BECKERMANN, C., GIAMEI, A.F. Motion and Remelting of Dendrite Fragments during Directional Solidification of a Nickel-Base Superalloy. **Metallurgical Transactions**, v.28A, p.1533, 1997.

HAN, Q., HELLAWELL, A. Primary Particle Melting Rates and Equiaxed Grain Nucleation. **Metallurgical Transactions**, v.28B, p.169, 1997.

HELLAWELL, A., LIU, S., LU, S.Z. Dendrite Fragmentation and the Effects of Fluid Flow in Castings. **Journal of Metals**, p. 18-20, 1997.

HELLAWELL, A., SARAZIN, J.R., STEUBE, R.S. Channel Convection in Partly Solidified Systems. **Phil Trans. R. Soc. Lond. A**, v. 345, p. 507, 1993.

JACKSON, K. A., HUNT, J. D., UHLMANN, D.R., SEWARD, T.P. On the Origin of the Equiaxed Zone in Castings. **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, v. 236, p. 149, 1966.

JANG, J., HELLAWELL, A. Use of NH<sub>4</sub>Cl-H<sub>2</sub>O Analogue Castings to Model Aspects of Continuous Casting. Part 2: Columnar-Equiaxed Grain Transition and Crystal Sedimentation Rates. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 18, p. 275, 1991.

KURZ, W., FISHER, D. **Fundamentals of Solidification**. Suíça: TransTech Publications, 1992.

LIU, S., LU, -Z., HELLAWELL, A. Dendritic Array Growth in the System NH<sub>4</sub>Cl-H<sub>2</sub>O and [CH<sub>2</sub>CN]<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: The Detachment of Dendrite Side Arms Induced by Deceleration. **Journal of Crystal Growth**, v. 234, p. 740, 2002.

PARADIES, C.J., SMITH, R.N., GLICKSMAN, M.E. The Influence of Convection during Solidification on Fragmentation of the Mushy Zone of a Model Alloy. **Metallurgical Transactions**, v.28A, p.875, 1997.

PILLING, J., HELLAWELL, A. Mechanical Deformation of Dendrites by Fluid Flow. **Metallurgical Transactions**, v.27A, p.229, 1996.

RAPPAZ, M., GANDIN, A., DESBIOLLES, J. L., THEVOZ, P. Prediction of Grain Structures in Various Solidification Processes. **Metallurgical Transactions**, v.27A, p.695, 1996.

SATO, T., KURZ, W., LKAWA, K. Experiments on Dendrite Branch Detachment in the Succinonitrile-Camphor Alloy. **Trans. of the Japan Institute of Metals**, v. 28, p. 1012, 1987.

SIQUEIRA, C. A., GARCIA, A. Solidification Thermal Parameter Affecting the Columnar-to-Equiaxed Transition. **Metallurgical Transactions**, v.33A, p.2107, 2002.

SURI, V. K., EL-KADDAH, N., BERRY, J. T. Part I: Determination of Columnar/Equiaxed Transition for Al<sub>4</sub>,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 Macrostructure of Downward Unsteady-state directionally solidified Sn-Pb Alloys**

**12003**

**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 fractioned 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.**

**Keywords: Columnar to equiaxed transition, Sn-Pb system, melt convection.**