

# Análise Numérica e Experimental dos Parâmetros Térmicos e Estruturas de Ligas Sn-Pb Solidificadas em Lingotes Cilíndricos Horizontais

**Eduardo Netto de Souza**  
edusouza@fem.unicamp.br

**Newton Silva Santos**  
newton@fem.unicamp.br

**Carlos Alexandre dos Santos**  
alex@fem.unicamp.br

**Amauri Garcia**

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Eng<sup>a</sup> dos Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas – SP, CEP13083-970 , amaurig@fem.unicamp.br

**Resumo.** Nos processos de lingotamento contínuo horizontal e fundição convencional em moldes com geometria cilíndrica ocorrem variações dos coeficientes de transferências de calor ao longo do perímetro da geometria em questão, resultando em assimetria estrutural nos produtos brutos de fusão, implicando em diferentes comportamentos desses, quando submetidos a etapas de pós-processamento ou tratamentos térmicos. Com o objetivo de um melhor controle da solidificação em lingotes cilíndricos em processos de fundição, é fundamental analisar-se o comportamento do fluxo de calor ao longo da posição em regime transiente. A correlação entre estruturas dos lingotes e os parâmetros do processo possibilitam a otimização da qualidade do produto final em função das características da solidificação. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um aparato experimental refrigerado para o acompanhamento da solidificação em ligas do sistema SnPb (Sn-5%Pb, Sn-15%Pb, Sn-20%Pb), análise das estruturas resultantes, bem como a determinação dos coeficientes transitórios de transferência de calor na interface metal/refrigeração. O método utilizado para essa determinação foi o IHCP (Inverse Heat Conduction Problem), consistindo do confronto de resultados obtidos experimentalmente e resultados gerados por um modelo matemático de solidificação desenvolvido em M.D.F (método de diferenças finitas). Os resultados obtidos foram avaliados no que diz respeito às: condições de vazamento, perfis térmicos, transferência de calor na interface metal/molde, velocidades e taxas de solidificação, sendo correlacionados com os diferentes aspectos das macroestruturas.

**Palavras-Chave:** Solidificação, Transferência de Calor, Lingotamento Contínuo, Modelo Numérico, Geometria Cilíndrica.

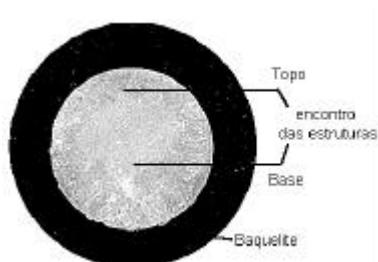
## 1. INTRODUÇÃO

O interesse pelo controle da solidificação em processos de fundição convencional e lingotamento contínuo vem aumentando em função da exigência do mercado em obter um produto de baixo custo com qualidade final otimizada. Diversos softwares apresentam várias soluções na modelagem quanto ao preenchimento e solidificação do metal no molde. Os objetivos das simulações recaem em prever fenômenos físico-metalúrgicos tais como perfis de temperatura, rechups, tempo de solidificação, macro e microestruturas, tensões decorrente do próprio processo,

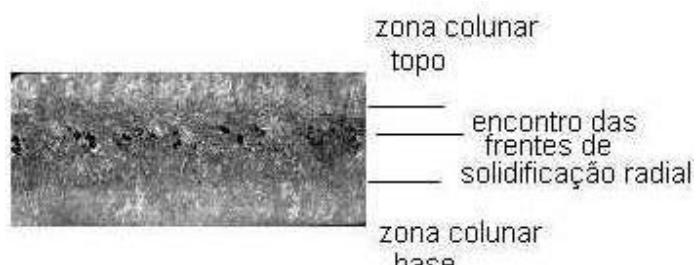
análise do fluxo do metal líquido durante o preenchimento das cavidades do molde, entre outros. A modelagem da solidificação implica em uma análise teórica para a utilização em diferentes métodos matemáticos, que de uma maneira geral pode ser dividida em analíticos e numéricos.

No lingotamento contínuo horizontal cilíndrico, existe a necessidade do controle do processo de solidificação em relação à formação da casca no molde, permitindo desse modo, a otimização nos parâmetros do processo em relação à velocidade de extração do lingote sem que ocorra ruptura ou formação de trincas decorrentes da ação das tensões do próprio puxamento e da pressão metalostática. Na prática, dificilmente ocorre uma formação uniforme, pois existe uma propagação da frente em vários sentidos. Esta propagação varia de acordo com a composição química dos materiais, condições de fluxo do fluido, do superaquecimento do metal no molde e dos métodos para melhorar a qualidade do lingote. Com relação à qualidade do produto, é inevitável a existência de assimetria na estrutura, devido às diferenças de fluxo de calor no molde ao longo da seção do lingote. Segundo Hadden (1979), a transferência de calor é mais efetiva na parte inferior devido ao melhor contato térmico na base em função do efeito gravitacional e a molhabilidade do líquido. Trabalhos mais recentes mostram que o efeito gravitacional é um fator preponderante na assimetria das estruturas de solidificação (Souza, 2002), ocasionando variação no *gap* de ar decorrentes do fenômeno da contração do metal, das influências físico-químicas entre metal e molde, expansão do molde, entre outros.

Huang (1981), por meio de experimentos com vazamentos estáticos, mostra a variação dos *gaps* de ar e consequentemente na distribuição dos coeficientes de transferência de calor em várias seções geométricas, comprovando o efeito da gravidade na contração do metal. Souza (2003) quantificou o fluxo de calor em geometrias cilíndricas mostrando, através de simulações, a variação angular do coeficiente de transferência de calor em regime transitente. As figuras 1 e 2 mostram a variação nas estruturas de solidificação em experimentos com lingotamento contínuo horizontal. Pesquisadores vêm se utilizando de coeficientes de transferência de calor em regime transitente na análise da solidificação em sistemas que envolvam fluxo de calor unidirecional, entretanto em relação à modelos desenvolvidos com fluxo de calor radial, as variáveis do processo consideradas com regime estacionário são as mais utilizadas, desconsiderando o efeito da geometria da peça e suas diferentes formas de transferência de calor ao longo da interface metal/molde.



**Figura 1** – Macrografia da seção transversal de um lingote de AlSi obtido por lingotamento contínuo horizontal. Ataque HF 15%.



**Figura 2** – Macrografia da seção longitudinal de um lingote de AlSi obtido por LCH. Ataque HF 15%.  
(Souza,2000)

Para a análise numérica e experimental dos parâmetros térmicos e estruturais das ligas Sn5%Pb, Sn15%Pb e Sn20%Pb, desenvolveu-se um aparato experimental refrigerado, quantificando-se os fluxos de calor pelo método IHCP (*Inverse Heat Conduction Problem*), por meio da determinação dos coeficientes transitórios de transferência de calor na interface metal/molde. O IHCP consiste no confronto dos perfis térmicos obtidos por modelagem numérica (M.D.F) com resultados obtidos experimentalmente através do mapeamento de determinados pontos do sistema metal/molde. Os resultados obtidos foram avaliados no que diz respeito às: condições de vazamento, perfis térmicos, transferência de calor na interface metal/molde, velocidades e taxas de solidificação, sendo correlacionados com os diferentes aspectos das macroestruturas.

## 2. MODELAGEM NUMÉRICA POR M.D.F. EM COORDENADAS CILÍNDRICAS

Para o desenvolvimento do modelo matemático da solidificação cilíndrica horizontal, tratando-se de um sistema de fluxo de calor radial, utilizou-se a equação de transferência de calor em coordenadas cilíndricas. A equação geral de condução de calor (Incropora, 1990) é dada por:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde:  $\dot{q}$  = geração interna de calor [J/kg];  $T$  = temperatura [K];

$t$  = tempo [s];

$k$  = condutividade térmica [W/mK];

$\rho$  = densidade do material [kg/m<sup>3</sup>];

$c$  = calor específico [J/kgK];

$r$ ,  $z$  e  $\phi$  são as coordenadas cilíndricas representadas na figura 2.

O termo de geração de energia ( $\dot{q}$ ) para um regime transitório, é dado por:

$$\dot{q} = \mathbf{r} \cdot L \cdot \frac{\partial fs}{\partial t} \quad (2)$$

sendo:  $L$ , o calor latente de fusão [J/kg]; e  $\partial fs$  a fração de sólido formada durante a transformação de fase.

Considerando o fluxo de calor estritamente radial, pode-se reduzir a equação (1) para a forma unidimensional, a qual pode ser aplicada para o caso da solidificação no lingotamento contínuo cilíndrico. A direção  $z$  de extração de calor pode ser desprezada, uma vez que não é significativa em relação às outras direções  $r$  e  $\phi$  (figura 3). No caso de lingotes com seção simétrica, a direção  $\phi$  também pode ser desprezada, resultando numa equação mais simplificada.

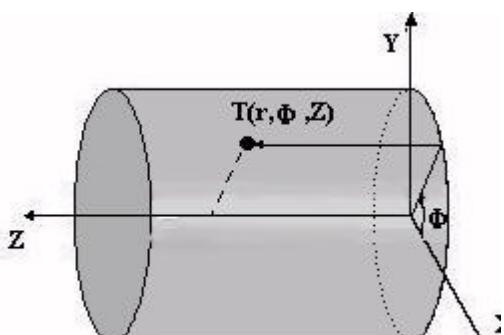


Figura 3 – Sistema de coordenadas cilíndricas.

unidimensional, a qual pode ser aplicada para o caso da solidificação no lingotamento contínuo cilíndrico. A direção  $z$  de extração de calor pode ser desprezada, uma vez que não é significativa em relação às outras direções  $r$  e  $\phi$  (figura 3). No caso de lingotes com seção simétrica, a direção  $\phi$  também pode ser desprezada, resultando numa equação mais simplificada.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \mathbf{r} \cdot L \cdot \frac{\partial fs}{\partial t} = \mathbf{r} \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

onde  $r$  é a variação infinitesimal do raio.

À medida que o processo de solidificação avança, a contração do metal aumenta formando um

gap de ar na interface metal/molde, aumentando a resistência térmica com consequente diminuição no fluxo de calor (figura 4). O conhecimento do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde é primordial na análise do processo de solidificação, havendo necessidade de sua determinação.

Existem diversos métodos apoiados em diferentes abordagens. O método do confronto teórico-experimental, utilizado neste trabalho, consiste em realizar um mapeamento experimental das temperaturas no molde e/ou no metal durante o processo de

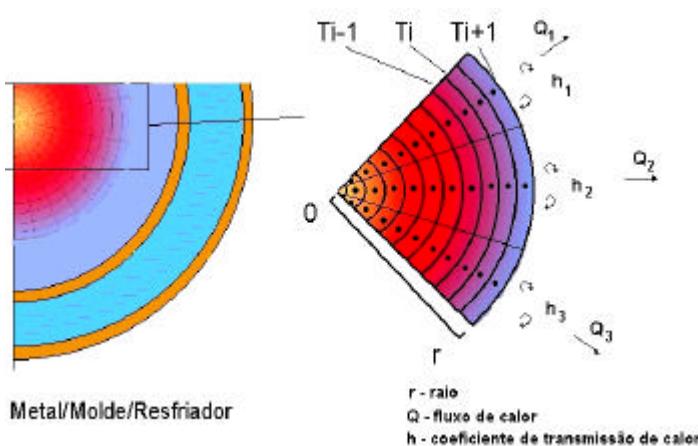
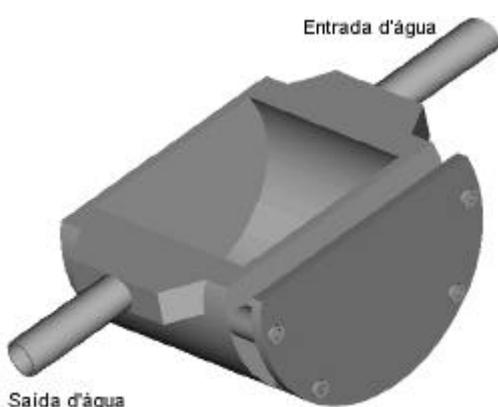


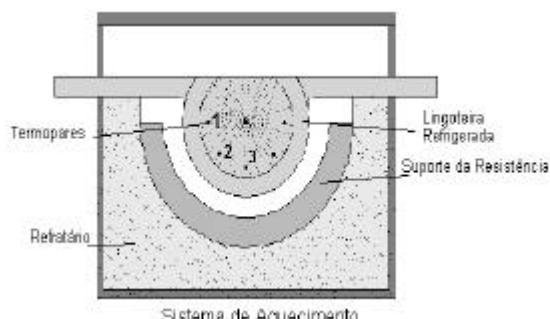
Figura 4 - Malha de diferenças finitas para o sistema metal/molde.

solidificação e posteriormente, confrontar com os perfis de temperatura do modelo teórico (Santos,2001). O modelo matemático se mostrou capacitado e aferido para a quantificação do fluxo de calor em regime transitório em geometrias cilíndricas, tornando-se uma ferramenta adequada para modelagem numérica dos processos de fundição e lingotamento contínuo (Souza,2003). A determinação de  $h$  na variação angular para aplicação em modelos teóricos de solidificação permite que se analise com mais precisão os casos observados na prática.

### 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL



**Figura 5** - Lingoteira em aço inoxidável.



**Figura 6**- Conjunto sistema de aquecimento/lingoteira refrigerada.

Para análise experimental foram utilizadas as ligas de Sn-5%Pb, Sn-15%PB e Sn-20%Pb com superaquecimentos de 3% e 20% acima da temperatura *liquidus*. Utilizou-se uma lingoteira cilíndrica refrigerada em aço inoxidável como mostra a figura 5, com um sistema de aquecimento resistivo para o controle da temperatura de vazamento.

Para as análises macrográficas, os lingotes foram cortados no sentido transversal e as amostras foram retiradas da região central ao longo da seção longitudinal. O ataque químico utilizado foi uma solução com 55g de  $\text{FeCl}_3$  e 4 ml HCl para cada

150 ml de água, sendo empregado o procedimento padrão de preparação da superfície (lixamento até lixa # 600). Para as simulações com o modelo matemático, foram utilizadas as propriedades termofísicas das ligas SnPb com coeficiente de partição ( $K_0$ )= 0,0656 como mostra a tabela 1. Para obtenção dos perfis térmicos para a análise do processo de solidificação em lingotes cilíndricos horizontais, monitorou-se as temperaturas no metal por meio de um sistema de aquisição de dados dotado de um registrador microprocessado de 16 canais A/D.

Tabela 1- Propriedades da liga Sn-Pb

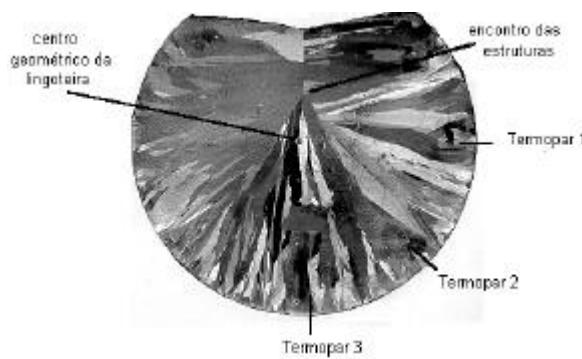
Propriedades	Sn-5%Pb	Sn-15%Pb	Sn-20%Pb	Eutético
$k$ sólido(W/mK)	65,4	62,2	60,5	54,4
$k$ líquido(W/mK)	32,8	32,5	32,3	31,7
$\rho$ sólido( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7502	7906	8108	8875
$\rho$ líquido( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7184	7551,7	7735,6	8434
$c$ sólido( $\text{J}/\text{kgK}$ )	216,4	207,3	202,8	185,4
$c$ líquido( $\text{J}/\text{kgK}$ )	253	240,9	234,8	211,9
$L$ ( $\text{J}/\text{kg}$ )	58985	55534	53809	47253
$T$ liquidus (°C)	225	210	203	-
$T$ solidus (°C)	183	183	183	-
$T$ eutético (°C)	-	-	-	183
$T$ fusão (°C)	232	232	232	-

Os termopares utilizados foram do tipo J (ferro-constantan), dispostos longitudinalmente ao longo da seção a uma distância de 5mm da interface metal/molde e eqüidistantes 45 graus nas posições 1, 2 e 3, conforme mostra o esquema da figura 6. O sistema de refrigeração da lingoteira

está disposto de forma que o fluxo de água garanta uma extração de calor essencialmente radial durante o processo de solidificação do lingote, sendo utilizada uma vazão de água com de 20 l/min controlada por um rotâmetro a uma temperatura de 25°C.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

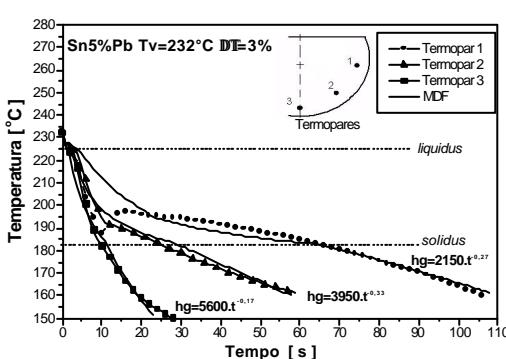
As análises macrográficas dos aspectos morfológicos das amostras obtidas revelaram uma estrutura totalmente colunar em todo o lingote, confirmando fluxo de calor radial sem apresentar transferência de calor na direção longitudinal da lingoteira. Na figura 7, é possível observar a macroestrutura bruta de solidificação para uma situação específica, sendo interessante ressaltar que o ponto de encontro das frentes de solidificação, que se deslocam da superfície para o centro da peça, não coincide com o centro geométrico da seção. Isto indica a existência de regiões ou zonas com diferentes características de extração de calor, principalmente quando se comparam as posições horizontal ( $0^\circ$ ) e vertical ( $90^\circ$ ). Assim sendo, o parâmetro da macroestrutura utilizado para correlação com parâmetros térmicos durante a solidificação foi o ponto de encontro das estruturas colunares no lingote, caracterizando o grau de assimetria existente no fluxo de calor na interface metal/molde. A transferência de calor apresenta-se mais efetiva na base, diminuindo à medida que se avança em direção ao topo, como mostra a figura 7 com as respectivas marcações dos encontros das estruturas. As características repetiram-se para os demais ensaios.



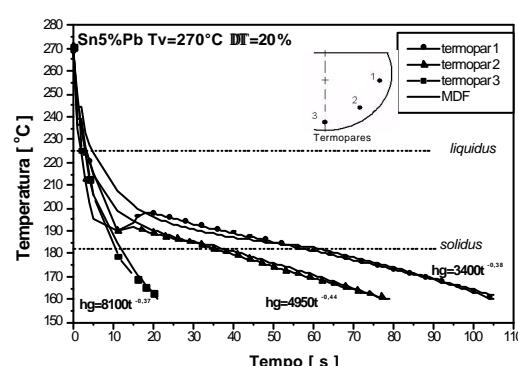
**Figura 7** – Macroestrutura da seção transversal: Sn-15%Pb.  $T_v = 217^\circ\text{C}$ .

O efeito da formação do *gap* de ar na interface metal/molde e consequente diminuição na extração de calor do metal é melhor visualizado por meio dos perfis de temperatura monitorizados em diferentes posições distanciadas 5 mm da interface metal/molde. Através dos confrontos das simulações do modelo proposto em M.D.F. com os perfis de temperatura obtidos experimentalmente, determinaram-se os diferentes coeficientes de transferência de calor ao longo do perímetro do cilindro. As simulações da base (ponto 3) foram realizadas com um raio de solidificação de 50mm, correspondente à média do encontro das estruturas, enquanto que para os demais pontos (1 e 2), utilizou-se 36mm. Os gráficos a seguir (figuras 8,9,10 e 11) mostram os perfis térmicos experimentais e a comparação com os perfis simulados para as ligas Sn-5%Pb e Sn-15%Pb, com 3% e 20% de superaquecimentos.

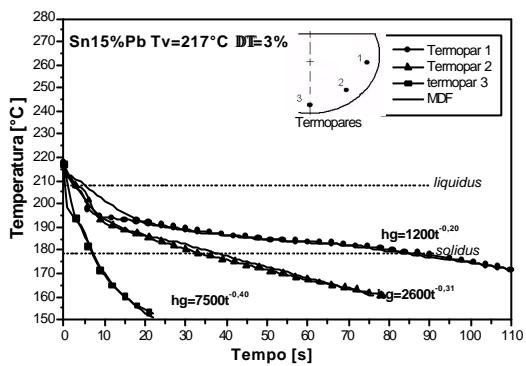
O efeito da formação do *gap* de ar na interface metal/molde e consequente diminuição na extração de calor do metal é melhor visualizado por meio dos perfis de temperatura monitorizados em diferentes posições distanciadas 5 mm da interface metal/molde. Através dos confrontos das simulações do modelo proposto em M.D.F. com os perfis de temperatura obtidos experimentalmente, determinaram-se os diferentes coeficientes de transferência de calor ao longo do perímetro do cilindro. As simulações da base (ponto 3) foram realizadas com um raio de solidificação de 50mm, correspondente à média do encontro das estruturas, enquanto que para os demais pontos (1 e 2), utilizou-se 36mm. Os gráficos a seguir (figuras 8,9,10 e 11) mostram os perfis térmicos experimentais e a comparação com os perfis simulados para as ligas Sn-5%Pb e Sn-15%Pb, com 3% e 20% de superaquecimentos.



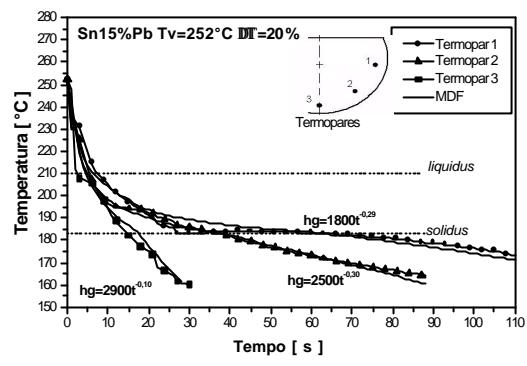
**Figura 8** – Perfis de temperaturas experimental e simulado: Sn-5%Pb.  $T_v= 232^\circ\text{C}$ .



**Figura 9** – Perfis de temperaturas experimental e simulado: Sn-5%Pb. Temperatura de vazamento  $270^\circ\text{C}$ .



**Figura 10 – Perfis de temperaturas experimental e simulado: Sn-15% Pb.**  
 $T_v = 217^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 11 – Perfis de temperaturas experimental e simulado: Sn15%Pb.**  
 $T_v=252^{\circ}\text{C}$ .

Com base nos gráficos, nota-se diminuição do contato térmico entre o metal e o molde à medida que há variação angular em direção ao topo. Os efeitos da contração do metal são amenizados na base pelo efeito gravitacional. Nos outros pontos, o contato térmico é mais efetivo enquanto o metal está no estado líquido, pois nesta fase, o metal encontra-se com maior fluidez, permitindo um melhor molhamento da superfície do molde. Os vazamentos com superaquecimentos mais elevados (20%), apresentaram taxas de resfriamento no líquido mais elevadas, quando comparadas com as taxas de resfriamento do líquido com menores superaquecimentos (3%). A tabela 2 mostra as expressões determinadas para os coeficientes de transferência de calor transitório ( $h$ ), para as ligas estudadas e nas condições estabelecidas. O formato da equação é uma exponencial na forma:

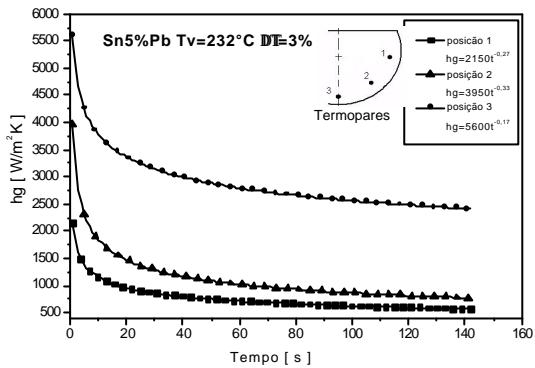
$$h=a \cdot t^n$$

onde:  $t$  é o tempo [s] e  $a$  e  $n$  são constantes dependentes do sistema metal/molde e das condições de solidificação.

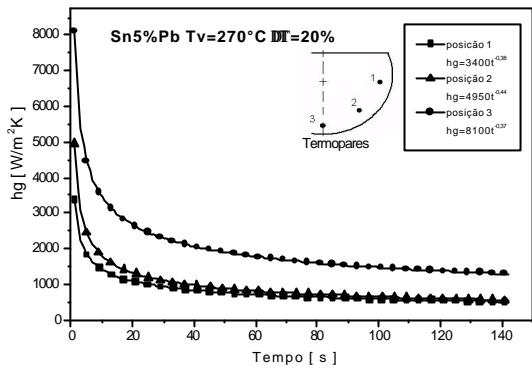
Tabela 2. Equações dos coeficientes transitórios de transferência de calor

Posições	Sn-5%Pb		Sn-15%Pb	
	$T_v=232^{\circ}\text{C}$	$T_v=270^{\circ}\text{C}$	$T_v=217^{\circ}\text{C}$	$T_v=252^{\circ}\text{C}$
1 (lateral)	$h=2150 \cdot t^{-0.27}$	$h=3400 \cdot t^{-0.38}$	$h=1200 \cdot t^{-0.20}$	$h=1800 \cdot t^{-0.35}$
2 (45°)	$h=3950 \cdot t^{-0.33}$	$h=4950 \cdot t^{-0.44}$	$h=2600 \cdot t^{-0.31}$	$h=2500 \cdot t^{-0.30}$
3 (base)	$h=5600 \cdot t^{-0.17}$	$h=8100 \cdot t^{-0.37}$	$h=7500 \cdot t^{-0.40}$	$h=2900 \cdot t^{-0.10}$

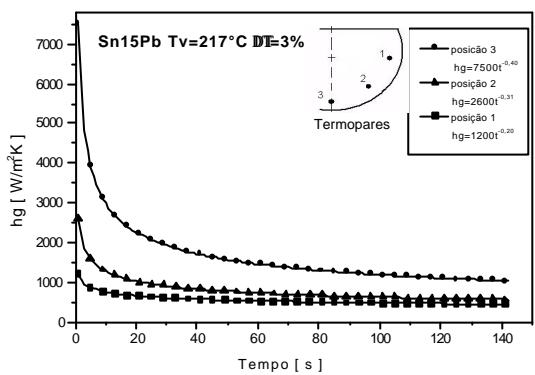
A variação dos coeficientes de transferência de calor em função do tempo é mostrada dos gráficos das figuras 12, 13, 14 e 15. Fica evidente, através dos gráficos, a variação do fluxo de calor ao longo do perímetro da seção do cilindro posicionado horizontalmente. Observa-se que a diferença do fluxo de calor ocorre com maior intensidade entre as posições 3 e 2, correspondente a base (90°) e a posição a 45° em direção ao topo, do que entre a posição 2 e a posição 1 (lateral). Vale também ressaltar que esta diferença diminui à medida que se aumenta o superaquecimento do líquido. Com relação às macroestruturas, observaram-se diferenças nas distâncias de encontro das estruturas de solidificação em relação à base, conforme mostra a tabela 3. Analisando-se o fluxo de calor na base da lingoteira, responsável pela formação da estrutura colunar em direção ao topo, nota-se que existe uma certa tendência em diminuir a distância dos encontros das estruturas em relação à base, à medida que se aumenta o superaquecimento do metal líquido.



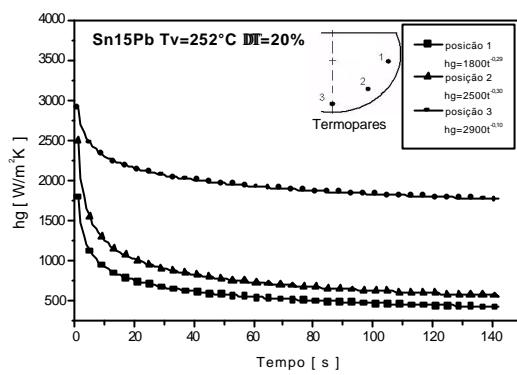
**Figura 12** – Variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo: Sn-5%Pb.  $T_v = 232^\circ\text{C}$ .



**Figura 13** – Variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo. Sn-5%Pb:  $T_v = 270^\circ\text{C}$ .



**Figura 14** – Variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo: Sn-15%Pb.  $T_v = 217^\circ\text{C}$ .

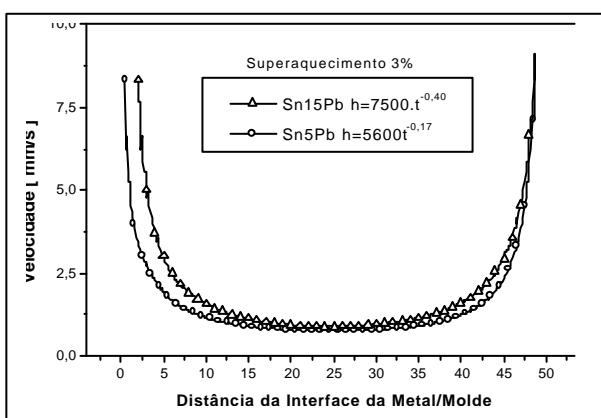


**Figura 15** – Variação do coeficiente de transferência de calor com o tempo: Sn-15%Pb.  $T_v = 252^\circ\text{C}$ .

**Tabela 3.** Distância dos encontros das estruturas de solidificação em relação à base da interface metal/molde

Liga	Sn-5%Pb	Sn-5%Pb	Sn-15%Pb	Sn-15%Pb
$T_v$	$232^\circ\text{C}$	$270^\circ\text{C}$	$217^\circ\text{C}$	$252^\circ\text{C}$
Distância da Base	55mm	51mm	47mm	44mm

Considerando-se que o contato térmico é mais efetivo na base, plotou-se os gráficos das velocidades das isotermas *liquidus* teóricas, obtidas a partir de simulações do modelo matemático proposto, com as equações do coeficiente de transferência de calor em regime transitório. As velocidades das isotermas *liquidus* se apresentaram maiores no início do processo de solidificação devido à influência da interface metal/molde e no final da solidificação radial por causa do efeito terminal do lingote. No final do processo de solidificação cilíndrica, a relação área de contato do metal sólido e o volume de material líquido é bem menor em relação à metade do raio do lingote, propiciando desse modo, uma extração de calor por condução de forma mais

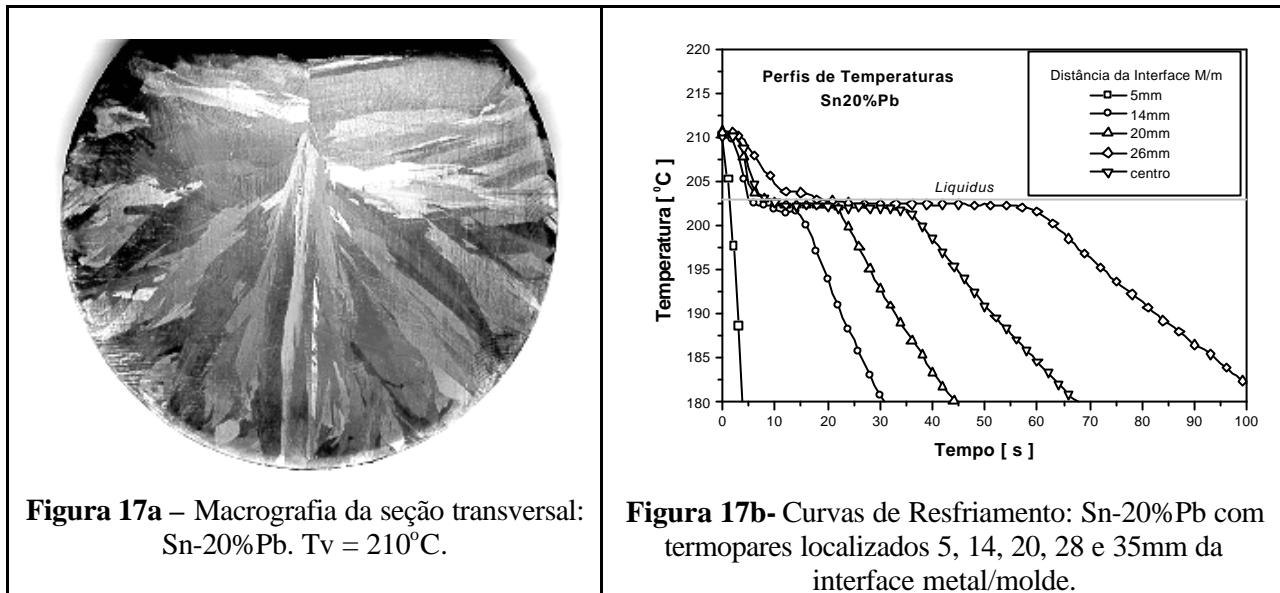


**Figura 16** - Velocidade da isoterma liquidus para as ligas Sn5%Pb e Sn15%Pb com superaquecimento de 3%.

eficiente, tendendo a velocidades infinitas (Santos,1998). As velocidades das isotermas simuladas numericamente também se apresentaram maiores para ligas com maior teor de chumbo (figura 16).

Para a análise experimental das velocidades de solidificação e gradientes de temperatura, realizou-se um vazamento da liga Sn-20%Pb com termopares dispostos ao longo da direção de deslocamento da frente de solidificação a partir da base, conforme mostram as curvas de resfriamento do gráfico da figura 17b, nas posições 5, 14, 20, 28 e 35mm a partir da interface metal/molde.

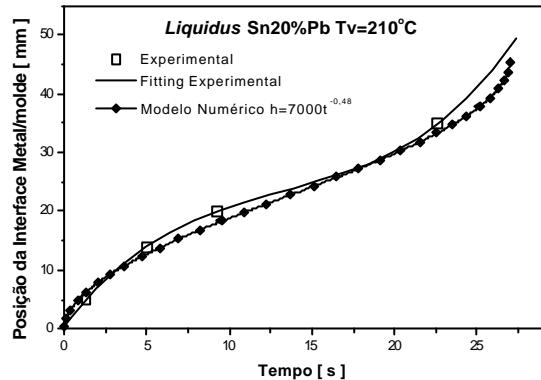
Com base nos perfis a 5mm da interface metal/molde, determinou-se  $h$  através do método de confronto teórico-experimental resultando na equação  $h=7000t^{-0,48}$ .



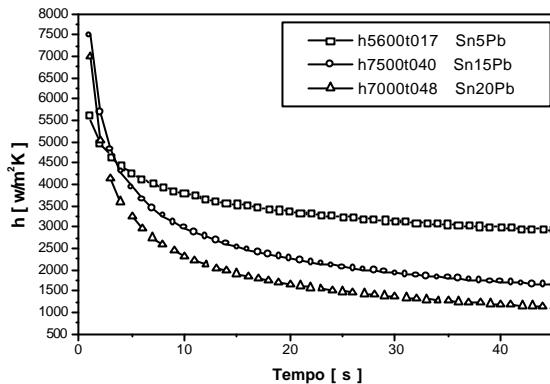
A figura 18 mostra a evolução da isoterma *liquidus*, teórica e experimental, ao longo do processo de solidificação a partir da base até o encontro das estruturas (46mm). Observa-se boa concordância, sendo que a equação *fitting* de 3º grau foi a que melhor representou os efeitos da interface metal/molde e do final da solidificação em geometrias cilíndricas. A figura 19 mostra o comportamento do coeficiente de transferência de calor na base da interface metal/molde para as três composições químicas das ligas Sn-Pb.

Nota-se que, quanto maior é a porcentagem de soluto, maior é a variação do coeficiente de transferência de calor. Nos instantes iniciais (tempos < 4s), a temperatura não atingiu a isoterma *liquidus*, não ocorrendo dessa forma transformação de fase. O metal estando líquido, tem um melhor contato térmico, pois não passou por estágios de formação de casca e consequente formação de gap de ar na interface metal/molde. A liga de menor teor de chumbo apresenta menor  $h$  nos instantes iniciais em relação às outras ligas. Isto pode ser explicado pela alteração da fluidez. Segundo Ragone et al (1956), o aumento do teor de Pb até 5% tende a diminuir a fluidez, voltando a aumentar com aumento do teor de soluto à medida que tende à composição do eutético. O aumento da fluidez aumenta a molhabilidade na interface metal/molde, aumentando desse modo o fluxo de calor.

Em relação ao estado sólido, vê-se que as ligas com maiores teores de chumbo apresentam um menor coeficiente de transferência de calor. Nas ligas do sistema Sn-Pb, quanto maior o teor de soluto, maior é a contração do metal, segundo as correlações das densidades do estado sólido com as do estado líquido. Por outro lado, Santos (Santos,2001) afirma que o perfil de  $h$  aumenta com o aumento do comprimento da zona pastosa de forma que o líquido interdentrítico melhora o contato na interface metal/molde, melhorando assim, o fluxo de calor.



**Figura 18-** Evolução da isoterma liquidus, teórico e experimental, a partir da base: Sn-20%Pb.  
 $T_v=210^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 19 -** Variação de  $h$  para as ligas Sn-Pb.  
Superaquecimento 3%.

## 5. CONCLUSÕES

A análise do processo de solidificação em geometria cilíndrica horizontal com a determinação dos coeficientes de transferência de calor no perímetro da seção do lingote propiciou avanços em termos de informações mais precisas para os processos de fundição e de lingotamento contínuo horizontal. Dentro deste estudo, pode-se concluir que:

- a variação do fluxo de calor na interface metal/molde depende da contração do metal, do efeito gravitacional, da composição química e do superaquecimento, os quais também influenciam nas estruturas morfológicas do lingotes.
- o fluxo de calor é mais efetivo na base diminuindo em direção ao topo.
- a expressão para o coeficiente de transferência de calor em regime transiente como exponencial,  $h=a.t^{-n}$ , mostrou-se adequada para caracterizar o fluxo de calor em geometrias cilíndricas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Hadden, R., Indyk, B., 1979, "Heat Transfer Characteristics in Closed Head Horizontal Continuous Casting ", Solidification and Casting of Metals, The Metals Society, London, Inglaterra, pp.250-255.
- Souza, E.N., Santos, C.A., Spim, J. A., Garcia, A., 2002, "Correlação entre Parâmetros Térmicos e Microestruturas de Solidificação no Lingotamento Contínuo Horizontal de Ligas Não-Ferrosas", Anais XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Natal, Brasil.
- Huang, H., Hill, J.L., Suri, V.K, Berry, J.T., Pehlke, R.D., 1991,"Modeling the Variation and Distribution of the Air Gap Heat Transfer Coefficient in Shaped Castings", Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process V, The Minerals, Metals e Materials Society, pp.65-70.
- Souza, E.N., Cheung, N., Santos, C.A., Garcia, A., 2003, Análise da Variação do Coeficiente de Transferência de Calor Metal/Molde na Solidificação Horizontal de Lingotes Cilíndricos, Anais do 58º Congresso Internacional da ABM, Rio de Janeiro, pp.2610-2619.
- Incropera, F.P.; Dewitt, D.P., 1990, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3 ed. John Wiley & Sons, Singapore, 419p.
- Santos, C.A., Quaresma, J.M.V., Garcia, A., 2001, "Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings", Journal Alloys Compounds, n.319,pp.174-186.

Santos, R.G., Garcia, A., 1998, "Thermal Behaviour During the Inward Solidification of Cylinders and Spheres and the Correlation with Structural Effects", Int. J. Cast Metals Res., Vol 11, pp.187-195.

Ragone, D.V., Adams, C.M., Taylor, H.F., 1956, "A New Method for Determining the Effect of Solidification Range on Fluidity", Transactions AFS, Vol 64, pp.653-657.

## Numerical and Experimental Analysis of Thermal Parameters and Structures of Sn-Pb Alloys Solidified in Horizontal Cylindrical Molds

**Eduardo Netto de Souza**  
edusouza@fem.unicamp.br

**Newton Silva Santos**  
newton@fem.unicamp.br

**Carlos Alexandre dos Santos**  
alex@fem.unicamp.br

**Amauri Garcia**  
Faculty of Mechanical Engineering, State of University of Campinas, UNICAMP  
Campinas, SP, Brazil  
Amurig@fem.unicamp.br

*In continuous casting and conventional foundry processes metal/mold heat transfer coefficients are variable along the perimeter of the cylindrical geometry, generating asymmetrical as-cast structures and consequently, different behavior of these products under strain, stress and heat treatments. To control the structure of cast alloys it is necessary to understand the heat flow mechanisms and to characterize the heat transfer coefficients during solidification. The present article focuses on the relationships between solidification conditions and as-cast structures of Sn-Pb alloys. The casting assembly used in solidification experiments was designed to ensure a dominant unidirectional radial heat flow during solidification. A cooled stainless steel chill was used, with the heat-extracting surface being polished. Experiments were performed with Sn-5wt%Pb, Sn-15wt%Pb and Sn-20wt%Pb alloys. Temperatures in the casting were monitored during solidification via the output of a bank of type J thermocouples (1.6 mm diameter) accurately located with respect to the metal/mold interface. The effect of liquid metal superheat on heat transfer coefficient was also investigated by using two different degrees of superheat: 3% and 20% above liquidus temperature. The method of calculation of metal/mold heat transfer coefficient ( $h$ ) was based on temperature histories at interior points of the casting together with mathematical models of heat transfer during solidification by solving the IHCP (Inverse Heat Conduction Problem). The inverse problem consists of estimating the boundary heat transfer coefficient at the metal/mold interface from measured environment and metal temperatures. The results permitted the establishment of expressions of the metal/mold heat transfer coefficients as a power function of time, for different alloy compositions and melt superheats. Fitting expressions have been developed describing thermal control parameters, i.e., position of liquidus isotherm ( $P_L$ ) and tip growth rate ( $V_L$ ), during unsteady-state solidification of one-dimensional cylindrical ingots.*

**Keywords:** solidification, foundry, heat flow model, horizontal continuous casting, cylindrical molds.