



SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DE LIGAS DO SISTEMA Sn-Pb EM MOLDES DE COBRE E DE AÇO COM DUAS DIFERENTES ESPESSURAS

André Oliveira Kishi, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 kishi@ufpa.br

Denílson Santos Fernandes, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 dsantos@ufpa.br

Johnyson Pereira Feitosa, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 jfeitosa@ufpa.br

José Maria do Vale Quaresma, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 jmdovale@ufpa.br

Resumo

A solidificação unidirecional é um importante arranjo experimental quando se trata de prever estruturas que possam vir a estar relacionadas aos parâmetros térmicos envolvidos na solidificação metálica, tais como: a taxa de resfriamento, a velocidade de solidificação, mas principalmente o coeficiente de transferência de calor tanto da interface metal/molde como da interface molde/ambiente. Neste trabalho utilizou-se um modelo numérico baseado na técnica de diferenças finitas aplicada em um volume de controle e o método que confronta os perfis térmicos experimentais com aqueles obtidos via modelo numérico, esta técnica tem-se constituído como uma ferramenta imprescindível na confiabilidade e precisão dos resultados. A história térmica do processo experimental foi registrada através de termopares instalados nas regiões de interesse na massa de metal líquido. Os resultados assim encontrados permitiram a avaliação exata da variação do coeficiente de transferência de calor nas interfaces já antes citadas. O sistema de fundição com fluxo de calor unidirecional foi constituído com paredes de cobre e de aço com as espessuras 6mm e 50 mm para a solidificação de ligas do sistema Sn-Pb.

Palavras Chave: *condutância térmica molde/ambiente e térmica metal/molde; condições de solidificação; solidificação unidirecional.*

1. INTRODUÇÃO

Fusão e solidificação são processos de transformação de fases que são acompanhados pela absorção ou liberação de energia térmica. As características essenciais e comuns do sistema, compreendem a mudança de fase sólido/líquido (S/L) (fusão ou solidificação) no qual existe um movimento limite que separa as duas fases de diferentes propriedades termofísicas e onde energia térmica é absorvida ou liberada.

O maior problema na fusão é adicionar, e na solidificação é extrair, o calor latente da transformação de fase de uma maneira controlada. Em geral, o calor sensível e o calor latente do sistema é adicionado ou extraído por convecção ou radiação entre suas fronteiras. Por exemplo, durante a solidificação de uma peça fundida ou de um lingote o superaquecimento no metal líquido e o calor latente de fusão liberados na interface S/L são transferidos através do metal solidificado,

da interface metal molde (M/M) e do molde, encontrando em cada etapa uma certa resistência térmica. Como o metal contrai quando solidifica, um acúmulo de ar pode ser formado na interface M/M e o metal pode oxidar [Viskanta, R., 1988].

A solidificação é, portanto, um processo que envolve a transferência de calor, e a velocidade que esta ocorre, interfere diretamente nas propriedades do metal solidificado.

O presente trabalho estuda o comportamento dos coeficientes de transmissão de calor e dos perfis térmicos nas interfaces metal/molde e molde/ambiente de ligas do sistema Sn-Pb por dois métodos: experimental e matemático.

Dada a importância da solidificação como meio de produção, e da necessidade da obtenção de materiais destinados a atender a crescente demanda industrial que vai desde a fabricação de semicondutores a monocristais de alta precisão, é que se tem direcionado esforços de pesquisa nesta área, cujos resultados tem trazido relevantes contribuições tecnológicas à engenharia de materiais e a indústria, pois através do mesmo é possível a construção de um banco de dados para a liga em questão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aparato experimental:

Na Figura 1, mostra esquematicamente o aparato experimental que foi construído para auxiliar na determinação dos coeficientes de transferência de calor da interface metal/molde.

Foram escolhidos cobre eletrolítico e aço SAE 1020, para a construção da única parede do sistema que atuará como absorvedor de calor de forma a unidirecionalizar a frente de solidificação minimizando consideravelmente a análise a ser feita, seja no aspecto numérico seja no aspecto da microestrutura resultante, as outras paredes foram todas construídas com material isolante a base de sílica para garantir a máxima carga térmica retirada através da parede metálica (ou molde) e mínima através das paredes isolantes. A posição do orifício cônico na tampa superior próximo da parede oposta à parede metálica (molde) tem a finalidade de minimizar a turbulência causada devido ao vazamento de metal líquido, que seria maior se o fluxo de metal líquido ocorresse mais próximo à parede metálica. Foram utilizadas duas espessuras para as paredes metálicas: ($x = 6$ e 50mm), mas o volume da câmara de vazamento permanece constante durante todo o processo.

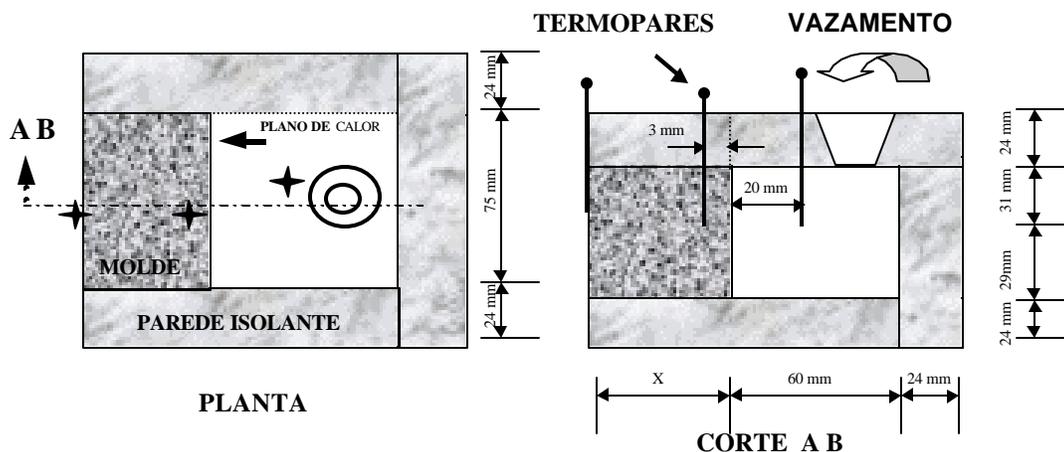


Figura 1. Esquema ilustrativo do sistema Metal / Molde. (a) Vista Superior evidenciando o plano de calor e a espessura do Molde; (b) Vista Lateral do sistema com ênfase para a posição dos Termopares , Funil e Câmara de Vazamento.

A escolha do sistema Sn-Pb na investigação da variação de h_f deve-se ao fato do mesmo ser um eutético simples, apresentar temperaturas líquidas relativamente baixas, fato que facilita as

operações de fusão e posterior vazamento; apresentar intervalos de solidificação bastante variáveis, característica que permite investigar com melhor precisão o espectro de resultados e, o mais importante, as propriedades termofísicas das ligas hipoeutéticas são conhecidas (Tabela 2), quanto as características dos moldes, podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Características do material do molde (Hammouda, R.M. et alli, 1992).

Material Sólido	k (W / m K)	c (J / kg K)	ρ (kg / m ³)
Aço	46	527	7 860
Cobre	398	384	8 960

Tabela 2. Características das ligas Sn-10%Pb) (Hammouda, R.M. et all, 1992).

c_L J/kgK	c_S J/kgK	ρ_L kg/m ³	ρ_S kg/m ³	k_L W/mK	k_S W/mK	L J/kg	T_S °C	T_L °C	T_f °C	α_S m ² /s	α_L m ² /s
243	209	7480	7480	33	63	56140	183	215	232	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$

2.2. Interface Molde/Ambiente:

O valor da resistência térmica na interface molde ambiente (M/A) é dada por:

$$R_{M/A} = \frac{1}{(h_R + h_C)A_T} \quad (01)$$

onde, h_R = coeficiente radiativo [W/m².K]; h_C = coeficiente de convecção do gás [W/m².K]; e A_T = área de troca térmica [m²].

Para o cálculo do coeficiente radiativo tem-se que:

$$h_R = \sigma \cdot \epsilon (T_{EM} + T_0)(T_{EM}^2 + T_0^2) \quad (02)$$

onde, σ = constante de Stefan-Boltzman [=5,672x10⁻⁸ W/m².K⁴]; ϵ = emissividade do material do molde ; T_{EM} = temperatura externa da superfície do molde [K]; e T_0 = temperatura ambiente [K].

Para o cálculo do coeficiente de convecção sabe-se que:

$$h_C = \frac{k_{gas} N_u}{\chi} \quad (03)$$

na qual:

$$N_u = C(G_R \cdot P_R)^n, \quad \text{Número de } Nusselt \quad (04)$$

$$G_R = \frac{g \cdot \gamma \cdot \chi^3 (T_{EM} - T_0)}{\eta_{gas}^2} \rho_{gas}^2, \quad \text{Número de } Grashof \quad (05)$$

$$P_R = \left[\frac{\eta}{k} \cdot c \right]_{gas}, \quad \text{Número de } Prandtl \quad (06)$$

onde, η = viscosidade dinâmica do fluido de refrigeração [kg/m.s]; c = calor específico do fluido de refrigeração [J/kg.K]; ρ_{gas} = massa específica do fluido de refrigeração [kg/m³]; k = condutividade do fluido de refrigeração [w/m.K]; χ = dimensão característica da superfície, referente ao percurso feito pelo fluido de refrigeração ao passar pela superfície do corpo [m]; γ = coeficiente de expansão

térmica volumétrica do fluido de refrigeração, que para gases pode ser aproximado por $(\gamma = 1/T_0)[K^{-1}]$; e $g =$ aceleração da gravidade $[9,81 \text{ m/s}^2]$.

Para um estudo onde o fluxo de fluido pode ser considerado laminar e a superfície do corpo na posição vertical, o valor do produto $[G_R.P_R]$ deverá variar no intervalo $[10^4 \text{ a } 10^9]$ e para o cálculo do Número de Nusselt $[C = 0,59; n = 0,25]$. Por outro lado, as propriedades do fluido de refrigeração, como o ar, variam com a temperatura [Benjan, A.,1993; Poirier, D.R.,1994].

Considerando-se que a temperatura externa da parede do molde aumenta consideravelmente durante o processo, para a interface molde/ambiente, pode-se estimar por cálculos analíticos o valor de h_{amb} , sendo dado por:

$$h_{amb} = h_{rad} + h_{conv} \quad (07)$$

onde:

h_{amb} = coeficiente de transferência de calor da interface molde/ambiente dado em $W/m^2.K$;

h_{rad} = coeficiente de transferência de calor por radiação;

h_{conv} = coeficiente de transferência de calor por convecção.

2.3. Interface Metal/Molde

A transferência de calor na interface metal/molde, devido sua importante influência na velocidade de solidificação e nas taxas de resfriamento de fundidos, tem sido alvo de inúmeras pesquisas. Vários trabalhos foram desenvolvidos objetivando caracterizar o mecanismo físico da transferência de calor entre as superfícies de contato. [Prates, M.A./Biloni, H.,1972; Ho, K./Pehlke, R.D.,1984; Prabhu et all,1992; Wu et all,1992]. Na segunda metade da década de 90, A. Garcia e seus colaboradores utilizando-se da Equação Geral do Calor na qual aplicaram aproximações por diferenças finitas, e utilizando-se a analogia físico numérica entre um sistema térmico e um sistema elétrico na qual se transforma a malha de diferenças finitas de elementos térmicos à elementos elétricos; chega-se à equação (08) [Quaresma,J.M.V., 1999]; [Spim Jr., J.A. & Garcia, A., 1995]; [Santos, C.A.; Spim Jr., J.A.; Quaresma, J.M.V. & Garcia, A., 1996].

$$T_i^{n+1} = \left(\frac{\Delta t}{\tau_{Qi}} \right) T_{i+1}^n + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_{QDi}} \right) T_i^n + \left(\frac{\Delta t}{\tau_{Di}} \right) T_{i-1}^n \quad (08)$$

onde:

$$t_{Qi} = C_{ii} (R_{t_{i-1}} + R_{t_i}) \quad (\text{carga}) \quad (08a)$$

$$t_{Di} = C_{ii} (R_{t_i} + R_{t_{i+1}}) \quad (\text{descarga}) \quad (08b)$$

$$t_{DQi} = \frac{t_{Di} + t_{Qi}}{t_{Di} \cdot t_{Qi}} \quad (\text{carga e descarga}) \quad (08c)$$

Na analogia com circuitos elétricos, o acúmulo de energia do elemento finito “i” é caracterizado pela sua capacidade térmica dada por:

$$C_{ti} = A_t \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (09)$$

onde: $A_t \cdot \Delta x_i \rightarrow$ corresponde ao volume do elemento finito “i” ;

$C_{ti} \rightarrow$ é a capacidade térmica do elemento “i”.

O fluxo de calor através da interface metal/molde é dado por:

$$q = h_i \cdot A_t (T_{\text{metal}} - T_{\text{molde}}) \quad (10)$$

onde A_t é a área de troca térmica [m^2]; sendo que o valor do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i) é variável durante o processo, necessitando de métodos experimentais particulares para sua determinação, dentre os quais merecem destaque o do Confronto de Perfis Térmicos Teóricos / Experimentais via Computador, utilizado ao longo do trabalho.

A resistência térmica metal/molde (R_i) depende de uma análise do conjunto de resistências térmicas atuantes no sistema metal/molde, sendo determinada por:

$$R_i = \frac{1}{A_t \cdot h_i} \quad (11)$$

A Figura 2 mostra as interfaces citadas em 2.2 e 2.3. [Quaresma, J.M.V., 1999]

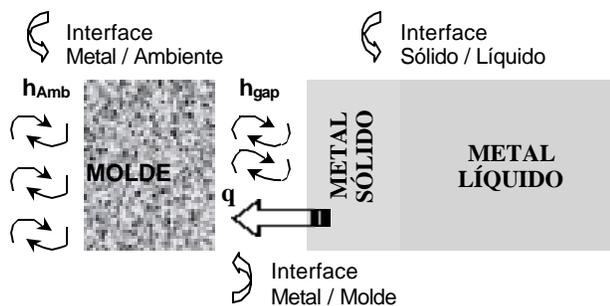


Figura 2. Ilustração das interfaces Metal/Molde e Molde/Ambiente [Quaresma, J.M.V., 1999]

A determinação correta de h_i , tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores [Garcia, A./ Clyne, T.W., 1983; Nishida et al., 1986; Santos, C. A., 1996; Quaresma J. M. V., 1999]. A disponibilidade de valores de h_i na literatura é escassa, e as características da alta diversidade do sistema metal/molde implicam na necessidade do desenvolvimento de metodologias para sua determinação experimental. Decorre disto a disponibilidade de um banco de dados com valores de h_i ser fundamental na modelagem matemática do processo de solidificação, seja para simular operações de fundição, seja para otimizar o processo através de modificações operacionais. O confronto dos resultados teóricos / experimentais permitirá o levantamento de valores de h_i que poderão ser extremamente úteis em futuras análises de problemas de solidificação, tanto a nível acadêmico, quanto em aplicações na indústria de fundição.

3. ANÁLISE, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras (3 e 4), em 3a, 3b, 4a e 4b encontram-se representados os perfis térmicos experimentais e simulados para ligas de Sn-10%Pb, onde pode-se notar que para espessura de 6mm ocorre uma saturação imediata do molde; e para espessura de 50mm observa-se que a saturação do molde ocorre de modo mais progressivo resultando em um menor tempo de solidificação. A simples visualização do comportamento das curvas em cada gráfico permite que se conclua que a unidirecionalidade na extração de calor cresce com a maior espessura do molde, fato retratado na diminuição gradativa do tempo para se obter o volume experimental totalmente solidificado, associado à forma da curva que vai se tornando gradualmente ascendente no molde e descendente no metal à medida que o molde fica mais espesso; para ambos os tipos de materiais do molde.

Por outro lado, a comparação dos perfis térmicos indicam que para moldes de paredes finas tem-se boa molhabilidade do molde pelo metal provocada pelo contato mais íntimo entre eles do início ao fim do processo, denotando que a camada inicial solidificada foi muito delgada e não se

opôs a pressão metalostática do metal líquido remanescente, que a empurra de encontro ao molde, provocando seu aquecimento brusco sem o conseqüente resfriamento do metal.

As Figuras 3c e 4c estão representados os comportamentos de h_i evidenciando-se a correlação entre as curvas para as duas espessuras experimentadas, nas quais os coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde variam com o tempo de forma bastante acentuada nos instantes iniciais da solidificação.

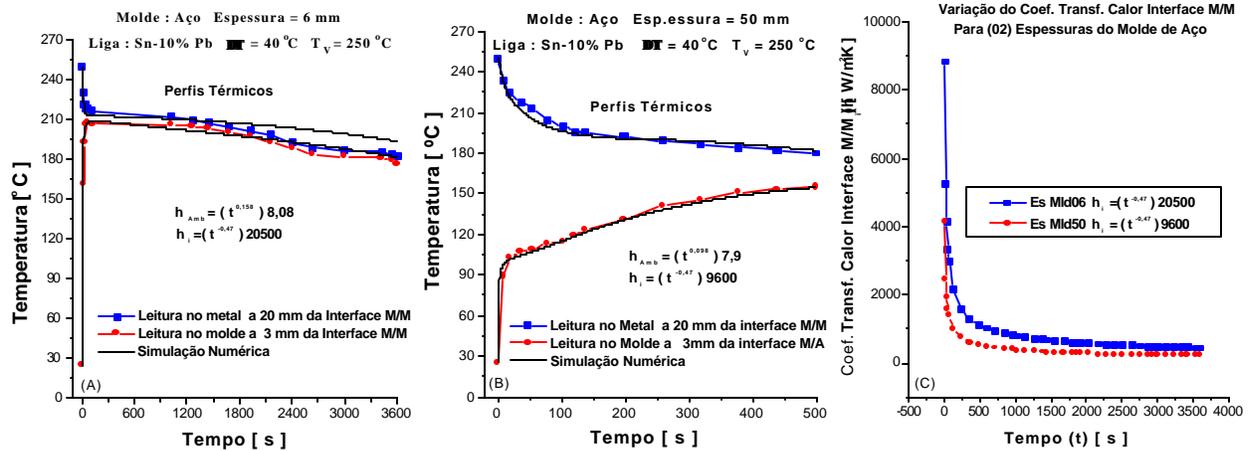


Figura 3. Confronto de perfis térmicos teóricos e experimentais para liga Sn-10%Pb vazada em moldes de aço com espessuras (a) 6 mm, (b) 50 mm, e a correlação das curvas que representam h_i (c) para duas espessuras de molde.

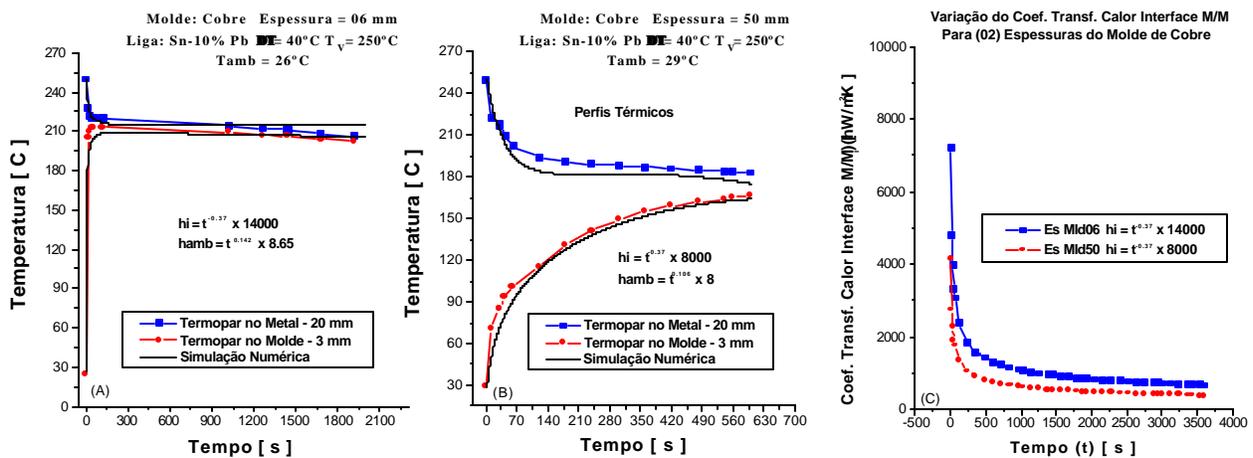


Figura 4. Confronto de perfis térmicos teóricos e experimentais para liga Sn-10%Pb vazada em moldes de cobre com espessuras (a) 6 mm, (b) 50 mm, e a correlação das curvas que representam h_i (c) para duas espessuras de molde.

A análise das curvas ilustradas nas Figuras 5 e 6, denotam ser o cobre um agente que melhor conduz o calor do que o aço, como esperado. Considerando a Figura 5, pode ser visto que espessura menores saturam-se termicamente quase que instantaneamente, isto pode ser indicativo de um elevado grau de molhabilidade entre o metal e o material do molde além de uma forte direcionalidade na extração de calo, gerando no instante inicial uma camada de metal solidificado delgada que é incapaz de resistir a pressão metalostática que o metal líquido remanescente é capaz de exercer sobre ela e leva-la de volta para próximo da parede do molde minimizando consideravelmente a espessura do acúmulo de ar formado. Este fato fica melhor ilustrado quando se avalia as curvas da Figura 5c, onde pode ser visto que o valor de h_{AMB} para o molde menos espesso é maior e portanto é menor a resistência ao transporte de energia térmica. Esta análise permite

concluir que moldes de paredes grossas podem gerar um acúmulo de ar robustos (largos) e como consequência apresentarem baixos valores de coeficientes de transferência de calor se comparados a moldes de paredes finas.

Quando se avalia o comportamento das curvas das Figuras 5a e 6a, percebe-se que a curva que representa a evolução da temperatura na interface molde/ambiente, para o molde de cobre (6a), registra instantaneamente temperaturas maiores do que as registradas para o molde de aço (5a), este fato leva ao entendimento de que a energia térmica flui com mais facilidade ao longo da espessura do molde. Ainda considerando este conjunto de curvas, pode ser observado que a saturação térmica ocorre de forma instantânea para os dois moldes, sendo ligeiramente mais crítico para o molde de cobre.

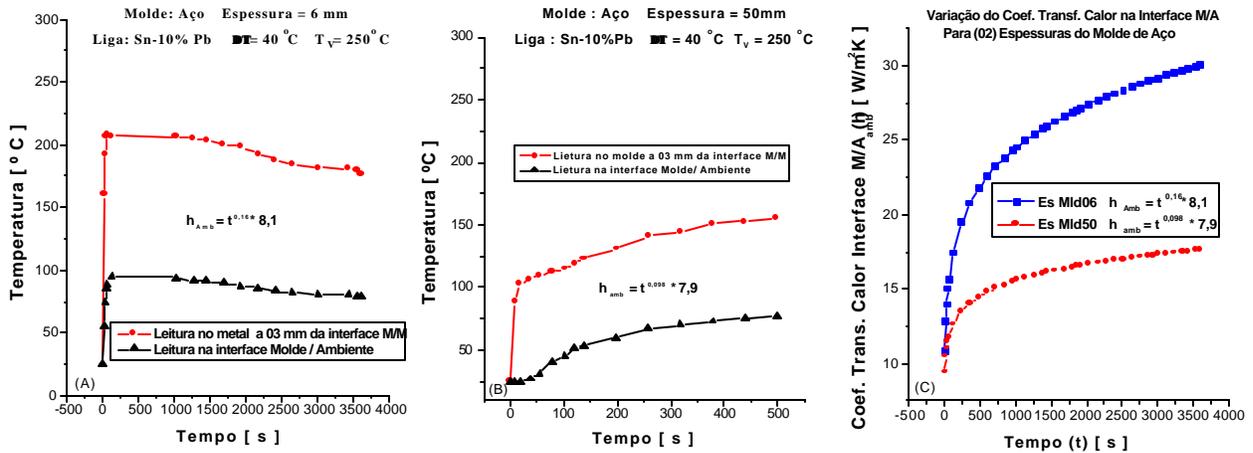


Figura 5. Confronto de perfis térmicos experimentais para liga Sn-10%Pb vazada em moldes de aço com espessuras (a) 6 mm, (b) 50 mm, e a correlação das curvas que representam h_{amb} (c) para duas espessuras de molde.

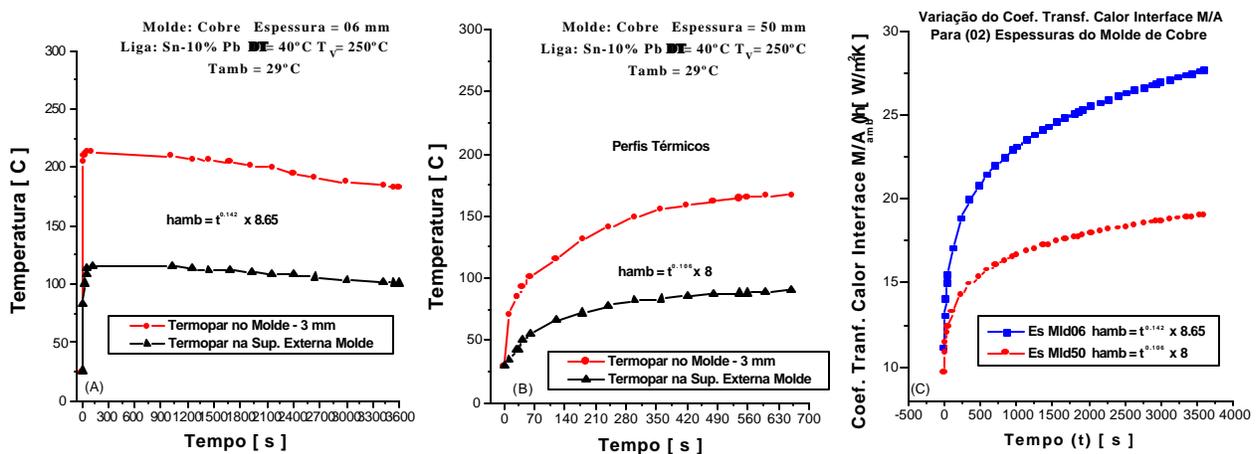


Figura 6. Confronto de perfis térmicos experimentais para liga Sn-10%Pb vazada em moldes de cobre com espessuras (a) 6 mm, (b) 50 mm, e a correlação das curvas que representam h_{amb} (c) para duas espessuras de molde.

4. CONCLUSÕES

A quantidade de calor retirada do metal pelo molde é maior para moldes mais espessos, sendo que o aquecimento destes moldes ocorre de maneira mais suave do que no caso dos moldes menos espessos, em decorrência tanto da melhor molhabilidade quanto de menores acúmulos de ar que ocorrem para os moldes de menores espessuras, tornando evidente a considerável influência da espessura do molde nos valores dos coeficientes de transferência de calor na interface M/M.

O molde mais espesso permite um escoamento mais fácil de energia térmica em menos tempo, aquecendo-se e resfriando o metal gradualmente. Estas condições garantem estabilidade ao molde, ao mesmo tempo em que se permite um evolução mais rápida da camada em solidificação.

No que se refere à espessura pode ser visto que tanto para a menor espessura (6 mm) como para a maior (50 mm) obtém-se perfis de h inferiores para o molde de cobre em relação aos perfis apresentados pelo molde de aço. Como consequência o acúmulo de ar formado pelo molde de cobre será maior que aqueles formados pelo molde de aço e com isso fica evidente que o molde de cobre se deixa molhar melhor, nos instantes iniciais, do que o molde de aço, pelo metal vazado.

5. AGRADECIMENTOS

Em especial ao querido Orientador Prof. Dr. José Maria do V. Quaresma e ao grupo GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais-DEM/UFPA).

6. REFERÊNCIAS

- Benjan, A., 1993, "Heat Transfer, John Wiley & Sons", New York.
- Garcia, A., Clyne, T.W. and Prates, M., 1979, "Mathematical Model for the Unirectional Solidification of Metals: Ii. Massive Molds", Metallurgical Transactions B, Vol. 10, pp. 85 – 92.
- Poirier, D.R. & Poirier, E.J, 1994, "Heat Transfer Fundamentals for Metals Casting, The Minerals, Metals and Materials Society".
- Prates, M.; Fissolo, J. & Biloni, H., 1972, "Heat Flow Parameters Affecting the Unidirecional Solidification of Pure Metals, Metallurgical Transactions", Vol. 73, pp.1419.
- Quaresma, J.M.V, Santos, C.A. and Garcia, A., 2000, "Correlation Between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 31A, pp. 3167 – 3178.
- Santos, C.A., Quaresma, J.M.V. and Garcia, A., 2000, "Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 319, pp. 174 – 186.
- Santos, C.A.; Spim Jr., J.A.; Quaresma, J.M.V. & Garcia, A., 1996, "Aplicação de um Modelo Numérico na Determinação Experimental da Condutância Térmica da Interface Metal/Molde em Sistemas Estáticos de Fundição", Anais do IX Seminário de Metais Não-Ferrosos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pp. 197-202.
- Spim Jr., J.A. & Garcia, A., 1995, "Modelagem Numérica da Solidificação Baseada na Analogia entre Sistemas Térmicos e Elétricos", Anais do 10º Congresso de Engenharia e Ciência dos Materiais – CIBECIMAT, Vol. 2, pp.594-597.
- Viskanta, R., 1988, "Heat Transfer During Melting and Solidification of Metals", Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1205 – 1218.
- Wu, M.H.; Wang, Y.X. Guo, T. & Zhang, Q.X, 1992, "Computer Aided Chill Design for Steel Casting, ASF Transactions", Vol. 92, pp.27-35.

7. DIREITOS AUTORAIS

Grupo GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais-DEM/UFPA)

UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF A Sn-Pb ALLOY IN COPPER AND STEEL MOLDS WITH DIFFERENTS THICKNESS

André Oliveira Kishi, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 kishi@ufpa.br

Denílson Santos Fernandes, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 dsantos@ufpa.br

Johnyson Pereira Feitosa, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 jfeitosa@ufpa.br

José Maria do Vale Quaresma, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 jmdovale@ufpa.br

***Abstract.** Unidirectional solidification is a very important experimental arrangement when treating for metals structures to come to be related to the thermal parameters involved in the metallic solidification, such as: cooling rate, solidification speed, but mainly the coefficient of heat transfer in both metal/mold and mold/environment. In this work a numeric model was used based on the difference finite technique applied in a control volume and the that confronts experimental thermal profiles with those obtained by numeric model, this technique has been an indispensable tool to provide the reliability and precision of results. The thermal history of the experimental process was registered through thermocouples installed in the areas of interest into solidifying metal. Results found like this allowed the exact evaluation of the variation of the heat transfer coefficient previously mentioned. Unidirectional heat flow foundry was done by using cooper and steel walls with varying thickness (6mm and 50mm) for a Sn-Pb alloy.*

***Key-words:** mold/environment and metal/mold thermal conductance; solidification conditions; unidirectional solidification.*