

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INTERFACE METAL/MOLDE PARA LIGAS DO SISTEMA Sn-Pb SOLIDIFICADAS EM MOLDES METÁLICOS DE DIFERENTES MATERIAIS

Manoel Diniz Peres – Mestrando, UFPA, C T, DEM

Noé Cheung – Doutorando, DEMA/FEM/UNICAMP

José Maria do Vale Quaresma – Prof. Doutor, UFPA, CT, DEM

Amauri Garcia – Prof. Titular, DEMA/FEM/UNICAMP

UFPA, CT, DEM, 66.075-970, Belém, PA, Brasil, E-mail peres@ufpa.br / jmdovale@ufpa.br

RESUMO

A simulação dos processos de solidificação de metais, via modelos matemáticos, tem-se constituído como uma ferramenta imprescindível na confiabilidade e precisão dos resultados obtidos. Sabe-se que a estrutura e as propriedades de uma peça fundida dependem das condições térmicas na solidificação ou mais precisamente das taxas de resfriamento, dependendo fortemente do coeficiente de transferência de calor (h_i) na interface metal/molde, tornando necessária a correta avaliação destes componentes. A variação destes parâmetros pode ocorrer ao longo do contorno da peça, sendo função do tipo de material fundido, do molde, da presença de resfriadores, etc.

Este trabalho determina o comportamento de h_i , através do confronto de perfis de temperatura teórico experimental, analisando o comportamento térmico do par metal/molde em um sistema de solidificação com fluxo de calor unidirecional. Utilizou-se ligas do sistema Sn-Pb, e moldes de aço carbono e de cobre com espessura de 50 mm.

Palavras-chaves: Condutância Térmica Metal / Molde; Condições de Solidificação; Modelagem matemática.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização da solidificação de metais com aplicação industrial tem sua limitação no tratamento da transferência de calor no sistema metal/molde, e principalmente na interface de contato entre o metal e o molde. Vários pesquisadores tem estudado esta transferência de calor, uma vez que da sua eficiência depende significativamente a evolução da estrutura bruta de solidificação em componentes fundidos, e como conseqüência, definem suas propriedades.

Na região de contato metal/molde, evidencia-se a formação do “gap” de ar, o qual tende a diminuir a eficiência do transporte de calor, expressa em termos de um coeficiente de transferência de calor metal/molde h_i , e como conseqüência desacelera o processo de solidificação. O valor de h_i depende inicialmente da afinidade físico-química do metal líquido, e das condições de acabamento da superfície de contato do molde. O presente trabalho utiliza a determinação de h_i pelo confronto teórico experimental de perfis térmicos que consiste em mapear experimentalmente as temperaturas em determinados pontos do molde e do metal ao longo da solidificação e, posteriormente, confrontar os perfis de temperatura ou curvas de resfriamento experimentais com as curvas teóricas simuladas por um modelo numérico de

solidificação, que tenha sido prévia e devidamente aferido, para tanto utilizou-se ligas do sistema Sn-Pb (5, 10, 20 % Pb) e para a a coquilha utilizou-se aço SAE 1020 e cobre eletrolítico ambas com espessura de 50 mm.

2. ANÁLISE MATEMÁTICA DA SOLIDIFICAÇÃO

Para a obtenção de resultados precisos no mapeamento térmico de sistemas de fundição via simulação numérica, torna-se necessário um perfeito conhecimento do comportamento da interface metal / molde ao longo do processo. A determinação de valores de h_i é complexa, sendo que o método que engloba a comparação entre dados térmicos experimentais e os resultados gerados por modelo matemático se apresenta como uma ferramenta eficiente e flexível.

A equação descritiva para o fenômeno da transferência de calor é a Equação Geral da Condução de Calor em regime não-estacionário, admitindo-se fluxo de calor unidirecional, dada por:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} \quad (1)$$

onde: ρ = densidade do material [kg/m³]; c = calor específico do material [J / kg.K];

k = condutibilidade térmica do material [W/m².K]; $\dot{q} = \rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial t}$, representa o termo de geração interna de calor; associado a transformação de fase do metal com a liberação de calor latente.

Considerando a correlação com calor específico, a Equação 1 é dada como:

$$\rho \cdot c' \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

onde: $c' = c - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T}$ e o termo $\left(L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right)$ é chamado de *pseudo* calor específico, onde a velocidade de solidificação é controlada pela relação entre o pseudo calor específico que representa a liberação de calor latente do material na transformação de fase e o calor específico do material. Assim a equação 2 se transforma em:

$$\rho \cdot \left(c - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

O fluxo de calor através da interface metal/molde é mostrado na Figura 1, e pode ser obtido utilizando-se a equação 4:

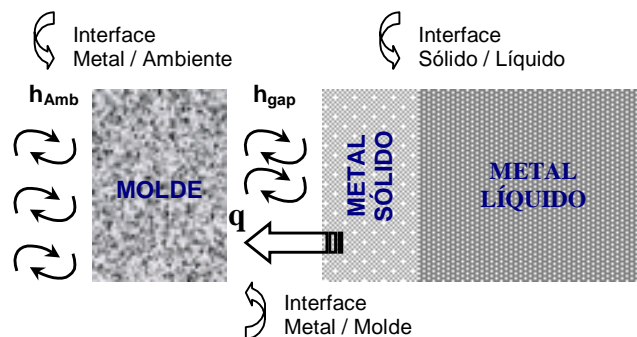


Figura 1 – Esquema ilustrativo das interfaces metal/molde e o fluxo de calor entre a superfície da casca de metal solidificado e do molde [Quaresma, 1999].

$$q = h_i \cdot A_t (T_{\text{metal}} - T_{\text{molde}}) \quad (4)$$

onde: $A_t = \text{Área de troca térmica [m}^2 \text{]}$; e sendo que o valor do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i) é variável durante o processo, necessitando de métodos particulares para a sua determinação (Welty, J.R.,1976),, como o método utilizado ao longo do trabalho.

Aplicando os termos de diferenças finitas na equação 2, tem-se:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k \cdot \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (5)$$

onde: i posição do ponto da malha numérica; Δx corresponde à distância percorrida pelo fluxo de calor entre os pontos nodais; n é o instante de tempo [s].

Utilizando-se uma abordagem que transforma a malha de diferenças finitas de elementos térmicos a elementos elétricos (Spim Jr., J. A. & Garcia, A.,1997); e manipulando algebricamente a equação 5, chega-se em (Mondolfo, L. F.,1976):

$$T_i^n = -\frac{\Delta t}{\tau_{di}} \cdot T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_{dqi}} \right) \cdot T_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\tau_{qi}} \cdot T_{i+1}^{n+1} \quad (6)$$

$$\text{onde: } \tau_{qi} = C_{ti} (R_{t_{i-1}} + R_{t_i}) \quad (\text{carga}) \quad (7)$$

$$\tau_{di} = C_{ti} (R_{t_i} + R_{t_{i+1}}) \quad (\text{descarga}) \quad (8)$$

$$\tau_{dqi} = \frac{\tau_{di} + \tau_{qi}}{\tau_{di} \cdot \tau_{qi}} \quad (\text{carga e descarga}) \quad (9)$$

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

$$C_{ti} = A_t \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (10)$$

onde: $A_t \cdot \Delta x_i$ corresponde ao volume do elemento finito “ i ” ; C_{ti} é a capacidade térmica do elemento “ i ”.

O fluxo térmico entre os pontos nodais (centrais) dos elementos finitos tem, como resistência térmica à passagem de calor, um valor representado pelo inverso da condutividade térmica, sendo:

$$R_t = \frac{\Delta x}{k \cdot A_t}, \quad R_i = \frac{1}{h_i \cdot A_t}, \quad (11)$$

A determinação correta de h_i , tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores [Garcia/Clyne,1983; Nishida et alli, 1986; Sharma/Krishnan, 1991; 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 dos sistemas 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. APARATO EXPERIMENTAL

Para determinação do Coeficiente de Transferência de Calor Metal/Molde (h_i), foi utilizado um molde de seções planas retangulares, sendo uma das faces composta de material

condutor (absorvedor de calor, aço SAE 1020 e cobre eletrolítico), e as outras de material isolante, direcionando assim unidirecionalmente o fluxo de calor no sistema experimental.

O ensaio experimental consistiu na obtenção dos perfis de temperatura durante a solidificação de ligas do sistema Sn-Pb. As propriedades termofísicas das ligas utilizadas, bem como do molde são mostradas nas Tabela 1 e 2. Vazou-se a liga sempre com um superaquecimento de 40 °C acima da temperatura liquidus da liga, e manteve-se o molde inicialmente à temperatura ambiente.

Através de termopares (Tipo K) localizados estrategicamente conforme figura 2, monitorou-se todo o processo com o auxílio de um Registrador Digital ALMEMO 2290-8 com capacidade de até cinco leituras por unidade de tempo (s), obtendo-se os Perfis Térmicos Experimentais, que serviram para a comparação com os Perfis Térmicos Teóricos do Modelo Matemático.

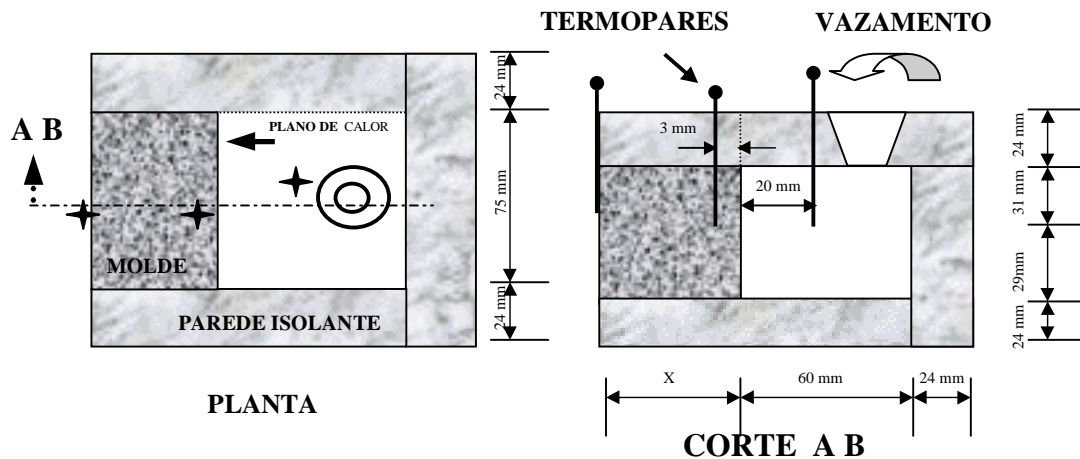


Figura 2 – Representação Esquemática do Sistema Experimental [Quaresma, 1999].

Tabela 1 – Características do material do molde [Hammouda, 1992]

Material do Molde	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-Pb [Hammouda, 1992]

Ligas	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)
Sn5%Pb	259	221	7.380	7.720	33	64	57.120	183	220	232
Sn10%Pb	243	209	7.480	7.840	33	63	56.140	183	215	232
Sn20%Pb	231	200	7.860	8.250	32	59	52.580	183	202	232

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 3 (a, b ,c) permitem fazer comparações entre as curvas de resfriamento das ligas em molde de aço. Nelas observa-se uma tendência ao aquecimento súbito do molde nos instantes iniciais do processo sem o conseqüente resfriamento do metal, isto é, o molde primeiro satura-se termicamente e só depois se permite resfriar, comportamento que vai diminuindo de intensidade à medida que as ligas apresentam crescentes valores de soluto e conduzem a perfis de h_i mais baixos que convergem rapidamente entre si, vistos na figura 3 d.

Tal fato permite o seguinte raciocínio: a avidéz de calor do molde de aço associada a fluidez decrescente das ligas mais concentradas, devido aos seus menores intervalos de solidificação, geram camadas sólida iniciais rápida e progressivamente mais consistentes e resistentes à pressão metalostática.

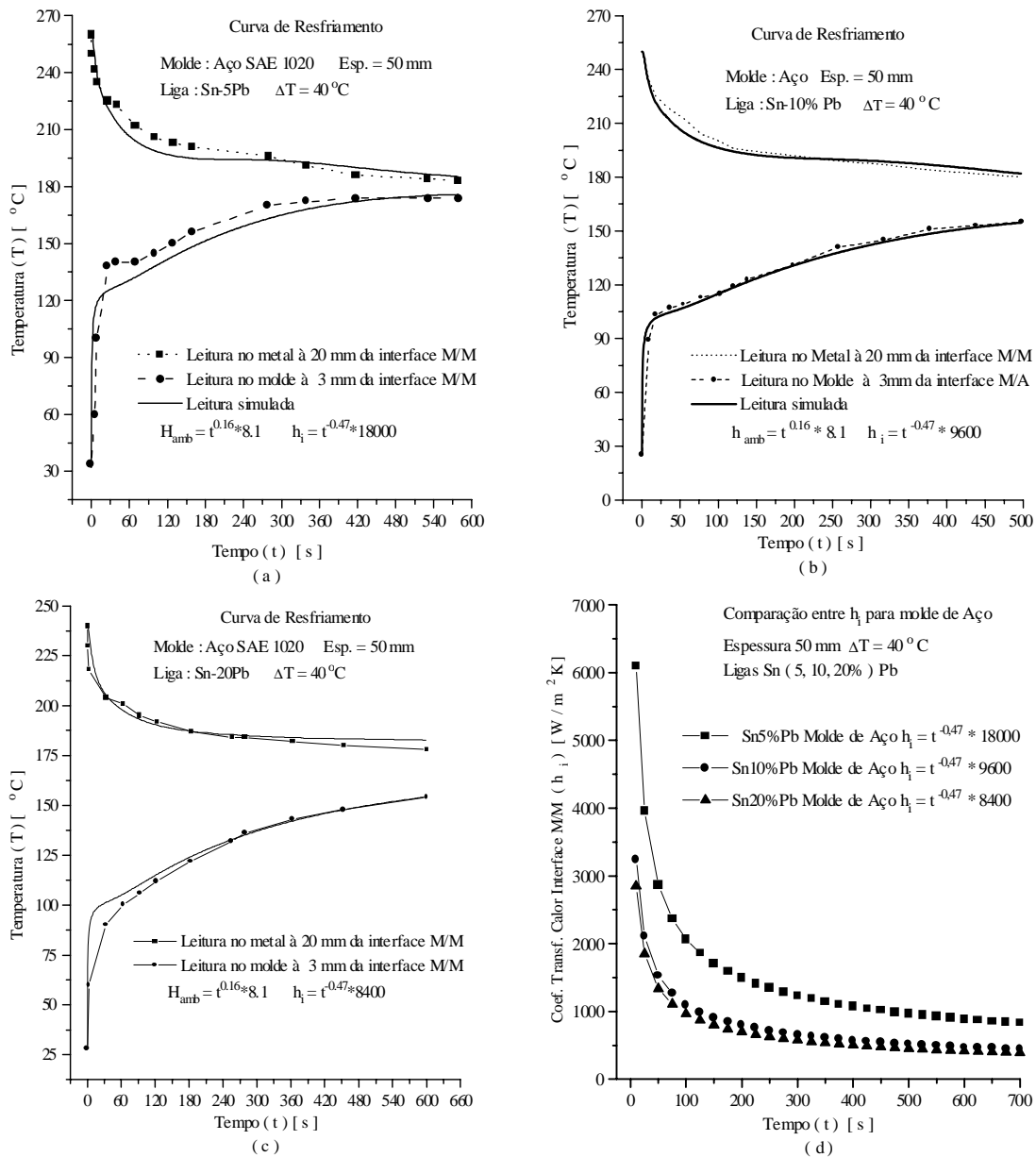


Figura 3 – Comportamento das curvas de resfriamento teóricas e experimentais para ligas do sistema Sn-Pb: a) Sn-5%Pb, b) Sn-10%Pb, c) Sn-20%Pb e, d) Correlação entre as curvas que representam os perfis de h_i , para moldes de aço com espessura de 50 mm.

As figuras 4 (a, b, c), por sua vez, permitem fazer comparações entre as curvas de resfriamento das ligas em molde de cobre. Nelas observa-se uma tendência ao aquecimento gradual do molde ao longo do processo que aumenta de intensidade à medida que as ligas apresentam valores de soluto crescentes e conduzem a perfis de h_i mais elevados que convergem rapidamente entre si, vistos na figura 4 d. e à medida que a concentração de soluto

crece na liga. Tal fato permite o seguinte raciocínio: a indiferença pelo calor do molde de cobre associada a fluidez decrescente das ligas mais concentradas, devido aos seus menores intervalos de solidificação, geram camadas sólida iniciais lenta e progressivamente mais consistentes que podem ser vencidas pela pressão metalostática.

Estas constatações dão conta dos diferentes comportamentos que o aço e o cobre apresentam como extratores de calor.

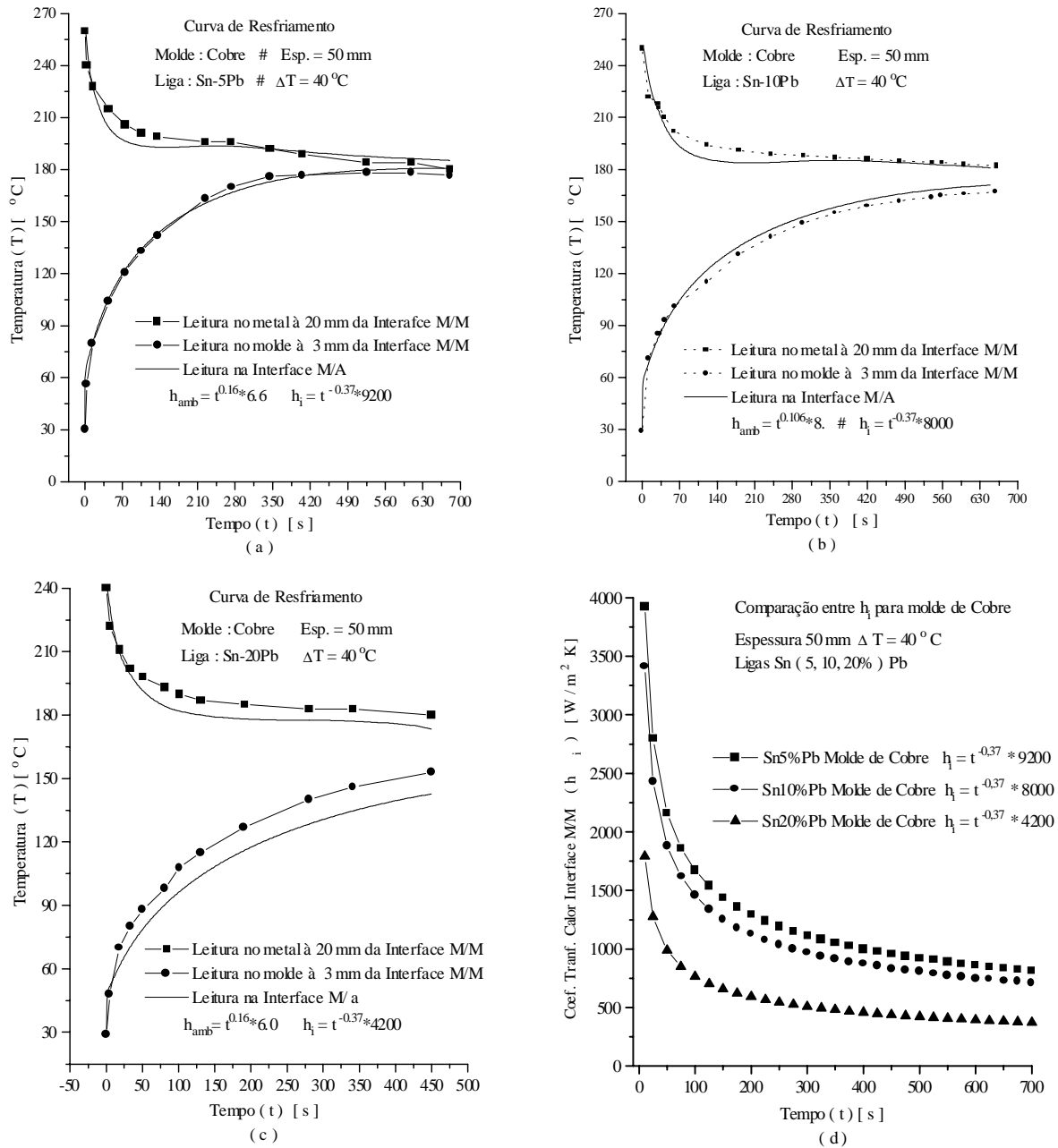
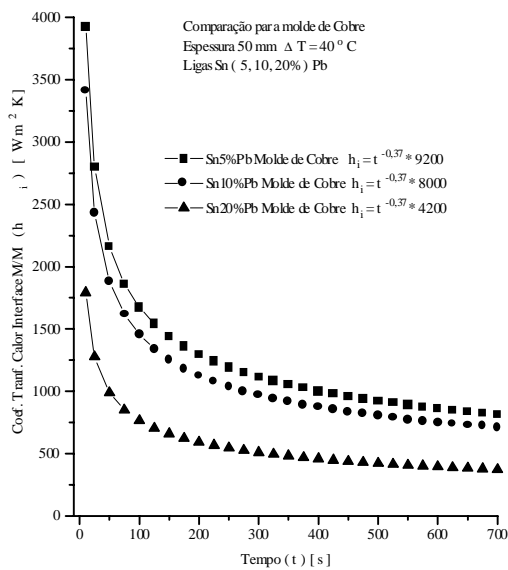
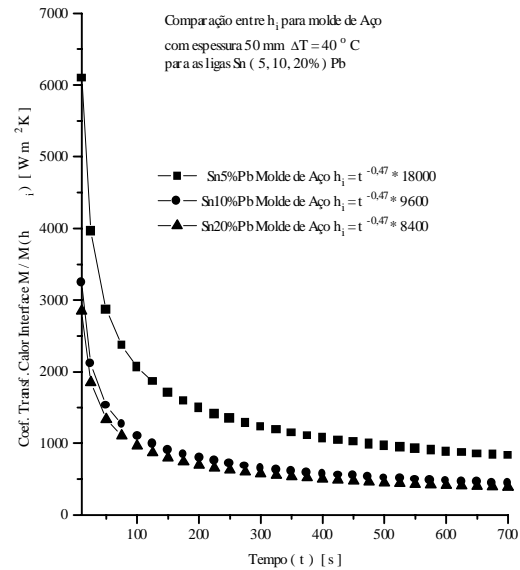


Figura 4 – Comportamento das curvas de resfriamento teóricas e experimentais para ligas do sistema Sn-Pb: a) Sn-5%Pb, b) Sn-10%Pb, c) Sn-20%Pb e, d) Correlação entre as curvas que representam os perfis de h_i , para moldes de cobre com espessura de 50 mm.



(a)



(b)

Figura 5 – Comparação entre os perfis de h_i para ligas do sistema Sn-Pb: a) molde de cobre e b) molde de aço.

4. CONCLUSÕES

A comparação entre os resultados das simulações desenvolvidas através do modelo numérico e os dados obtidos experimentalmente, permitem concluir que:

- a) a boa concordância das curvas obtidas caso a caso, leva naturalmente ao entendimento de que a utilização de valores h_i variáveis com o tempo além de mais confiáveis são mais eficientes. Por outro lado, mostra que o confronto destes perfis térmicos é um modo seguro e mais simples de definição dos valores deste coeficiente em função do tempo.
- b) a rápida convergência entre si dos perfis de h_i mais baixos para crescentes valores de soluto (molde de aço) e a rápida divergência entre si dos perfis de h_i mais baixos para crescentes valores de soluto (molde de cobre) podem estar associadas tanto ao decréscimo do intervalo de solidificação e conseqüente diminuição da zona pastosa (mushy zone) como às propriedades termofísicas do material do molde.
- c) é significativa a melhor afinidade físico-química das ligas Sn-Pb com molde de aço, o que traduz por valores iniciais de h_i sensivelmente mais elevados.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berry, J. T. et alli – Control of Macrostructure in Aluminum casting, part I: Determination of Columnar/Equiaxed Transition for Al-4,5%Cu Alloy, AFS Transactions, vol. 99, pp. 187-191, (1991).
- Garcia, A & Clyne, T. W; - A Versatile Technique for Characterization of Metal/Mold Heat Transfer and Correlation with Thermal and Structural Effect. In: Solidification Technology in the Foundry and Csthouse; The Metals Society; pp.33-39, 1983.
- Hammouda, R. M. et alli – “Effect of melt Superheat and Chill Material on Interfacial Heat-Transfer Coefficient in End-Chill Al and Al-Cu Alloy Castings”, Journal of Materials Science, vol. 27, pp 3467-3473, 1992.
- Huang, C. H.; Wang, Y. C.; “The Estimation of Solid-Liquid Phase Moving Front Position During Metal Casting with Mold”; Proc. NATL. Sci, Counc., vol 220, n. 22, pp. 194-203, 1996.
- Krane, M. J. M.; Incropera, F. P. ; “A scaling Analysis of the Unidirectional Solidification of a Binary Alloy “; Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 39, pp. 3567-3579, 1996.
- Krishnan, M. & Sharma, D. G.; “Determination of the Interfacial Heat Transfer Coefficient h in the Unidirectional Heat Flow by Beck’s Non Linear Estimation Procedure”; Int Comm. Heat Mass Transfer, vol., 23, n. 2, p. 203-214,1996.
- Mondolfo, L. F. – Aluminium Alloys: Struture and properties, Ed. Butter Warths, London-Boston, 1^a Edição, (1976).
- Nishida, Y.; Droste, W. & Engler, S.; “The Air-Gap Formation Process at the Casting-Mold Interface and the Heat Transfer Mechanism through the Gap”; metallurgical transactions B, vol. 17B, pp. 833-844, Dez. (1986).
- Pehlke, R.. D.; “Sumary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials”, University of Michigan, 1982.
- Quaresma, J. M. V. et alli.; “Influência do Material e da espessura da Parede do Molde nos Coeficientes de Transferência de Calor nas interfaces Metal/Molde e Molde/Ambiente”, Anais do II congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais – ABM, 1997.
- Quaresma, J. M. V., Santos, C. A, Cheung N., Garcia, A, “Correlação entre Microestrutura de Solidificação e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Cu “, Trabalho a ser apresentado no⁵³⁰ Congresso Nacional Anual da ABM, 1998.
- Quaresma, J. M. V; Correlação entre Condições de Solidificação, Microestruturas e Resistência Mecânica, Campinas-SP,1999.
- Santos, C. A et all; “Aplicação de um Modelo Numérico na Determinação Experimental da Condutância Térmica na Interface Metal/Molde em Sistema Estáticos de Fundição”; 9^o Seminário de Metais Não-Ferrosos-ABM, pp. 197-202, 1996.
- Spim Jr., J. A & Garcia, A ; “An optimization of the Finite Difference Method for Modeling Solidification of Complex”; Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences – RBCM; vol. XIX, n. 3, p. 392-409, 1997.
- Stefanescu, D.M; Upadhya, G. & Bandyopadhyay, D. – Heat Transfer- Solidification Kinectics Modeling of Solidification of Castings, Metallurgical Transactions A, v.21A, pp.997-1005, 1990.
- Voller, V. R. & Swaminathan, C. R.; “General Source-Based Method for Solidification Phase Change”, Numerical Heat Transfer, Part b, vol. 19, p. 175-189, 1991.
- Welty, J. R.; “Engineering Heat Transfer”, J. Wilei and Sous, Inc. New York; 1976