



COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NAS INTERFACES METAL/MOLDE E MOLDE/AMBIENTE RELATIVOS A SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL DA LIGA Sn-5%Pb EM MOLDES DE AÇO COM TRÊS DIFERENTES NÍVEIS DE SUPERAQUECIMENTO

Hélido Cleidson de Oliveira Sena, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 helido@ufpa.br

Hilton Freitas Cavalcante, Universidade Federal do Pará, Centro de Ciências Exatas e Naturais, DEMAT. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 hilton@ufpa.br

Fernando Antônio de Sá, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 sa@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

Estudos recentes mostram que a estrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas de uma peça fundida dependem fortemente das condições térmicas durante a solidificação, ou seja, das taxas de resfriamento e conseqüentemente dos coeficientes térmicos das interfaces metal/molde e molde/ambiente. A variação desses dois parâmetros pode ocorrer ao longo do contorno da peça em função do tempo, e desta forma, poderia descaracterizar os resultados obtidos por meio de modelos que ignoram esta variação. O objetivo deste trabalho consiste na determinação experimental de valores dos coeficientes de transferência de calor atuantes na interface molde/ambiente, com base em equações analíticas já conhecidas, e na interface metal/molde, com a utilização do método que confronta os perfis térmicos teórico e experimental. Utilizou-se de um sistema de fundição com fluxo de calor unidirecional e termopares estrategicamente instalados nas regiões de interesse para a obtenção dos perfis térmicos experimentais cujos resultados foram comparados com outros gerados por um modelo numérico desenvolvido baseado na técnica de diferenças finitas devidamente aferido em trabalhos anteriores. Para tanto usou-se a liga Sn-5%Pb, molde de aço com 50 mm de espessura e superaquecimentos de 40°C; 70°C e 100°C acima da temperatura de solidificação da referida liga.

Palavras Chaves: *Condutância Térmica Metal/Molde e Molde/Ambiente; Condições de Solidificação; Superaquecimento e Modelagem Matemática.*

1. INTRODUÇÃO

A solidificação é um processo que envolve a transferência de calor e a velocidade com que esta ocorre interfere diretamente na forma e no tamanho da estrutura do metal solidificado e conseqüentemente nas suas propriedades (Quaresma et al, 2000 A, B, C). A análise numérica da solidificação em metais e ligas pode ter, nos dias atuais, um papel de importância fundamental, principalmente quando se trata de controlar ou melhorar a produção em termos de qualidade e redução de custo. Assim, por exemplo, a análise do processo de transferência de calor, a identificação das variáveis significativas, o estabelecimento e a determinação dos parâmetros de solidificação, tornam-se essencialmente importantes tanto sob o ponto de vista acadêmico como prático. Na literatura específica encontram-se diversos trabalhos voltados à predição das estruturas brutas de solidificação mediante modelos probabilísticos da formação da microestrutura nos processos de solidificação (Rappaz, 1993), bem como pesquisas aplicadas à predição de espaçamentos dendríticos em ligas binárias (Kirkaldy, 1997; Quaresma, 1999). Entre os parâmetros de natureza térmica, a condutância térmica tanto na interface molde/ambiente como na interface metal/molde tem recebido especial atenção por se constituir fatores que interferem significativamente na evolução do processo de solidificação. Em operações de fundição e lingotamento, particularmente quando está em jogo moldes de elevada capacidade de absorção de energia térmica. Por esta razão, vários trabalhos são encontrados acerca destas condutâncias térmicas, caracterizadas pelo coeficiente de transferência de calor na interface molde/ambiente (h_{amb}) e interface metal/molde (h_i) (Quaresma, 2001; Garcia, 2001; Cavalcante, 2001).

2. TRATAMENTO MATEMÁTICO DA SOLIDIFICAÇÃO

A análise da transferência de calor nos sistemas metal/molde e molde/ambiente durante a solidificação foi desenvolvida a partir da Equação Geral da Condução de Calor e resolvida pelo método das diferenças finitas (Quaresma, 1997 e 1998; Spim, 1996). Seja a equação da condução de calor em regime não estacionário dada por:

$$\rho(T).c(T). \frac{\partial T}{\partial t} = k(x, y, z, T) \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \dot{q} \quad (1)$$

onde:

ρ = densidade do material [kg/m³];

c = calor específico do material [J/kg.K];

k = condutibilidade térmica do material [W/m.K];

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ = variação do gradiente térmico nos eixos;

\dot{q} = representa o termo de geração interna de calor na transformação de fase.

No caso da solidificação de uma liga binária, \dot{q} pode ser aproximado por:

$$\dot{q} = \rho L \frac{\partial F_s}{\partial t} \quad (2)$$

Nesta Equação, L é o calor latente de fusão do material e $\frac{\partial F_s}{\partial t}$ corresponde a variação da fração solidificada no tempo, podendo ser aproximada por (Wanqi, 1994):

$$\frac{\partial F_s}{\partial t} = \frac{\partial F_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Aplicando-se (3) em (2) e o resultado em (1), considerando o meio isotrópico e admitindo-se um fluxo de calor unidirecional na direção x, a Eq. (1) pode ser escrita na forma:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho L \frac{\partial F_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Definindo-se $c^* = c - L \frac{\partial F_s}{\partial T}$ como pseudo calor específico, pode-se reescrever a equação acima na forma:

$$\rho c^* \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5)$$

Aplicando os termos de diferenças finitas na Eq. (5), tem-se [Spim, 1997]:

$$\tilde{n} \cdot c^* \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k \cdot \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (6)$$

3. INTERFACE MOLDE/AMBIENTE:

Considera-se que a variação da temperatura externa da parede do molde é dependente da sua espessura durante o processo. Desta forma pode-se estimar por cálculos analíticos o valor de h_{amb} (coeficiente de transferência de calor na interface molde/ambiente) através da Eq. (7) (Quaresma, 1998):

$$h_{amb} = h_{rad} + h_{conv} \quad , \quad (7)$$

onde:

h_{amb} = coeficiente de transferência de calor da interface molde/ambiente [W/m².K];

h_{rad} = coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m².K] ($\epsilon = 0,74$ - emissividade para uma parede de aço oxidada);

h_{conv} = coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².K].

4. INTERFACE METAL/MOLDE

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

$$q = h_i \cdot A_t (T_{metal} - T_{molde}) \quad , \quad (8)$$

onde:

A_t - área de troca térmica [m²];

h_i - coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde [W/m².K], variável durante o processo, necessitando de métodos particulares para sua determinação, como o método utilizado ao longo do trabalho.

A Resistência térmica metal/molde [K/W], depende da análise do conjunto de resistências térmicas atuantes no sistema metal/molde, sendo determinada por:

$$R_i = \frac{1}{A_t \cdot h_i} \quad (8)$$

A Fig. (1) mostra esquematicamente as duas interfaces citadas nos ítems 3 e 4.

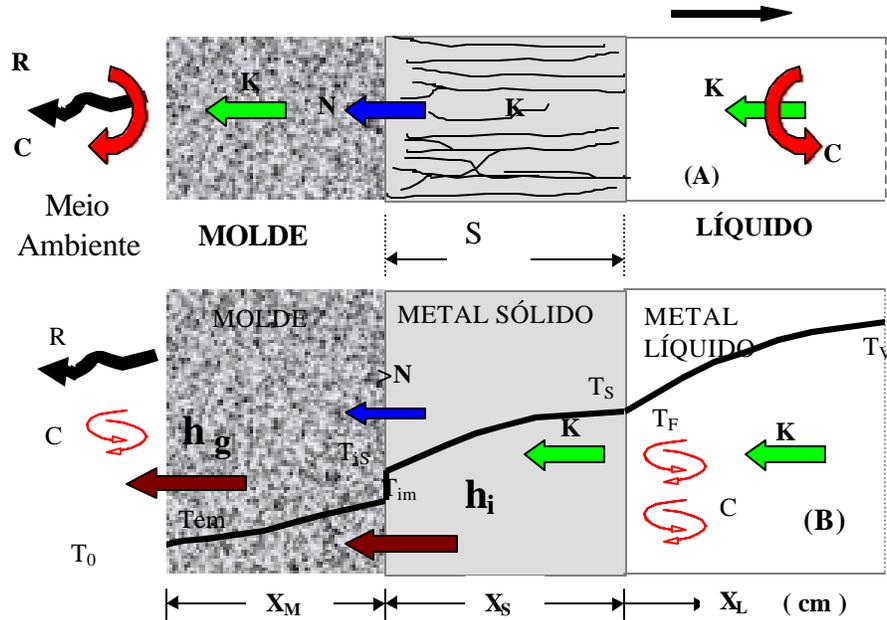


Figura 1. Diagrama esquemático ilustrando: (A) sistema metal/molde e as formas de transferência de calor; (B) perfil térmico do elemento de estudo associado às formas de transferência de calor em cada caso.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi utilizada a liga Sn5%Pb, cujas as propriedades termofísicas encontram-se na Tab. (1), molde de aço SAE 1010 de 50 mm de espessura de parede com geometria regular, plano com seções transversais retangulares, cujas características estão apresentadas na Tab. (2).

Tabela (1). Propriedades termofísicas da liga Sn-5%Pb

Propriedades	C_L J/kg.K	c_s J/kg.K	ρ_L kg/m ³	ρ_s kg/m ³	k_L W/mK	k_s W/mK	L J/kg	T_L K	T_S K	T_F K
Sn5%Pb	259	221	7380	7720	33	64	57120	493	456	505

Tabela (2). Propriedades termofísicas do molde de aço analisado.

Propriedades	k (W/mK)	c (J/kgK)	r (kg/m)
Valores	46	527	7860

Simbologia: c : calor específico; r : densidade; k : condutividade térmica; L: calor latente de fusão; T: temperatura. Subscrito: S: sólido; L: líquido, F: fusão.

Adotou-se superaquecimentos de 40°C, 70°C e 100°C acima da temperatura de início de solidificação da liga Sn5%Pb. Para determinação do coeficiente de transferência de calor na interface de interesse, o molde foi disposto com uma das faces atuando como condutora e as outras faces foram construídas com material isolante à base de sílica para que o fluxo de calor no sistema fosse unidirecional. O ensaio consistiu na obtenção dos valores de h_i e na determinação dos perfis de temperatura durante a solidificação, estando o molde inicialmente mantido a temperatura ambiente. As temperaturas na interface metal/molde bem como na interface molde/ambiente, para cada superaquecimento assumido, foram tomadas através de termopares tipo K, com diâmetro de 1,6 mm e bainha de aço inoxidável, estrategicamente localizados e 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 comparação com os Perfis Térmicos Teóricos do Modelo Matemático, conforme mostra o esquema apresentado na Fig. (2).

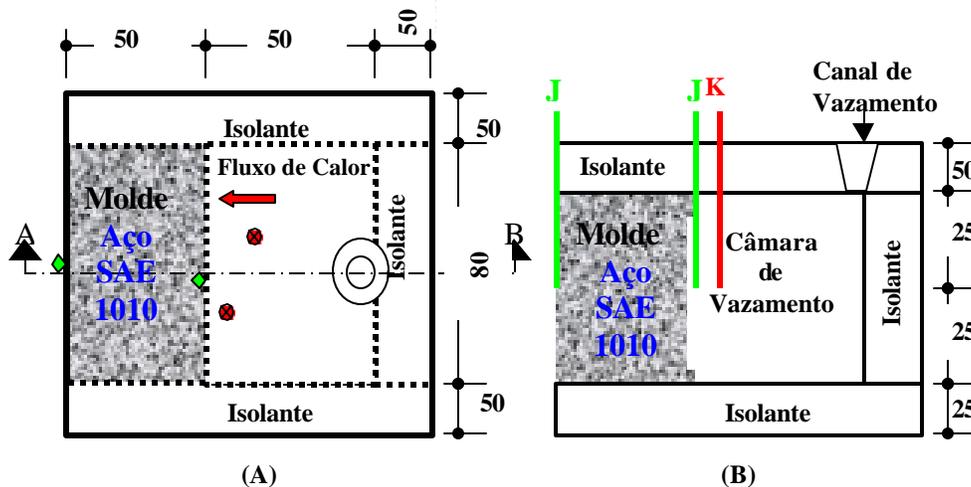
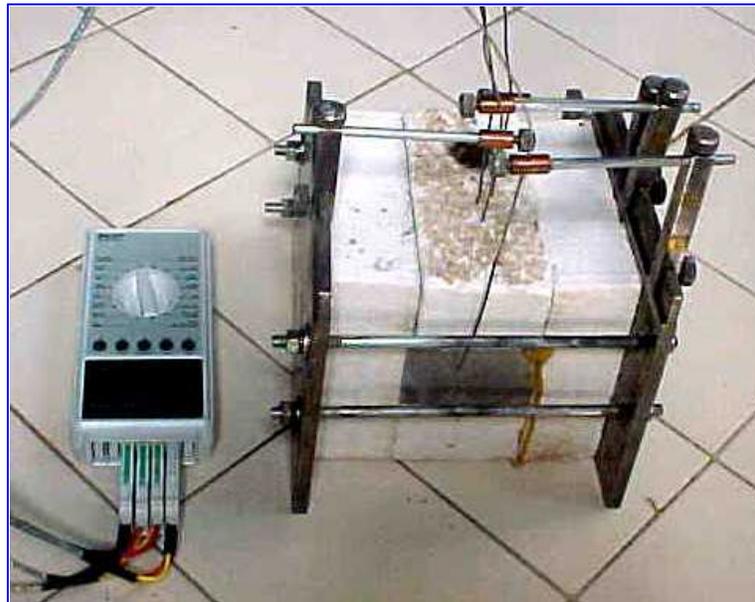


Figura 2. Esquema ilustrativo do sistema metal/molde: (A) Vista superior evidenciando o plano de calor da leitura térmica e a posição dos termopares relativos ao molde e (B) Vista lateral do sistema com ênfase para a espessura do molde, posição e profundidade dos termopares, canal e câmara de vazamento(Quaresma, 1999; Cavalcante, 2001).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As informações para a determinação dos valores dos coeficientes de transferência de calor na interface molde/ambiente foram coletadas por meio de leituras térmicas obtidas dos termopares posicionados nesta interface, próximo ao molde, como pode ser visto na Fig. (2). Tais leituras permitiram a obtenção de gráficos, como ilustrados na Fig. (3), onde são também observadas as curvas de resfriamento para os pontos no molde assim como as condições operacionais sob as quais foram obtidas para os três diferentes superaquecimentos.

Na Fig. (3) pode ser visto que para maiores superaquecimentos os perfis térmicos, tanto no molde como na interface M/A, registram maiores temperaturas, como esperado, uma vez que as curvas de aquecimento do molde apresentam-se gradativamente assintóticas ao eixo das temperaturas Fig. (3A a C). Essa tendência é repassada para as curvas dos valores de h_{amb} , como pode ser visto na Fig. (3D) a qual permite visualizar que nos instantes iniciais do processo de solidificação há uma tendência de convergência de resultados em função da espessura da parede do molde cuja temperatura externa encontra-se apenas com ligeiro desequilíbrio em relação a temperatura ambiente. À medida que a solidificação começa a evoluir e o fluxo de calor proveniente do metal começa a elevar esta temperatura externa, h_{amb} cresce rapidamente sendo ligeiramente maior esse crescimento quanto maior o aquecimento considerado, conforme mostram as curvas da Fig. (3A, B, C).

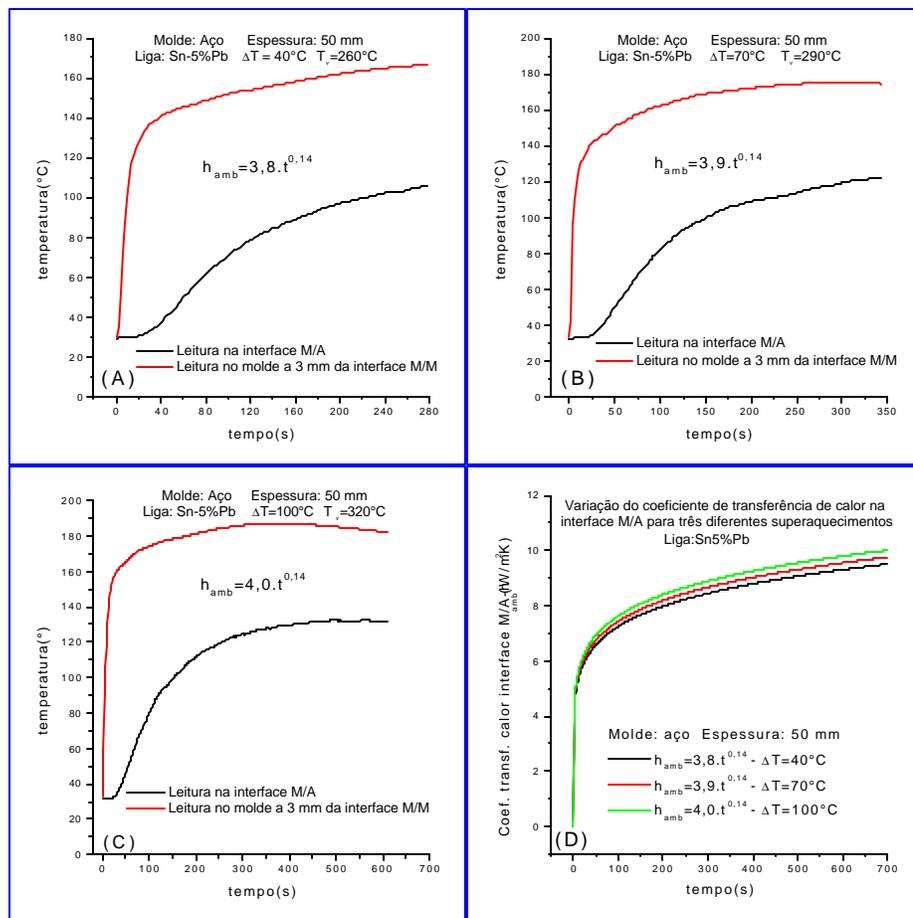


Figura 3. Perfis térmicos obtidos para a liga Sn-5%Pb em molde de aço com espessura de 50mm, para diferentes superaquecimentos: (A) $\Delta T = 40^\circ\text{C}$; (B) $\Delta T = 70^\circ\text{C}$; (C) $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ e (D) Variação do coeficiente de transferência de calor na interface molde/ambiente.

A Fig. (4) apresenta os gráficos das curvas dos coeficientes de transferência de calor na interface M/M (h_i) resultantes do confronto das leituras térmicas experimentais e os resultados simulados via computador, assim como as equações para cada superaquecimento adotado. Pode-se verificar através dos mesmos que para os dois maiores níveis de superaquecimento adotados, os registros térmicos mais próximos à interface metal/molde quais sejam a 10 mm e a 03 mm desta interface mostram pequeníssima discordância com os resultados simulados.

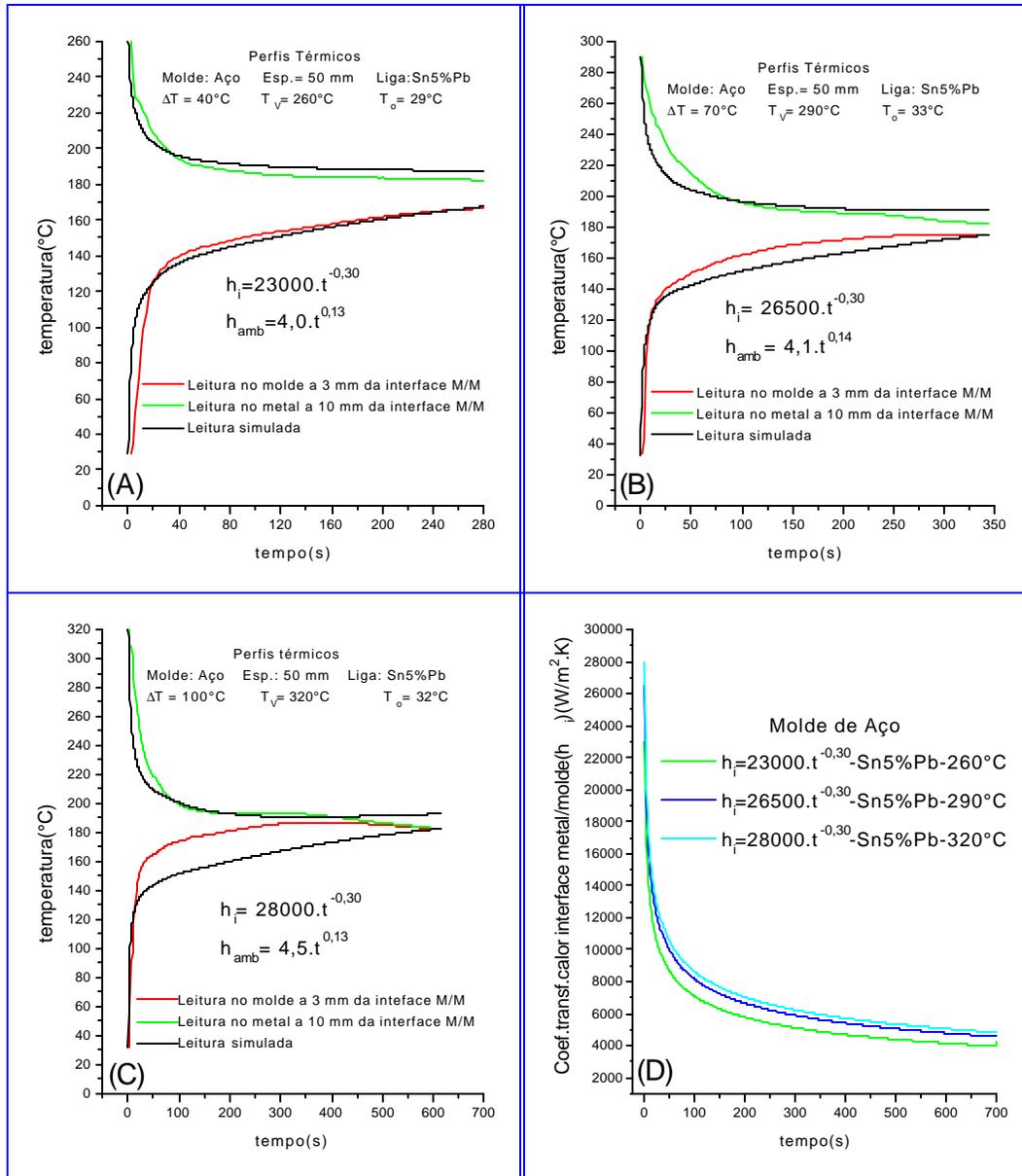


Figura 4. Confronto de perfis térmicos teóricos e experimentais para a liga Sn5%Pb vazada em molde de aço com espessura de 50 mm usando diferentes níveis de superaquecimentos: (A) $\Delta T = 40^\circ\text{C}$; (B) $\Delta T = 70^\circ\text{C}$; (C) $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ e (D) Variação do coeficiente de transferência de calor h_i na interface metal/molde.

Podemos notar também em todos os casos experimentais obtidos que as curvas correspondentes nas respectivas posições de interesse apresentam, respectivamente, um comportamento descendente e ascendente com o tempo de solidificação. No que se refere a unidirecionalidade da extração de calor, verifica-se que a mesma diminui com o aumento progressivo do superaquecimento. A Fig.

(4D) mostra o comportamento das curvas de h_i com o tempo de solidificação obtidas para todos os níveis de superaquecimento assumidos. Nota-se, através da mesma, para todos os casos, valores elevados de h_i nos instantes iniciais do processo de solidificação, com maior intensidade para superaquecimento de 70°C e 100°C acima da temperatura de início de solidificação da liga Sn-5%Pb. Nota-se também que para valores de superaquecimento até 40°C, não ocorre nenhuma modificação no perfil de valores de h_i . Por outro lado, verifica-se que para maiores níveis de superaquecimento há a influência do mesmo como agente modificador no comportamento da curva de h_i . Observa-se que para valores acima de 40°C de superaquecimento começa-se a notar a influência da maior fluidez do líquido conferindo maior molhabilidade do metal líquido na superfície interna do molde, o que se traduz nos maiores valores iniciais de h_i que podem ser observados na Fig. (4D). O retardamento da solidificação decorrente da maior impedância térmica provocada pelo superaquecimento retarda também a ação da contração volumétrica, o que provoca como consequência um perfil de valores de h_i mais elevado. De qualquer forma, a influência mais significativa do superaquecimento sobre h_i concentra-se nos instantes iniciais do processo provocada pela elevação da fluidez do metal líquido e a maior molhabilidade.

7. CONCLUSÃO

Os vazamentos do metal líquido com superaquecimentos mais elevados implicam como decorrência em maior presença de convecção atuando na transferência de energia térmica. Isto explica uma certa flutuação nos resultados experimentais, principalmente no uso do maior superaquecimento utilizado, e a discrepância observada entre os resultados experimentais e numéricos já que o modelo numérico considera apenas em uma direção a condução térmica como modo de transferência de calor no metal. Da mesma forma, podemos concluir que para maiores valores de superaquecimento a influência da fluidez do líquido conferindo elevado contato do metal líquido na superfície interna do molde, o que se traduz nos maiores valores iniciais de h_i observados através da Fig. (4). De qualquer forma, o retardamento da solidificação decorrente da maior impedância térmica provocada pelo superaquecimento inibe a ação da contração volumétrica, o que provoca como consequência um perfil de valores de h_i mais elevado. Finalmente, a influência mais significativas do superaquecimento sobre h_i concentra-se nos instantes iniciais do processo devido a maior fluidez do metal líquido e, portanto, maior molhabilidade do mesmo com as parede interna do molde.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavalcante, H. F.; Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor na Interface M/M Relativo à Solidificação Unidirecional de Ligas do Sistema Sn-Pb em Molde de Aço; 2001.
- 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.
- 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., Santos, C. A., Garcia, A. Correlacion Between Unsteady-State Solidificacion Condicion, Dendrite Spacings and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys. Metallurgical and Materials Transactions. Estados Unidos: , v.31A, p.3167 - 3178, 2000.

- Quaresma, J. M. V., Osório, W. R. R., Santos, C. A., Garcia, A. Determinação Analítica e Experimental dos Parâmetros na Solidificação de Ligas Zn-Al no Intuito de Melhorias nas Propriedades Mecânicas In: CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2000, Natal. **CD-CONEM 2000**. CONEM, 2000.
- Quaresma, J. M. V., Osório, W. R. R., Santos, C. A., Garcia, A. Determinação das propriedades mecânicas como função do espaçamento dendrítico em ligas Zn-Al, solidificadas unidirecionalmente In: 55º Congresso Anual da ABM/2000, 2000, São Paulo. **55º Congresso Anual da ABM/2000**. , 2000.
- Quaresma, J. M. V., Santos, C. A., Garcia, A.; Determination of Transient Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings. Journal of Alloys and Compounds. Estados Unidos: , v.319, p.174 - 186, 2001.
- 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”; 9º Seminário de Metais Não-Ferrosos-ABM, pp. 197-202, 1996.
- Spim Jr., J. A & Garcia, A ; “A 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, 1996.

HEAT TRANSFER COEFFICIENTS AT THE METAL/MOULD AND MOULD/AMBIENT INTERFACE RELATIVES AT ONE-WAY SOLIDIFICATION OF SN-5PB ALLOYS SYSTEMS IN STEEL MOULD CONSIDERING TREE DIFFERENT SUPERHEAT LEVELS

Hélido Cleidson de Oliveira Sena, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 helido@ufpa.br

Hilton Freitas Cavalcante, Federal University of Pará, Center of Exact and Natural Sciences, DEMAT. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 hilton@ufpa.br

Fernando Antônio de Sá, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 sa@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.** Recent studies indicate that the structure and consequently the properties of a casting depend on the thermal conditions during the solidification, or in fact, of the cooling rates, that depend on heat thermal coefficients at interfaces metal/mold and mold/ambient interfaces. These two parameters are variable along the contour of the casting, as well as with time, so that only experimental transient values can be considered confident. The present work determines heat transfer coefficients at the interface metal/mold and mold/ambient, by using a method that fits the theoretical and experimental thermal profiles. The experimental thermal profiles were obtained through thermocouples located in areas of interest, and its results compared with those generated by a numeric model based on the finite differences technique. The Sn-5%Pb alloy was used as the reference material and a steel mold with superheat levels different.*

***Key Words:** Metal/Mold and Mold/Ambient Heat Transfer Coefficients; Solidification Conditions; Mold Thickness and Model Mathematical.*