



CÁLCULO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERFACIAIS DAS LIGAS Al-5%Si E Al-11%Si SOLIDIFICADAS DIRECIONALMENTE SOB REGIME TRANSIENTE DE FLUXO DE CALOR

Gueber E. M. Santos Júnior^{1*}, Fabrícia S. Gonzaga¹, José A. F. Rodrigues¹ e Antonio L. S. Moreira¹

1 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Corrêa, nº 1, Belém, CEP 66075-110, PA. gueber.junior@itec.ufpa.br

RESUMO

A análise do fenômeno da transferência de calor interfacial durante a solidificação é bastante complexa, pois depende das condições operacionais e de contorno assumidas, das propriedades termofísicas do molde e da liga bem como da distribuição de temperaturas no sistema metal-molde. Além disso, esses parâmetros variam em função do tempo e da temperatura. Nesse sentido, este trabalho apresenta como principais objetivos determinar os coeficientes de transferência de calor interfaciais (h_i) das ligas hipoeutéticas Al-5%Si e Al-11%Si solidificadas direcionalmente em um dispositivo horizontal refrigerado a água, avaliar seus respectivos comportamentos durante o processo de mudança de fase líquido-sólido e comparar os resultados obtidos para as referidas ligas. Para tanto, os perfis de temperaturas foram medidos em diferentes posições do eixo longitudinal do lingote por meio de oito termopares tipo K conectados a um sistema de aquisição de dados interligado a um computador. Uma técnica fundamentada na comparação entre os perfis de temperaturas experimentais e simulados, fornecidos por um modelo de solidificação numérico baseado em diferenças finitas, foi utilizada para calcular os valores de h_i das ligas investigadas. Os resultados mostraram que os referidos coeficientes de transferência de calor apresentaram valores bastante elevados no início da solidificação, devido à boa conformidade superficial entre o metal que solidifica e o molde, para em seguida diminuírem acentuadamente em função da formação de um gap de ar na interface metal-molde. Com a evolução da formação da camada solidificada, observou-se que os resultados de h_i passaram a ser praticamente constantes até o final da solidificação para ambas as ligas investigadas. Considerando um mesmo tempo de solidificação, verificou-se que os valores de h_i são mais elevados para a liga Al-11%Si. Assim, concluiu-se que os resultados dos referidos coeficientes das ligas em questão, quando solidificadas horizontalmente sob as condições anteriormente apresentadas, podem ser descritos de modo bastante razoável por meio das equações experimentais propostas neste estudo.

Palavras-chave: Solidificação horizontal, regime transiente, interface metal-molde, coeficiente de transferência de calor, ligas Al-Si.

INTRODUÇÃO

A solidificação é uma das transformações de fases mais importantes nas rotas de produção industrial desempenhando um papel fundamental, por exemplo, nas indústrias de fundição e soldagem⁽¹⁾. Durante o referido processo, o fluxo de calor na interface metal-molde é variável, pois o contato físico entre as superfícies do metal e do molde ocorre somente em pequenas regiões isoladas. A junção entre as duas superfícies proporciona vazios que dependem de diversos fatores entre os quais a presença de revestimentos superficiais, orientação da superfície do fundido, propriedades termofísicas dos materiais em contato, sistema de liga, composição da liga, tensão superficial da liga no estado líquido, pré-aquecimento do molde, temperatura de vazamento, geometria e dimensão da peça, rugosidade da superfície interna do molde etc.⁽²⁾.

Assim, a determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde depende das condições de contorno impostas durante o processo de solidificação bem como das propriedades termofísicas do produto fundido e do molde que, na grande maioria das vezes, variam em função do tempo e da temperatura. Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos visando estudar o mecanismo pelo qual o calor é transferido através da interface metal-molde durante o processo de solidificação de ligas metálicas sob as mais variadas condições operacionais. Os modelos apresentados têm sido propostos através de soluções analíticas⁽³⁾, numéricas⁽⁴⁾ ou trabalhos experimentais⁽⁵⁾.

As ligas do sistema Al-Si, representam aproximadamente 90% de todos os produtos fundidos de alumínio⁽⁶⁾ sendo caracterizadas pela boa resistência à corrosão, excelente fundibilidade e baixo coeficiente de expansão térmica. As ligas desse sistema possuem vasta aplicabilidade nas indústrias marítima, automotiva e aeronáutica⁽⁷⁾. Desse modo, este estudo objetiva avaliar o comportamento do coeficiente de transferência de calor interfacial (h_i) ao longo da solidificação direcional das ligas hipoeutéticas Al-5%Si e Al-11%Si em um sistema de configuração horizontal refrigerado a água, sob condições transientes de extração de calor, utilizando o modelo numérico desenvolvido por Ferreira *et al.* (2008)⁽⁴⁾. O referido coeficiente é representado por uma equação na forma de potência em função do tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo de solidificação empregado nos experimentos foi o mesmo utilizado por Carvalho *et al.* (2013)⁽⁸⁾. Esse foi projetado de tal maneira que o calor do metal líquido fosse extraído somente através de um sistema refrigerado a água, localizado em uma das paredes laterais do molde, promovendo assim a solidificação direcional horizontal. As superfícies laterais internas do molde foram revestidas com camadas de alumina e a parte superior foi isolada com material refratário para evitar perdas de calor para o meio ambiente. As propriedades termofísicas das ligas Al-5%Si e Al-11%Si são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades termofísicas utilizadas nas simulações de perfis térmicos do h_i .

Propriedades	Simbologia/Unidade	Al-5%Si	Al-11%Si
Condutividade térmica	K_L [W/mK] (líquido)	89,50	87,32
	K_S [W/mK] (sólido)	196,84	174,36
Calor específico	c_L [J/kgK] (líquido)	1186,12	1196,21
	c_S [J/kgK] (sólido)	1221,65	1191,38
Massa específica	ρ_L [kg/m ³] (líquido)	2397,48	2405,19
	ρ_S [kg/m ³] (sólido)	2501,72	2449,71
Calor latente de fusão	L [J/kg]	439465,54	479833,16

Coeficiente de Gibbs-Tomson	Γ [mm.K]	9 E -5	9 E -5
Parâmetros característicos	G_{0° [K.mm ⁻¹]	360	360
Difusividade de soluto no líquido	D_L [mm ² /s]	3 E -3	3 E -3
Inclinação da linha liquidus	m_L [K/wt.%]	6,587	6,587
Coeficiente de partição do soluto	K_0	0,13	0,13
Composição nominal da liga	C_0 [wt.%]	0,05	0,11
Temperatura <i>Liquidus</i>	T_L [°C]	632	590
Temperatura <i>Solidus</i> (Eutética)	T_E [°C]	577	577
Intervalo de solidificação	ΔT [°C]	55	13

As ligas estudadas foram fundidas *in situ* no dispositivo de solidificação e levadas até a temperatura correspondente a 10% acima de suas respectivas temperaturas *liquidus* (Al-5%Si: 632°C e Al-11%Si: 590°C). Atingido o nível de superaquecimento desejado, as resistências elétricas do dispositivo foram desligadas e o sistema de resfriamento a água acionado. Os valores das temperaturas foram medidos por termopares tipo K em diferentes posições do lingote durante a solidificação e os dados obtidos foram armazenados automaticamente. A partir dos dados fornecidos pelos respectivos perfis térmicos experimentais, estimaram-se os perfis teóricos de h_i pelo método do confronto dos perfis térmicos teóricos e experimentais através do método numérico de Ferreira *et al.* (2008)⁽⁴⁾ o qual, por meio de um processo iterativo, comparou as curvas geradas pelos termopares com aquelas simuladas pelo mesmo determinando, assim, um perfil transitório de h_i com o melhor ajuste entre as curvas simuladas e experimentais. Os perfis dos coeficientes de transferência de calor obtidos são representados pela Equação (A), ou seja:

$$h_i = C(t)^{-n} \quad (A)$$

onde, h_i (W/m²K), t (s), C e n são constantes que dependem, respectivamente, da temperatura de vazamento, material do molde e composição da liga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os resultados experimentais e simulados dos perfis térmicos obtidos para as ligas Al-5%Si e Al-11%Si indicando a distância dos termopares, posicionados sobre o eixo longitudinal da lingoteira, em relação à interface metal-molde. Os perfis térmicos obtidos experimentalmente por meio dos termopares durante a solidificação horizontal e os respectivos perfis teóricos fornecidos pelo modelo matemático desenvolvido por Ferreira *et al.* (2008)⁽⁴⁾ foram comparados entre si no caso das ligas investigadas conforme mostrado na Figura 1. Na Figura 2 são apresentadas as equações experimentais na forma de potência as quais descrevem o comportamento de h_i em função do tempo para as ligas analisadas.

No que se refere aos valores determinados de h_i para as ligas investigadas neste estudo, pode-se observar na Figura 2 que no início da solidificação (até 25 s) os valores de h_i são mais elevados em ambas as ligas, principalmente nos 12,5 s iniciais que correspondem a 6,25% do tempo total de solidificação representado pelo tempo necessário (200 s) para que o último termopar registrasse uma temperatura abaixo de 450°C no caso da liga Al-11%Si e menor que 400°C na liga Al-5%Si. Após esse estágio inicial, para a liga Al-5%Si o h_i se estabiliza rapidamente, contudo, para a liga Al-11%Si os valores de h_i continuam decaindo, porém com menos intensidade que no início da solidificação. Por fim, os valores de h_i se estabilizam também para a liga Al-11%Si permanecendo praticamente constantes até o final da mudança

de fase. Nota-se que os resultados de h_i obtidos para a liga Al-11%Si são bem superiores aos encontrados para a liga Al-5%Si. Esta diferença na forma como ocorre o decaimento dos valores de h_i pode ser explicada devido aos intervalos de solidificação serem bem diferentes nas duas ligas e no caso da liga Al-11%Si pelo fato da composição nominal estar bastante próxima ao ponto eutético do sistema onde a zona de transição das fases líquida e sólida torna-se bastante reduzida o que pode favorecer o surgimento da resistência térmica imposta pela liga solidificada tornando, assim, o decaimento menos acentuado que o da Al-5%Si.

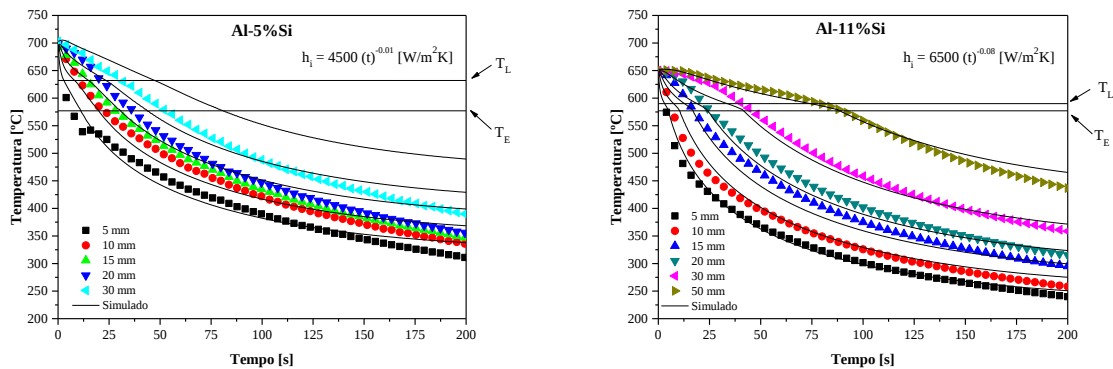


Figura 1: Perfis térmicos experimentais e simulados das ligas investigadas.

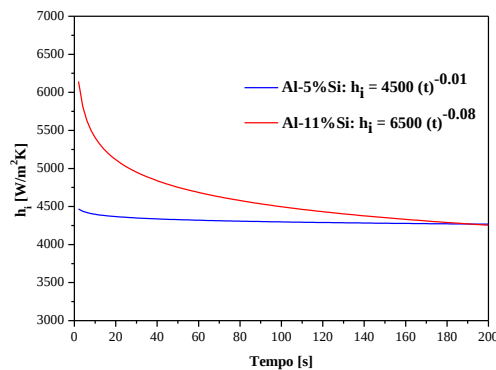


Figura 2: Equações de h_i em função do tempo para as ligas estudadas.

Os valores superiores de h_i nos estágios iniciais podem ser justificados como uma consequência direta da boa conformidade superficial entre o metal que solidifica e o molde. No momento seguinte, o h_i sofre uma considerável redução em seus valores em decorrência da formação do *gap* de ar na interface metal-molde. Isto ocorre pois, à medida em que a solidificação progride, o metal sólido contrai devido ao próprio fenômeno da mudança de fase promovido pela liberação de calor latente e a consequente expansão do molde em função da absorção do referido calor latente. Em consequência, na interface de contato do metal solidificado com a chapa molde através da qual o calor é extraído, a pressão imposta pelo metal líquido torna-se insuficiente para proporcionar uma boa condição de contato entre tais superfícies, proporcionando desta forma o surgimento de vazios na interface metal-molde preenchidos com ar diminuindo a transferência de calor rapidamente, tornando os valores de h_i praticamente constantes. Além disso, o h_i pode ser influenciado por uma série de outros fatores como a fluidez da liga, o seu intervalo de solidificação, o sentido em que ocorre a solidificação, o índice de

molhabilidade do líquido, a rugosidade das paredes internas do molde além de outras propriedades termofísicas relacionadas ao sistema metal-molde. Assim, uma justificativa detalhada para o comportamento deste parâmetro deve ser bastante cuidadosa⁽⁹⁾. Para as ligas Al-Si solidificadas no sentido vertical ascendente por Peres *et al.* (2004)⁽¹⁰⁾, as equações de h_i aumentam com a diminuição do teor de silício, condição diferente da encontrada neste estudo. Logo, os coeficientes experimentais de transferência de calor são válidos para condições particulares nas quais são mensurados, de tal maneira que servem somente como referência no modelamento da solidificação de ligas.

CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, podem ser estabelecidas as seguintes principais conclusões:

- A técnica do confronto entre os perfis térmicos experimentais e teóricos mostrou ser bastante satisfatória uma vez que o ajuste entre os pontos experimentais e as curvas simuladas pode ser considerado muito bom.
- Observa-se que h_i apresenta valores bem mais elevados nos instantes iniciais da mudança de fase líquido-sólido e à medida que a frente de solidificação avança estes valores diminuem gradativamente até praticamente se estabilizarem, particularmente no caso da liga Al-5%Si. em virtude do crescimento da camada de sólido formado assim como pela formação do espaço *gap* entre o metal e o molde.
- As equações teórico-experimentais que descrevem a evolução de h_i em função do tempo no dispositivo horizontal podem ser expressas por $h_i = 4500(t)^{-0,01}$ para a liga Al-5%Si e $h_i = 6500(t)^{-0,08}$ para a liga Al-11%Si.
- Os valores determinados para h_i são válidos somente para as condições operacionais adotadas na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará – FAPESPA.

REFERÊNCIAS

1. MOUTINHO, D.J.; SILVA, J.N.; ROCHA, O.L.; MOREIRA, A.L. Experimental analysis of the columnar to equiaxed transition of Sn-Pb hypoeutectic alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. In: 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Gramado, RS, 2009.
2. SAHIN, H. M.; KOCATEPE, K.; KAYIKCI, R.; AKAR, N. Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting–chill interface. *Energy Convers. Manag.*, v. 47, p. 19-34, 2006.
3. SANTOS, C. A.; QUARESMA, J. M. V.; GARCIA, A. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. *J. Alloys Compd.*, v. 319, p. 174-186, 2001.
4. FERREIRA, I. L.; SPINELLI, J. E.; NESTLER, B.; GARCIA, A. Influences of solute content, melt superheat and growth direction on the transient metal/mold interfacial heat transfer coefficient during solidification of Sn-Pb alloys. *Mater. Chem. Phys.*, v.111, p. 444-454, 2008.
5. MOREIRA, A.L.; SILVA, J.N.; MOUTINHO, D.J.; FERREIRA, I.L.; ROCHA, O.L. Determination of heat transfer coefficients at metal/mold interface during horizontal unsteady-state directional solidification of Sn-Pb alloys. *Mater. Chem. Phys.*, v. 130, p. 179-185, 2011.
6. HEGDE, S.; PRABHU, K.N. Modification of eutectic silicon in Al–Si alloys. *J. Mater. Sci.*, v. 43, p.3009–3027, 2008.

7. LIU, K.; CAO, X.; CHEN, X. Solidification of iron-rich intermetallic phases in Al-4.5Cu-0.3Fe cast alloy. *Metall. Mater. Trans. A*, v. 42, p. 2004-2016, 2011.
8. CARVALHO, D.B.; GUIMARÃES, E.C.; MOREIRA, A.L.; MOUTINHO, D.J.; DIAS FILHO, J.M.; ROCHA, O.L. Characterization of the Al-3wt.%Si alloy in unsteady-state horizontal directional solidification. *Mater. Res.*, v. 16, p. 874-883, 2013.
9. BARROS, A.S.; SILVA, A.P.; FERREIRA, I.L.; ROCHA, O.L.; MOREIRA, A.L. Effect of interfacial heat transfer coefficient on dendritic growth and microhardness during horizontal directional solidification of an aluminum-copper alloy. *Defect Diffus. Forum*, v. 367, pp. 10-17, 2016.
10. PERES, M.D.; SIQUEIRA, C.A.; GARCIA, A. Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. *J. Alloys Compd.*, v. 381, p. 168-181, 2004.

EXPERIMENTAL CALCULATION OF INTERFACIAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF DIRECTIVELY SOLIDIZED Al-5wt.%Si AND Al-11wt.%Si ALLOYS UNDER TRANSIENT HEAT FLOW REGIME

ABSTRACT

The analysis of the interfacial heat transfer phenomenon during solidification is quite complex, as it depends on the assumed operating and boundary conditions, the thermophysical properties of the mold and alloy as well as the temperature distribution in the metal-mold system. Moreover, these parameters vary as a function of time and temperature. In this sense, this work presents as main objectives to determine the interfacial heat transfer coefficients (h_i) of Al-5wt.%Si and Al-11wt.%Si hypoeutectic alloys directionally solidified in a horizontal water-cooled device, to evaluate their respective behaviors during the liquid-solid phase change process and to compare the results obtained for the mentioned alloys. To this end, the temperature profiles were measured at different positions along the longitudinal axis of the ingot by means of eight K-type thermocouples connected to a data acquisition system interfaced to a computer. A technique based on the comparison between experimental and simulated temperature profiles, provided by a finite difference numerical solidification model, was used to calculate the h_i values of the investigated alloys. The results showed that these heat transfer coefficients presented very high values at the beginning of solidification, due to the good surface conformity between the solidifying metal and the mold, and then decreased sharply due to the formation of an air gap at the metal-mold interface. With the evolution of the solidified layer formation, it was observed that the h_i results became practically constant until the end of solidification for both investigated alloys. Considering the same solidification time, it was found that the h_i values are higher for the Al-11wt.%Si alloy. Thus, it was concluded that the results of these coefficients for the alloys in question, when horizontally solidified under the conditions previously presented, can be described quite reasonably by means of the experimental equations proposed in this study.

Keywords: Horizontal solidification, transient regime, metal-mold interface, heat transfer coefficient, Al-Si alloys.