Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
06 a 10 de Novembro de 2022 | Águas de Lindóia – SP – Brasil

EFEITO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERFACIAL NO CRESCIMENTO DENDRÍTICO E MICRODUREZA DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL HORIZONTAL DE UMA LIGA Al-Cu-Mg

Fabrícia S. Gonzaga[1*], Gueber E. S. M. Junior[1], Gabriel C. Giuvenduto[1], José A. F. Rodrigues[1], Ivaldo L. Ferreira[1] e Antonio L. S. Moreira[1]

1 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Federal do Pará (UFPA), Avenida Augusto Corrêa, 01, Belém. CEP: 66075-970, PA.
fabricia.gonzaga@itec.ufpa.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental objetivando a determinação do coeficiente de transferência de calor interfacial durante a solidificação direcional horizontal da liga Al-4,5%Cu-1%Mg em um sistema refrigerado a água sob condições transientes de fluxo de calor. Para tanto, cinco termopares tipo K foram inseridos ao longo do eixo longitudinal de uma lingoteira de aço inoxidável a distâncias de 5, 10, 40 e 60 mm, a partir da interface metal-molde, e a um sistema de aquisição de dados no qual os valores de tempo e temperatura foram armazenados automaticamente. O confronto entre os resultados experimentais e os valores fornecidos por um método numérico permitiu a determinação do perfil do referido coeficiente de transferência de calor durante a mudança de fase líquido-sólido o qual é representado por uma equação na forma de potência capaz de descrever a variação desse coeficiente durante o processo de solidificação fornecida por $h_i = constante^{(t)-n}$ *a qual representa a melhor concordância entre as curvas experimentais e simuladas. Os resultados obtidos também incluem a variação dos espaçamentos dendríticos primários da liga investigada em função do coeficiente de transferência de calor em questão. Foi observado que os espaçamentos dendríticos primários diminuem à medida que os valores de* h_i *aumentam. Finalmente, uma equação experimental do tipo Hall-Petch é proposta para relacionar a microdureza resultante da liga com o coeficiente de transferência de calor investigado.*

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

INTRODUÇÃO

As ligas de interesse industrial aliam alto desempenho mecânico à elevada eficiência e baixo custo de manutenção. Para tanto, ligas à base de alumínio vêm conquistando cada vez mais espaço em relação às ligas tradicionais à base de ferro por conseguirem satisfazer de forma mais vantajosa determinadas propriedades, tais como elevada resistência mecânica e baixo peso específico. Com isso, as excelentes propriedades mecânicas da liga ternária Al-Cu-Mg tornam-na um material que tem sido bastante aplicado nos setores aeronáutico e automotivo[5,7].

Em geral, a solidificação de ligas industriais ocorre através da formação de estruturas dendríticas e uma interessante forma de melhorar a qualidade dos produtos obtidos é conhecer a influência que as variáveis térmicas exercem na formação dessas estruturas permitindo, assim, o controle do processo de fundição. Neste contexto, os efeitos do vetor gravidade em relação à formação dos espaçamentos dendríticos têm sido bastante investigados por meio de estudos de solidificação direcional desenvolvidos em sistemas verticais ascendentes, verticais descendentes e horizontais. Apesar da relevância tecnológica destes últimos, ainda pouco se conhece a respeito da formação microestrutural das ligas durante a solidificação horizontal devido ao grau de complexidade dos fenômenos físicos atuantes.

Nos sistemas de solidificação horizontal o fluxo de calor é extraído exclusivamente por uma das paredes laterais do molde. Vale ressaltar, que durante a mudança de fase o líquido enriquecido de soluto pode decantar ou emergir devido às forças de flutuabilidade ocasionando uma convecção termossolutal que tem como consequência um gradiente de temperatura na direção vertical[4].

MATERIAIS E MÉTODOS

Durante os experimentos foi empregado um dispositivo de solidificação horizontal refrigerado à água. Com molde de aço inoxidável com as dimensões de 150 mm de comprimento, 60 mm de largura, 60 mm de altura e com paredes 3 mm de espessura, a perda de calor nas paredes não refrigeradas foi evitada através de camadas de revestimento de alumina enquanto a superfície de extração de calor foi preparada através do processo de polimento.

Para a elaboração da liga estudada (Al-4,5%Cu-1%Mg), inicialmente um lingote de alumínio de pureza comercial e um outro de composição Mg-7%Al foram seccionados com o auxílio de uma serra de fita. Após isso, as quantidades obtidas foram adicionadas à uma porção de cobre em pó. Para tanto, foi necessário o auxílio de uma balança eletrônica analítica com precisão de 0,01g para garantir as quantidades estabelecidas pelo cálculo estequiométrico, que considerou o volume do molde e a capacidade do cadinho. O alumínio foi, posteriormente, introduzido em um cadinho de carbeto de silício revestido internamente por uma camada de tinta à base de alumina para evitar a contaminação e, em seguida, conduzido até um forno tipo mufla.

Após a total fusão do alumínio, o cadinho foi retirado do forno sendo então o cobre adicionado ao alumínio líquido, tendo o cadinho sido novamente introduzido no forno mufla a fim de permitir a fusão do segundo elemento constituinte da liga. Em seguida, após a completa fusão do cobre, o cadinho foi novamente retirado do forno visando à adição do magnésio (envolvido em papel alumínio para evitar sua oxidação) concluindo-se, assim, a elaboração da liga para em seguida ocorrer a operação de vazamento.

O vazamento da liga no estado líquido foi realizado considerando-se uma temperatura de superaquecimento correspondente a 6% acima de sua temperatura *liquidus* (T_L = 648ºC). Em sequência, as resistências elétricas do dispositivo foram desligadas e o sistema de refrigeração acionado para que fluido refrigerante induzisse uma extração de calor longitudinal horizontal conforme estabelecido neste estudo[6].

Para obter a caracterização térmica da liga foi utilizado um Almemo, obtendo-se as correspondentes curvas de variação da temperatura em função do tempo [T = f(t)] por meio da utilização dos valores experimentais das temperaturas medidos através de sete termopares tipo K posicionados em diferentes regiões ao longo do eixo longitudinal do lingote, conforme

mostrado na Figura 1, a partir da superfície de extração de calor. Através do método numérico proposto por Ferreira *et al.* [3] baseado em diferenças finitas, determinou-se o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i) representado por uma equação experimental na forma de potência em que suas constantes dependem da temperatura de vazamento, material do molde e da composição da liga.

Para os ensaios de microdureza Vickers aplicou-se uma carga através de um indentador de diamante, com formato piramidal e de base quadrada, sobre as superfícies planas e polidas das amostras correspondentes às posições transversais anteriormente referidas, produzindo uma impressão proporcional à carga de 490,3 mN durante um tempo de dez segundos. Para cada amostra foram realizadas quinze indentações. As distâncias mínimas para indentações foram definidas em conformidade com a norma ASTM E384.

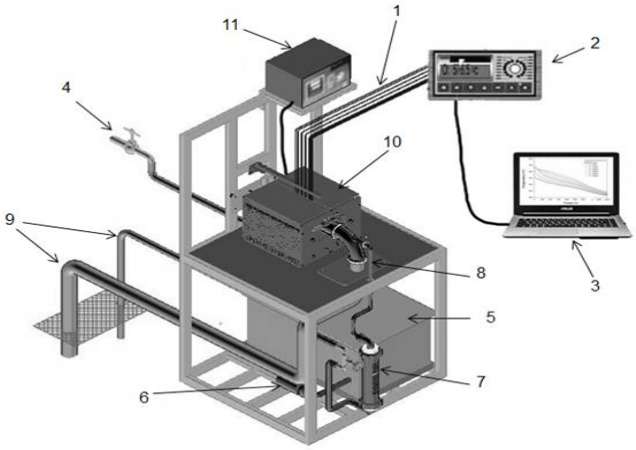

Figura 1: Conjunto de dispositivo de solidificação direcional (1- termopares; 2- FieldLogger; 3- computador; 4- entrada de água; 5- depósito de água; 6- bomba d'água; 7- rotâmetro; 8- entrada de água; 9- saída de água; 10- dispositivo de solidificação direcional; 11- controlador de temperatura).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados experimentais e simulados dos perfis térmicos obtidos para a liga em questão, permitindo analisar a variação das temperaturas em função do tempo [T = f(t)], obtendo-se os resultados capazes de descrever o processo de extração de calor durante a solidificação em regime transiente de forma bastante satisfatória.

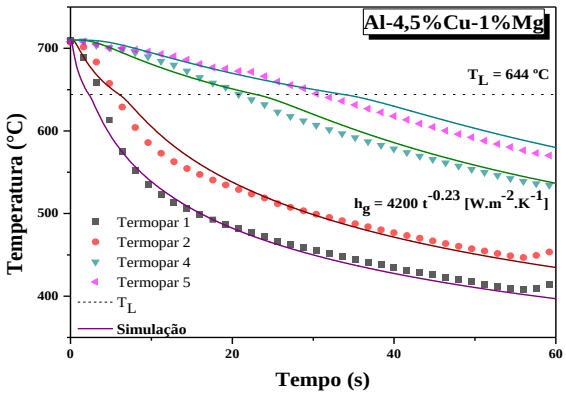

Figura 2: Curvas de resfriamento temperatura em função do tempo obtidas durante a solidificação direcional da liga investigada.

Um método numérico, baseado em diferenças finitas, possibilitou utilizar a técnica do confronto entre os perfis térmicos experimentais e simulados para a determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i). O referido coeficiente pode ser representado pela equação experimental $h_i = 4200(t)^{-0,23}$, conforme mostrado na Figura 3. A partir da análise do perfil do mesmo, é possível observar que os seus valores de são bem mais elevados nos primeiros instantes da solidificação, o que pode ser justificado pela boa conformidade superficial do metal com o molde nos estágios iniciais da solidificação[2].

O perfil da curva mostra uma queda acentuada em seus valores em função da formação de um *gap* de ar na interface metal/molde produzido pela contração volumétrica do sólido e expansão do molde. Além disso, a evolução da camada sólida de metal ao longo da mudança de fase líquido/sólido contribui para a desaceleração da solidificação, o que seguramente afeta a estrutura e, por conseguinte, as propriedades e o desempenho do material[1]. Em seguida, verifica-se que os valores de h_i passam a ser praticamente constantes até o final da solidificação.

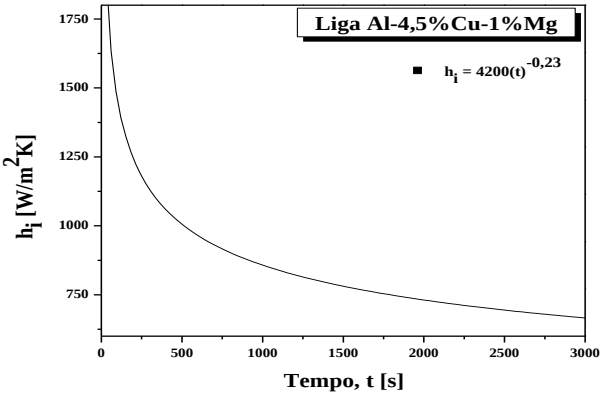

Figura 3 - Perfil de coeficiente de transferência de calor a partir da superfície metal\molde da liga ternária Al-4,5%Cu-1%Mg solidificada horizontalmente.

Algumas das propriedades mecânicas dos materiais solidificados podem eventualmente ser estimadas por meio do ensaio de dureza pois trata-se de uma técnica bastante simples e fácil de ser executada. Nesse sentido, a Figura 4 apresenta os resultados experimentais do comportamento de HV em função de λ_2 para a liga examinada neste trabalho. Para tanto, uma equação experimental do tipo potência em função do tempo, representada pela Equação (A), foi obtida. A referida equação permite verificar valores mais elevados e menos elevados de microdureza em função dos espaçamentos dendríticos secundários:

$$HV = K(\lambda_2)^{-m} \qquad (A)$$

onde, m é o valor do expoente em função de λ_2 e K é uma constante determinada experimentalmente para cada tipo de liga. Verifica-se que as medições de microdureza ao longo das seções longitudinais do lingote da liga Al-4,5%Cu-1%Mg indicou que não houve alteração significativa nos valores de HV, mesmo com a variação de λ_2, permanecendo em um valor próximo de 140 HV.

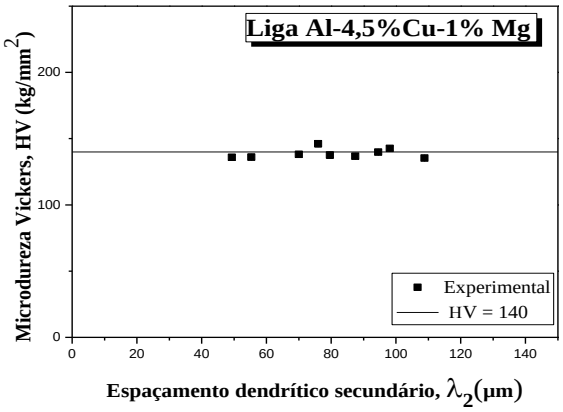

Figura 4 - Variação da microdureza em função dos espaçamentos dendríticos secundários.

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais encontrados neste trabalho permitem que sejam obtidas as seguintes conclusões:

- O método desenvolvido por Ferreira *et al*. (2008) permitiu prever satisfatoriamente o comportamento do coeficiente de transferência de calor interfacial da liga Al-4,5%Cu1%Mg durante a solidificação direcional, sob condições transientes de extração de calor, em um dispositivo de configuração horizontal refrigerado à água.
- O referido coeficiente de transferência de calor pode ser representado na forma de função potência em função do tempo por meio da equação $h_i = 4200(t)^{-0,23}$ [W/m^{2}K].
- O ternário Al-4,5%Cu1%Mg não apresentou variação relevante da microdureza em função dos espaçamentos dendríticos secundários.

REFERÊNCIAS

1. BAYRAM, Ü.; MARAŞLI, N. Thermal conductivity and electrical resistivity dependences on growth rate in the directionally solidified Al–Cu–Ni eutectic alloy. Journal of Alloys and Compounds, v 753, (2018) 695–702. doi:10.1016/j.jallcom.2018.04.277.
2. CARVALHO, D.; RODRIGUES, J. A.; SOARES, D.; AVIZ, J.; BARROS, A.; FERREIRA, I. L.; MOREIRA, A. L. S. Microindentation hardness-secondary dendritic spacings correlation with casting thermal parameters in an Al-9wt.%Si alloy. Mat. Sci. (Medžiagotyra), v. 24, n. 1, p. 18-23, 2018.
3. FERREIRA, I.L.; SPINELLI, J.E; GARCIA, A. Gravity-driven inverse segregation during transient upward directional solidification of Sn–Pb hypoeutectic alloys. Journal of Alloys and Compounds, v. 475, p. 396–400, 2009.
4. GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. 2 ed. Editora da Unicamp, 2007.
5. GU, T.; CHEN, B.; TAN, C.; FENG, J. Microstructure evolution and mechanical properties of laser additive manufacturing of high strength Al-Cu-Mg alloy. Op. & Las. Tech., v. 112, p. 140–150, 2009. doi:10.1016/j.optlastec.2018.11.008.
6. MAGNO, B.; Parâmetros Térmicos e Espaçamentos Dendríticos Primários da Liga Al-8%Cu Solidificada Horizontalmente. 2015, 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, IFPA/PA, Pará.
7. KAYGISIZ, Y; MARAŞLI, N. Microstructural, mechanical, and electrical characterization of directionally solidified Al–Cu–Mg eutectic alloy. Physics of Metals and Metallography, v. 118, p. 389–398, 2017. doi:10.1134/s0031918x17040123.

EFFECT OF THE INTERFACIAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT ON DENDRITIC GROWTH AND MICRO-HARDNESS DURING HORIZONTAL DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF AN Al-Cu-Mg ALLOY

ABSTRACT

This work presents a theoretical-experimental study aimed at determining the interfacial heat transfer coefficient during the horizontal directional solidification of Al-4.5%Cu-1%Mg alloy in a water-cooled system under transient heat flow conditions. For this purpose, five K-type thermocouples were inserted along the longitudinal axis of a stainless steel ingot at distances of 5, 10, 40, and 60 mm from the metal-mold interface and to a data acquisition system in which time and temperature values were automatically stored. The confrontation between the experimental results and the values provided by a numerical method allowed the determination of the profile of the referred heat transfer coefficient during the liquid-solid phase change which is represented by an equation in the power form capable of describing the variation of this coefficient during the solidification process provided by $h_i = constant(t)^{-n}$ *which represents the best agreement between the experimental and simulated curves. The results obtained also include the variation of the primary dendritic spacings of the investigated alloy as a function of the heat transfer coefficient in question. It was observed that the primary dendritic spacings decrease as the hi values increase. Finally, an experimental Hall-Petch type equation is proposed to relate the resulting microhardness of the alloy to the investigated heat transfer coefficient.*

Keywords: *Horizontal solidification, transient regime, metal-mold interface, heat transfer coefficient, Al-Cu-Mg.*