



PARÂMETROS TÉRMICOS, ESTRUTURA DENDRÍTICA E DUREZA VICKERS DA LIGA Al-4,5%Cu-1%Mg SOLIDIFICADA EM UM SISTEMA HORIZONTAL SOB CONDIÇÕES TRANSIENTES

Fabírcia S. Gonzaga¹, Gabriel C. Giuwenduto¹, Gueber E. M. Santos Júnior^{1*}, 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 da solidificação de sistemas metálicos multicomponentes representa um grande avanço para o desenvolvimento de materiais com propriedades cada vez mais específicas. Nesse sentido, para ligas de alumínio, o cobre é considerado um dos mais importantes elementos em virtude de sua alta solubilidade e por conferir um aumento substancial à resistência mecânica. Entre as ligas Al-Cu de maior interesse industrial, cabe mencionar o duralumínio que é o nome comercial de uma classe de ligas leves de alumínio contendo Cu (1,5%-4,5%), com teores de Mg (0,45%-1,5%). Nesse contexto, este trabalho objetiva determinar os parâmetros térmicos e os espaçamentos dendríticos primários da liga Al-4,5%Cu-1%Mg solidificada direcionalmente em um sistema horizontal refrigerado a água sob condições transientes de extração de calor e correlacionar, por meio de equações experimentais, os referidos parâmetros envolvidos durante a solidificação, os espaçamentos dendríticos primários e a propriedade mecânica de microdureza. Os perfis de temperaturas foram medidos por termopares tipo K em sete diferentes posições ao longo do eixo longitudinal do lingote e os valores obtidos por meio de um sistema de aquisição de dados foram armazenados automaticamente. Um método teórico-experimental foi aplicado para determinar as velocidades de deslocamento da isoterma liquidus (V_L) e as taxas de resfriamento (T_R) em função da posição a partir da interface metal-molde. Os resultados simulados e experimentais levantados para esses parâmetros apresentaram uma concordância muito boa. Os espaçamentos dendríticos primários foram quantificados conforme técnicas metalográficas disponíveis na literatura. A análise das microestruturas indicou que os referidos espaçamentos dendríticos foram bastante influenciados por V_L ($\lambda_1 = 215V_L^{-0,37}$) e T_R ($\lambda_1 = 297T_R^{-0,32}$). Os resultados experimentais levantados mostraram que os valores de microdureza permanecem em torno de 140 HV à medida que os espaçamentos dendríticos aumentam. Finalmente, são apresentadas equações experimentais do tipo potência em função do tempo capazes de correlacionar os parâmetros térmicos, os espaçamentos dendríticos investigados e a propriedade mecânica de microdureza. Assim, foi possível também concluir que a concordância obtida entre os resultados experimentais encontrados para os espaçamentos investigados e os valores teóricos de modelos de crescimento dendrítico primário previstos na literatura e utilizados neste trabalho mostrou-se, de maneira geral, apenas regular em função das diversas hipóteses físicas assumidas por esses modelos teóricos.

Palavras-chave: Solidificação direcional, condições transientes, crescimento dendrítico, microdureza Vickers, ligas Al-Cu-Mg.

INTRODUÇÃO

As propriedades dos produtos metálicos são dependentes da estrutura solidificada e, portanto, dos diversos fatores operacionais e variáveis térmicas que controlam a sua formação. Assim, um melhor entendimento da influência dos parâmetros térmicos sobre a formação dos aspectos estruturais é imprescindível para o planejamento dos processos de fundição e lingotamento com o intuito de serem obtidas propriedades mecânicas adequadas às peças obtidas⁽¹⁾. Ligas do sistema Al-Cu-Mg apresentam um vasto campo de aplicação tanto na indústria aeronáutica quanto no setor automotivo o que justifica a importância tecnológica de estudos relacionados à caracterização destes materiais. Este sistema metálico constitui a base para elaboração dos duralumínios que são empregados na fabricação de peças como bordos de ataque de aeronaves, componentes estruturais e pistões para motores^(2,3).

Nesse contexto, a análise da morfologia das ligas solidificadas é de grande relevância considerando que, muitas vezes, a espessura dos braços dendríticos é mais importante que o tamanho médio do grão para a melhoria das propriedades mecânicas. Recentes estudos de natureza teórica-experimental em ligas à base de alumínio⁽⁴⁻⁶⁾ demonstram os efeitos significativos que parâmetros térmicos como a velocidade do deslocamento da isoterma *liquidus* (V_L), gradiente térmico na frente da interface sólido/líquido (G_L) e taxa de resfriamento (T_R) têm sobre a microestrutura de solidificação. Por outro lado, ainda são poucos os estudos que investigam ligas ternárias à base de Al solidificadas em dispositivos de configuração horizontal e ainda são mais raros aqueles que abordam esta temática sob condição de regime transiente de extração de calor.

Sabe-se que a microdureza Vickers (HV) pode ser determinante para a eventual estimativa de diversas outras propriedades dentre estas a resistência mecânica que pode ser determinada por meio de correlações analíticas de natureza experimental⁽⁷⁾. Além disso, os parâmetros térmicos de solidificação e os espaçamentos dendríticos são comumente correlacionados com valores de microdureza visto que tais variáveis influenciam diretamente no comportamento dessa propriedade mecânica. Kaya *et al.* (2009)⁽⁸⁾, por exemplo, correlacionam os espaçamentos dendríticos primários e secundários (λ_1 e λ_2 , respectivamente) de ligas à base de alumínio com valores de microdureza Vickers sob condições de solidificação em regime estacionário enquanto Souza *et al.* (2018)⁽⁹⁾ e Barros *et al.* (2019)⁽¹⁰⁾ correlacionam estes mesmos espaçamentos, também em ligas à base de alumínio, com resultados da referida propriedade mecânica, no entanto sob condições de solidificação em regime transiente.

Considerando o exposto, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo experimental da liga ternária Al-4,5%Cu-1%Mg solidificada em um dispositivo de configuração horizontal sob regime transiente de extração de calor, estabelecendo correlações entre os espaçamentos dendríticos primários (λ_1), os parâmetros térmicos da solidificação (V_L e T_R) e a microdureza Vickers (HV).

MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo de solidificação empregado nos experimentos, apresentado na Figura 1, foi o mesmo utilizado por Carvalho *et al.* (2013)⁽¹¹⁾. O mesmo foi projetado de tal maneira que o calor latente 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 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.

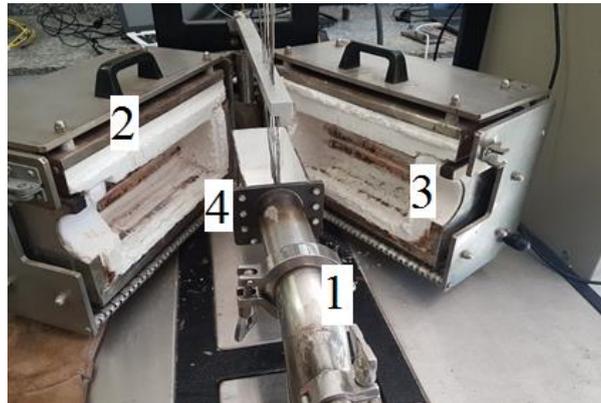


Figura 1: Vista ampliada do dispositivo de solidificação direcional horizontal: (1) entrada de água, (2) material refratário, (3) resistência de aquecimento e (4) lingoteira de aço inox.

A liga estudada foi fundida *in situ* no dispositivo de solidificação e levada até a temperatura correspondente a 6% acima de sua temperatura *liquidus* ($T_L = 644 \text{ }^\circ\text{C}$). Atingindo-se o nível de superaquecimento desejado, as resistências elétricas do dispositivo foram desligadas e o sistema de arrefecimento acionado. Os valores das temperaturas foram medidos por quatro termopares tipo K localizados na lingoteira em posições a 5, 10, 20 e 30 mm a partir da superfície de extração de calor tendo os dados térmicos obtidos sido armazenados automaticamente em um sistema de aquisição de dados.

Os resultados de V_L foram determinados a partir da derivada da função $P = f(t)$, a qual foi definida experimentalmente pela interseção da reta equivalente à T_L da liga estudada com o perfil térmico fornecido por cada termopar o que permitiu determinar o tempo de passagem da isoterma *liquidus* em cada posição dos termopares. Os valores de T_R foram estimados por meio de derivadas de funções polinomiais de segunda ordem $T = f(t)$ plotadas sobre dados experimentais compreendidos em intervalos imediatamente anteriores e posteriores aos respectivos pontos de interseção da linha horizontal, indicativa da T_L , com os perfis de resfriamento gerados pelos termopares.

Corpos de prova (CP) obtidos nas seções transversais correspondentes às posições a 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 mm em relação à interface metal-molde foram preparados metalograficamente a fim de que fosse possível caracterizar e quantificar λ_1 e λ_2 . Nos ensaios de microdureza Vickers foram realizadas vinte indentações para cada CP levando em consideração o centro da amostra como referência, com uma distância correspondente ao triplo da medida da diagonal da indentação (Norma ASTM E384).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros térmicos ($V_L = f(P)$) e ($T_R = f(P)$) em função da posição a partir da interface metal-molde, foram determinados e os seus respectivos valores foram comparados com aqueles fornecidos por um método numérico baseado em diferenças finitas proposto por Ferreira *et al.* (2008)⁽¹²⁾, tendo os resultados apresentado uma boa concordância, conforme indicado na Figura 2.

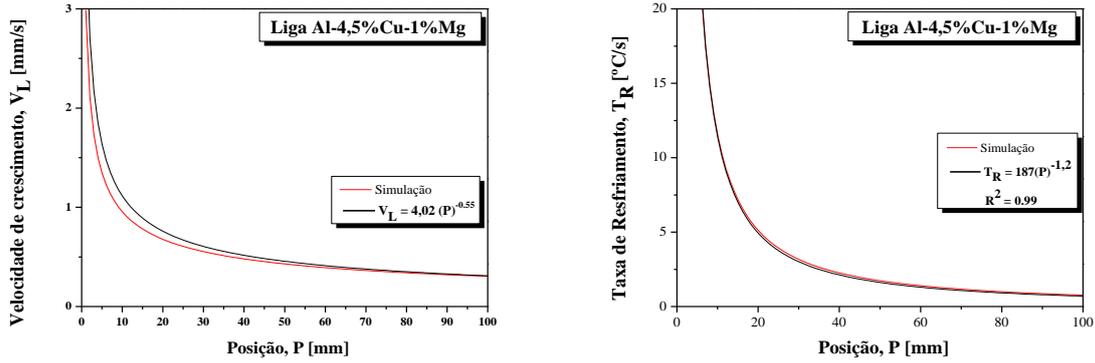


Figura 2: Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* (à esquerda) e taxa de resfriamento (à direita) em função da posição a partir da interface metal-molde para a liga Al-4,5%Cu-1%Mg.

Na Figura 3, observam-se valores de λ_1 mais refinados em posições mais próximas à interface metal-molde e valores aumentando progressivamente conforme se distancia dessa interface. É importante evidenciar que a diminuição dos valores de V_L e T_R durante a solidificação está diretamente relacionada com a elevação da resistência térmica promovida pelo aumento progressivo da camada de metal solidificado durante o processo de mudança de fase líquido-sólido assim como pelo surgimento gradativo do *gap* de ar na interface metal-molde consequência da contração do metal sólido e expansão do molde.

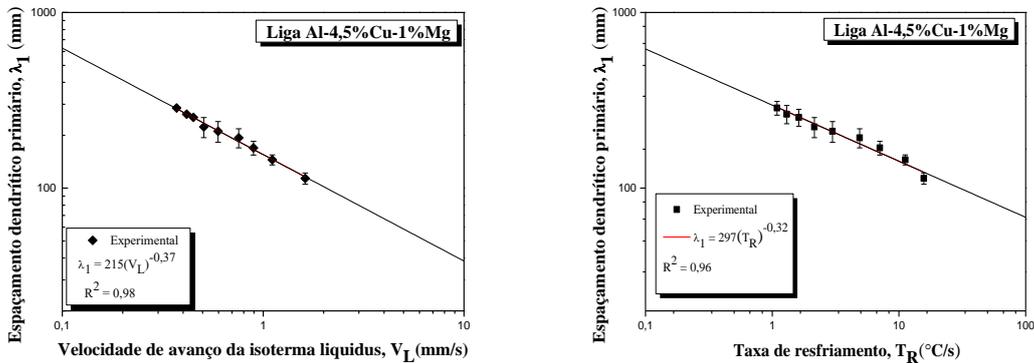


Figura 3: Variação de λ_1 em função de V_L (à esquerda) e variação de λ_1 em função de T_R .

As medições de microdureza ao longo das seções transversais do lingote da liga investigada mostraram que não houve alteração significativa nos valores de HV, mesmo com a variação dos referidos espaçamentos dendríticos, permanecendo em um valor próximo de 140 HV.

CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, as seguintes principais conclusões podem ser estabelecidas:

- Os resultados experimentais encontrados para V_L e T_R diminuem à medida que a frente de solidificação se afasta da interface metal-molde, isto é, quanto mais próximo à superfície de extração de calor maiores são os valores desses parâmetros.

- Tais valores podem ser representados adequadamente por equações na forma de potência em função da posição dadas, respectivamente, por $V_L = 4,02(P)^{-0,55}$ mm/s e $T_R = 187(P)^{-1,2}$ K/s.
- A comparação dos valores experimentais dos parâmetros térmicos levantados com as previsões teóricas fornecidas pelo método numérico desenvolvido por Ferreira *et al.* (2008) apresentou uma boa concordância entre os resultados encontrados.
- Os espaçamentos dendríticos primários aumentam progressivamente da interface metal-molde para o interior do lingote uma vez que a ação do fluido de arrefecimento impõe valores de velocidades e taxas de resfriamento bastante elevados próximo à base refrigerada.
- Os valores de λ_1 apresentam uma importante correlação com as variáveis térmicas estudadas e podem ser representados, por equações na forma de potência, em função da posição da frente de solidificação e da taxa de resfriamento fornecidas, respectivamente, por $\lambda_1 = 215V_L^{-0,37}$ e $\lambda_1 = 297T_R^{-0,32}$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

1. BARROS, A.S. Solidificação horizontal das ligas Al-3%Cu e Al-3%Cu-0,5%Mg: estrutura dendrítica, microdureza, resistência à corrosão e aplicação do tratamento térmico t6 na liga ternária. 2018, 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, UFPA/PA, Belém.
2. WANG, H.; LI, C.; LI, J.; WEI, X.; MEI, R. Effect of deformation and aging on properties of Al-4.1%Cu-1.4%Mg aluminum alloy. *Int. Sch. Res. Notices*, v. 2013, p. 902970-1-902970-8, 2013.
3. COCHARD, A.; ZHUB, K.; JOULIÉA, S.; DOUINA J.; HUEZB, J.; ROBBIOLAC, L.; SCIAUA, BRUNETTA, M. Natural aging on Al-Cu-Mg structural hardening alloys – investigation of two historical duralumins for aeronautics. *Mater. Sci. Eng. A*, v. 690, p. 259-269, 2017.
4. KAYGISIZ, Y.; MARAŞLI, N. Microstructural, mechanical, and electrical characterization of directionally solidified Al-Cu-Mg eutectic alloy. *Phys. Met. Metallogr.*, v. 118, p. 389-398, 2017.
5. ÇADIRLI, E.; AKER, A.; KAYGISIZ, Y.; ŞAHİN, M. Influences of growth velocity and Fe content on microstructure, microhardness, and tensile properties of directionally solidified Al-1.9Mn-xFe ternary alloys. *Mater. Res.*, v. 20, p. 801-813, 2017.
6. ACER, E.; ÇADIRLI, E.; EROL, H.; GÜNDÜZ, M. Effect of growth rate on the microstructure and microhardness in a directionally solidified Al-Zn-Mg alloy. *Metall. Mater. Trans.*, v.47, p. 3040-3051, 2016.
7. FAN, J.; LI, X.; SU, Y.; GUO, J.; FU, H.; The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy. *J. Alloys Compd.*, v. 506, p. 593-599, 2010.
8. KAYA H.; GÜNDÜZ, M.; ÇADIRLI E.; MARASLI, N. Dependency of microindentation hardness on solidification processing parameters and cellular spacing in the directionally solidified Al based alloys. *J. Alloys Compd.*, v. 478, p. 281-286, 2009.
9. SOUZA, F.; LIMA, J.; RIZZIOLLI, C.; MAGNO, I.; BARROS, A.; MOREIRA, A.; ROCHA, O. Microstructure and microhardness in horizontally solidified Al-7Si-0.15Fe-(3Cu; 0.3Mg) alloys. *J. Mater. Sci. Technol.*, v. 34, p. 1252-1264, 2018.

10. BARROS, A. S.; RODRIGUES, J. A. F.; SANTOS JÚNIOR, G. E. M.; GONZAGA, F. S.; COSTA, M. O.; AZEVEDO, A. F.; MOREIRA, A. L. S. Horizontally solidified Al-11wt%Si alloy: thermal parameters, microstructure and microindentation hardness. In: XVIII Brazilian Materials Research Society Meeting - SBPMat, Balneário Camboriú – SC, 2019.
11. 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.
12. 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.

THERMAL PARAMETERS, DENDRITIC STRUCTURE AND VICKERS HARDNESS OF THE Al-4.5wt.%Cu-1wt.%Mg SOLIDIFIED ALLOY IN A HORIZONTAL SYSTEM UNDER TRANSIENT CONDITIONS

ABSTRACT

The analysis of the solidification of multi-component metallic systems represents a major advance for the development of materials with increasingly specific properties. In this sense, for aluminum alloys, copper is considered one of the most important elements because of its high solubility and because it gives a substantial increase in mechanical strength. Among the Al-Cu alloys of greatest industrial interest is duralumin, which is the trade name for a class of light aluminum alloys containing Cu (1.5%-4.5%), with Mg contents (0.45%-1.5%). In this context, this work aims to determine the thermal parameters and the primary dendritic spacings of Al-4.5%Cu-1%Mg alloy directionally solidified in a horizontal water-cooled system under transient heat extraction conditions and correlate, by means of experimental equations, the said parameters involved during solidification, the primary dendritic spacings and the mechanical property of microhardness. Temperature profiles were measured by K-type thermocouples at seven different positions along the longitudinal axis of the ingot and the values obtained by means of a data acquisition system were stored automatically. A theoretical-experimental method was applied to determine the liquidus isotherm displacement velocities (V_L) and cooling rates (T_R) as a function of position from the metal/mold interface. The simulated and experimental results surveyed for these parameters showed very good agreement. The primary dendritic spacings were quantified according to metallographic techniques available in the literature. The microstructure analysis indicated that the mentioned dendritic spacings were greatly influenced by V_L ($\lambda_1 = 215V_L^{-0,32}$) and T_R ($\lambda_1 = 297T_R^{-0,32}$). The experimental results surveyed showed that the microhardness values remain around 140 HV as the dendritic spacings increase. Finally, experimental equations of power type as a function of time capable of correlating the thermal parameters, the investigated dendritic spacings and the mechanical property of microhardness are presented. Thus, it was also possible to conclude that the agreement obtained between the experimental results found for the investigated spacings and the theoretical values of primary dendritic growth models predicted in the literature and used in this work proved, in general, to be only regular as a function of the various physical assumptions made by these theoretical models.

Keywords: Directional solidification, transient conditions, dendritic growth, Vickers microhardness, Al-Cu-Mg alloys.