



## ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA TRANSIÇÃO COLUNAR-EQUIAXIAL NA LIGA Al-4,5%Cu-1%Mg SOLIDIFICADA HORIZONTALMENTE

Fabília S. Gonzaga<sup>1\*</sup>, Gueber E. S. M. Junior<sup>1</sup>, José A. F. Rodrigues<sup>1</sup>, Gabriel C. Giuwenduto<sup>1</sup>, Ivaldo L. Ferreira<sup>1</sup> e Antonio L. S. Moreira<sup>1</sup>

*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](mailto:fabricia.gonzaga@itec.ufpa.br)*

### RESUMO

*O entendimento dos efeitos dos fatores operacionais e térmicos que atuam durante a formação das zonas estruturais coquilhada, colunar e equiaxial nos materiais fundidos tais como composição da liga, temperatura de vazamento, material do molde, coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde, velocidade de deslocamento da isoterma liquidus, taxa de resfriamento, gradientes térmicos, dimensão e geometria da peça, presença de convecção no líquido, transporte de soluto etc. é de fundamental importância para a melhoria da eficiência do processo de fundição envolvido. Com base no conhecimento dos princípios termofísicos sob os quais essas zonas são formadas, é possível manipular de forma bastante razoável a macroestrutura dos produtos fundidos e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. Assim, este trabalho objetiva desenvolver um estudo teórico-experimental acerca da transição da zona colunar para a zona equiaxial (TCE) na liga Al-4,5%Cu-1%Mg. Para tanto, a referida liga foi solidificada direcionalmente, sob condições transientes de fluxo de calor, em um dispositivo horizontal refrigerado a água. Após o devido procedimento metalográfico foi possível revelar a macroestrutura da liga estudada quando identificou-se a presença de uma TCE. Um método numérico possibilitou a determinação de variáveis térmicas que influenciaram a referida transição estrutural o que permitiu uma análise comparativa com os resultados experimentais obtidos com relação à ocorrência da posição e do perfil da TCE considerando o efeito da composição nominal da liga. Uma vez que a solidificação na configuração horizontal pode apresentar também gradientes de temperaturas verticais e transversais, propõe-se um estudo mais aprofundado sob o ponto de vista físico-matemático com abordagem bidimensional para melhor compreensão do efeito da convecção termossolutal que atua na formação da TCE em ligas ternárias.*

**Palavras-chave:** *Solidificação horizontal, regime transiente, parâmetros térmicos, transição colunar-equiaxial, ligas Al-Cu-Mg.*

### INTRODUÇÃO

O processo de fundição representa a mais importante alternativa para a fabricação de produtos metálicos acabados e semi-acabados sendo responsável por cerca de mais de 99% dos mesmos. A relação entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho dos materiais metálicos é extremamente importante pois é fato consagrado na literatura que a microestrutura

exerce elevada influência nas futuras propriedades dos produtos obtidos e o seu desempenho será em função dessas propriedades<sup>(1,6,9)</sup>.

As ligas à base de Al constituem uma classe de materiais versáteis para as mais diversas aplicações industriais<sup>(7)</sup>. Ligas do sistema Al-Cu, por exemplo, 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<sup>(2)</sup>. Além da composição química dessas ligas, as condições de solidificação também influenciam diretamente a formação da microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades finais dos produtos fundidos<sup>(8)</sup>.

A solidificação, fenômeno físico no qual se baseia a fundição, pode ser definido como um processo de transformação da fase sólida para a fase líquida dos materiais com conseqüente liberação de calor latente. As ligas metálicas, quando solidificadas direcionalmente, podem produzir em sua macroestrutura grãos colunares e equiaxiais que proporcionam propriedades anisotrópicas comprometendo o desempenho mecânico dos mesmos. Portanto, compreender tal mecanismo é fundamental para o entendimento da relação entre as condições de processamento, as estruturas encontradas, as propriedades obtidas e o correspondente comportamento mecânico desses materiais<sup>(4)</sup>.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A liga investigada foi fundida em um forno tipo mufla e o metal líquido vazado em uma lingoteira de aço inoxidável (150 mm de comprimento, 60 mm de largura, 60 mm de altura e 3 mm de espessura) acoplada a um dispositivo de solidificação direcional de configuração horizontal projetado de tal maneira que o calor latente do metal líquido fosse extraído somente através de uma das paredes laterais por meio de um sistema de arrefecimento a água, localizado na parte frontal da lingoteira promovendo, assim, a solidificação horizontal (Figura 1). Inicialmente, o sistema de aquecimento do dispositivo foi acionado até uma temperatura 6% acima da temperatura liquidus, 648 °C (temperatura liquidus somada à taxa de superaquecimento), da liga estudada para garantir a fusão total da mesma.

A partir dessa temperatura, o sistema de aquecimento do dispositivo foi desligado iniciando-se o resfriamento do metal líquido. O início do processo de solidificação se iniciou por meio do desligamento do sistema de aquecimento e acionamento imediato da válvula que ativou o funcionamento da bomba d'água para liberação do fluido de arrefecimento, com vazão de 10 LPM, controlada por um rotâmetro. Essa condição de resfriamento permaneceu até a solidificação do líquido se completar.

Objetivando a utilização de técnicas metalográficas propostas na literatura<sup>(2,3)</sup>, o lingote obtido após a completa solidificação da liga foi seccionado longitudinalmente, conforme indicado na Figura 2, para a caracterização macroestrutural. Uma das partes do lingote foi selecionada e preparada utilizando-se lixas d'água de carbetto de silício com granulometrias crescentes correspondentes a 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Em seguida, com a superfície limpa por álcool para eliminar resíduos e manchas existentes, foi realizado o ataque químico. Para tanto, foi realizada a imersão da peça durante trinta segundos em uma solução de Keller, cuja composição foi 15 ml de HNO<sub>3</sub>, 10 ml de HCl, 5 ml de HF e 70 ml de H<sub>2</sub>O revelando, assim, a macroestrutura de solidificação da liga.

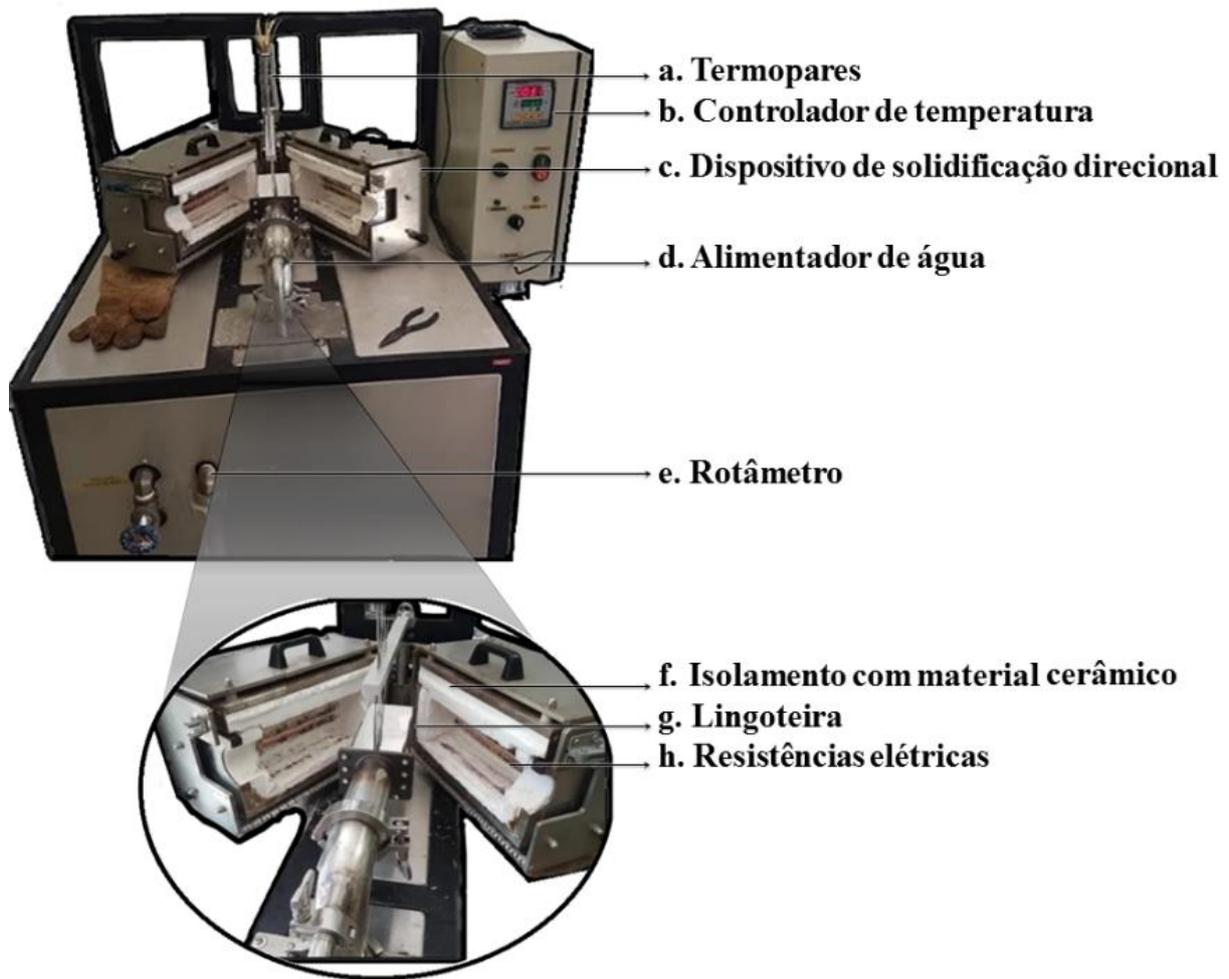


Figura 1: Registro fotográfico do conjunto que compõe o dispositivo de solidificação direcional horizontal utilizado neste trabalho.

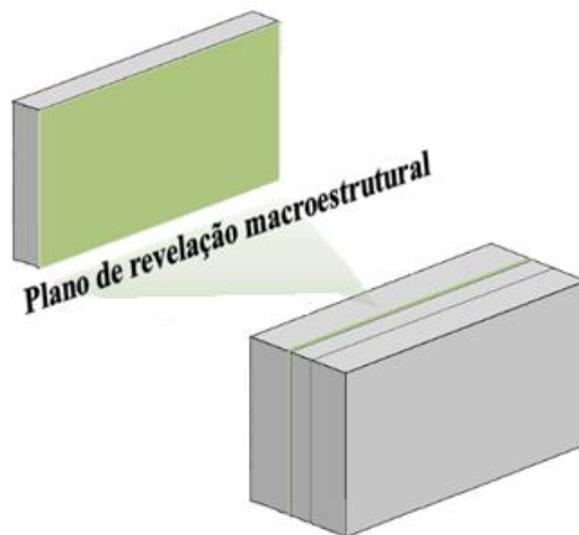


Figura 2: Ilustração do procedimento de cortes das amostras realizados em cada lingote e esquema de determinação da macroestrutura

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A preparação metalográfica da referida liga foi realizada com êxito o que permitiu a revelação da correspondente macroestrutura, apresentada na Figura 3, na qual podem ser observados, próximo à interface metal-molde, grãos bastante grosseiros tipicamente colunares com direção preferencial bem definida coincidindo com aquela da extração de calor. Pode ser verificada, igualmente, a presença de grãos equiaxiais de dimensões reduzidas e sem qualquer direção preferencial. Finalmente, também pode ser notada a presença de uma transição colunar-equiaxial não plana correspondente a uma região localizada na seção longitudinal do lingote entre as posições 50 mm e 85 mm a partir da interface metal/molde.

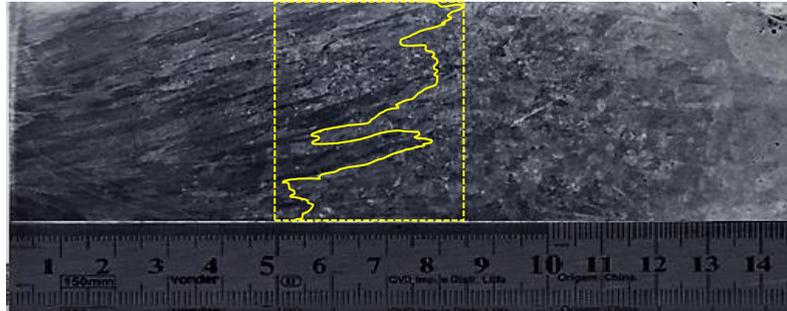


Figura 3 - Macroestrutura obtida para a liga Al-4,5%Cu-1%Mg.

Analisando a macroestrutura revelada, também observam-se grãos colunares com tendência de crescimento no sentido diagonal ascendente. De acordo com Murakami et al.<sup>(8)</sup>, que analisaram a influência de fluxos convectivos sobre a direção de crescimento de dendritas e grãos colunares em ligas do sistema Al-Cu, este fenômeno de deflexão dos grãos colunares pode ser considerado como um indício convincente de que durante a solidificação houve um fluxo convectivo à frente da interface mushy/líquido. É importante ressaltar, que Ferreira et al.<sup>(4)</sup>, propuseram um estudo acerca deste fenômeno no qual analisam por meio de um modelo numérico o comportamento da TCE em ligas multicomponentes. Este fenômeno também tem sido observado em outros estudos que apresentam macroestruturas de ligas de outros sistemas solidificadas em dispositivos de configuração horizontal<sup>(3,11)</sup>.

## CONCLUSÕES

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

- Os parâmetros operacionais adotados neste estudo teórico-experimental permitiram a obtenção de uma macroestrutura para a liga Al-4,5%Cu-1%Mg na qual pode ser observada uma transição colunar equiaxial.
- A característica básica da transição colunar-equiaxial obtida para a referida liga, segundo as condições de solidificação assumidas, é que a mesma não é plana e ocorre em uma região localizada na seção longitudinal do lingote entre as posições 50 mm e 85 mm a partir da interface metal/molde.
- A transição colunar-equiaxial representa um objeto de estudo de grande interesse para a programação das propriedades mecânicas de produtos fundidos.

## REFERÊNCIAS

1. AMIRKHANLOU, S. J. I, Casting lightweight stiff aluminum alloys: a review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019: 10408436.
2. 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, PA, Brasil, 2013.
3. COSTA, T. A., DIAS, M., SILVA, C., FREITAS, E. SILVA, A. P., CHEUNG, N., GARCIA, A. Measurement and interrelation of length scale of dendritic microstructures, tensile properties, and machinability of Al-9 wt% Si-(1 wt% Bi) alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
4. FERREIRA, I. L.; VOLLER, V. R.; NESTRER, B.; GARCIA, A. Two-dimensional numerical model for the analysis of macrosegregation during solidification. *Computational Materials Science*, n. 46, p. 358–366, 2009.
5. FERREIRA, I. L.; MOREIRA, A.L.S.; AVIZ, J.A.S.; COSTA, T.A.; ROCHA, O.L.; BARROS, A.S.; GARCIA, A. On an expression for the growth of secondary dendrite arm spacing during non-equilibrium solidification of multicomponent alloys: validation against ternary aluminum-based alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, p. 634-650, 2018.
6. GARCIA, A. Solidificação: fundamentos e aplicações. Editora da Unicamp, v. 2, 2007.
7. KAKITANI, R.; OLIVEIRA, R.; REYES, R. V.; RODRIGUES, A. V. et al. Metal/mold thermal conductance affecting ultrafine scale microstructures in aluminum eutectic alloys. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021: 101144.
8. MURAKAMI, K.; FUJIYAMA, T.; KOIKE, A.; OKAMOTO, T. Influence of melt flow on the growth directions of columnar grains and columnar dendrites. *Acta Metallurgica*, v. 31, p. 1425-1432, 1983.
9. RODRIGUES, A. V.; LIMA, T. S.; VIDA, T. A.; BRITO, C.; GARCIA, A.; CHEUNG, N. Microstructure and tensile/corrosion properties relationships of directionally solidified Al–Cu–Ni alloys. *Metals and Materials International*, v. 24, p. 1058-1076, 2018.
10. SOLTANI, H.; NGOMESSE, F.; REINHART, G.; BENOUDIA, M. C; ZAHZOUH, M., NGUYEN-THI, H. Impact of gravity on directional solidification of refined Al-20wt.%Cu alloy investigated by in situ X-radiography. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020: 03043727.
11. SILVA, A. P., PRADO, I. R., BARROS, J. S., SILVA, C. A. P., MOREIRA, A. L., & ROCHA, O. L. Analysis of the Cutting Temperatures Along the Macrostructure of a Directionally Solidified Al-7wt%Si Alloy. In *Defect and Diffusion Forum*, v. 365, p. 116–121, 2015.

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

#### **ABSTRACT**

*Understanding the mechanisms that influence the formation of the chilled, columnar and equiaxial structural zones in cast materials such as alloy composition, pouring temperature, mold material, heat transfer coefficient at the metal-mold interface, displacement velocity of the liquidus isotherm, cooling rate, thermal gradients, part size and geometry, presence of*

*convection in the liquid, solute transport, etc. is of fundamental importance for improving the efficiency of the casting process involved. Based on the knowledge of the thermophysical principles under which these zones are formed, it is possible to manipulate quite reasonably the macrostructure of the cast products and, consequently, their mechanical properties. Thus, this work aims to develop a theoretical and experimental study about the transition from the columnar zone to the equiaxial zone (ECT) in Al-4.5%Cu-1%Mg alloy. For this purpose, the alloy was directionally solidified, under transient heat flow conditions, in a horizontal water-cooled device and after the appropriate metallographic procedure it was possible to reveal the macrostructure of the alloy studied when the presence of an ECT was identified. A numerical method enabled the determination of thermal variables that influenced the mentioned structural transition which allowed a comparative analysis with the experimental results obtained regarding the occurrence of the position and profile of the ECT considering the effect of the nominal composition of the alloy. Since solidification in the horizontal configuration can also present vertical and transverse temperature gradients, a deeper study from the physical-mathematical point of view with a two-dimensional approach is proposed for a better understanding of the effect of thermosolutal convection that acts on the formation of the ECT in ternary alloys.*

**Keywords:** *Horizontal solidification, transient regime, thermal parameters, columnar-axial transition, Al-Cu-Mg alloys.*