



AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA LIGA Al-5Cu-1,5Mg-0,5Co PARA APLICAÇÕES AERONÁUTICAS: UMA ANÁLISE ABRANGENTE DA MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA MECÂNICA

Borges, J. S.*; Raynay, J.; Vida, T.; Brito, C.

¹ Departamento de Engenharia Aeronáutica, Faculdade de Engenharia, Câmpus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista,

² Programa de Pós-graduação em Engenharia, Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista,

*e-mail: julia.s.borges@unesp.br

RESUMO

O desenvolvimento de materiais avançados é essencial para melhorar o desempenho e reduzir custos na indústria aeroespacial. A liga Al-2024-T3 é amplamente utilizada devido ao equilíbrio entre baixa densidade e alta resistência. Essas propriedades estão diretamente ligadas à microestrutura do material, que é definida pela forma, tamanho e distribuição das fases, além da presença de inclusões e poros. A adição de cobalto (Co) em ligas de alumínio forma o composto intermetálico Al_3Co_2 , que refina a microestrutura, tornando-a mais uniforme e melhorando suas propriedades mecânicas. Este estudo avaliou a liga Al-5%Cu-1.5%Mg-0.5%Co, produzida por meio de fundição escalonada em um molde de latão e caracterizada por microscopia óptica. Ensaios de tração e compressão, conforme as normas ASTM E8 e E9, indicaram resistência à tração de 160 MPa e à compressão de 300 MPa. A análise revelou uma morfologia dendrítica, destacando o potencial da liga para aplicações estruturais em ambientes desafiadores.

Palavras-Chave: *alloy design, materiais aeronáuticos, ligas de alumínio, microestrutura, propriedades mecânicas.*

1. INTRODUÇÃO

Na indústria aeronáutica, o desenvolvimento de materiais aprimorados com propriedades mecânicas otimizadas é essencial para redução de custos. Pesquisas extensas na área de materiais metálicos e compósitos objetivam equilibrar leveza com propriedades contra danos, fadiga, resistência mecânica e corrosão. O aumento entre os períodos de manutenção e da vida útil dos componentes também são fundamentais na aviação, os quais podem ser atingidos através do aprimoramento das propriedades termomecânicas desses materiais [1].

As ligas de alumínio e cobre (série 2xxx) são muito utilizadas em aplicações estruturais de aeronaves devido a sua elevada resistência mecânica específica. A liga 2024-T3 e 2524-T3 estão entre as mais utilizadas em projetos aeronáuticos, estas possuem adição dos elementos de liga cobre (Cu) e magnésio (Mg). Na condição bruta de solidificação, as ligas Al-Cu-Mg possuem fases binárias Al_2Cu e Al_8Mg_5 , assim como fases ternárias Al_2CuMg (S) e Al_6CuMg_4 . As modificações metaestáveis das fases Al_2Cu (ou seja, θ' e θ'') e Al_6CuMg (S') garantem um efeito significativo de endurecimento por dispersão em soluções sólidas supersaturadas [2]. Os níveis de taxa de resfriamento empregados durante a etapa de solidificação podem influenciar a formação dessas soluções sólidas supersaturadas. Essas ligas poderiam ser submetidas ao tratamento térmico de precipitação e envelhecimento para aumentar sua resistência mecânica.

Esses compostos podem ter efeitos positivos, como fortalecimento e endurecimento, e efeitos negativos, como redução da ductilidade e resistência à corrosão. Sua influência nas propriedades do material se deve à sua capacidade de dificultar o movimento de discordância e fixar os limites dos grãos [3]. O cobre (Cu) adicionado aumenta a resistência mecânica, no entanto reduz a resistência a corrosão. Por outro lado, a adição de magnésio (Mg) aumenta a resistência a corrosão, porém diminui a maleabilidade da liga.

Nas ligas Al-Cu-Mg, as partículas intermetálicas S (Al_2CuMg) e θ (Al_2Cu) atuam como ânodo e cátodo durante o processo de corrosão, levando a uma corrosão localizada. A presença de outras partículas intermetálicas, como cobalto (Co), escândio (Sc) e zircônio (Zr) podem refinar a microestrutura e reduzir a suscetibilidade à corrosão intergranular ao inibir o crescimento de precipitados nocivos. Deng, P. et al [4] analisaram o efeito da adição de Zr no comportamento de corrosão das ligas de Al-Cu-Mg. Ao controlar o tamanho e a distribuição dos precipitados intermetálicos na liga, assim como o refinamento da estrutura dos grãos, as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão podem ser significativamente melhoradas.

A adição de cobalto pode melhorar as características de resistência à corrosão e resistência a fluência [5]. Além disso, ligas solidificadas rápidas do sistema Al-Co demonstraram uma tendência para a formação de fases quase-cristalinas [5]. O Cobalto atua como um estabilizador de tamanho de grão, auxiliando a preservar grãos mais finos. Silva, C. et al [6] investigaram as características microestruturais e de dureza nas ligas Al-Co. A presença de partículas intermetálicas Al_9Co_2 aumentou significativamente a dureza da liga, particularmente na liga hipereutética. A dureza permaneceu relativamente constante em diferentes taxas de resfriamento, sugerindo que as características microestruturais tiveram impacto limitado nas propriedades mecânicas.

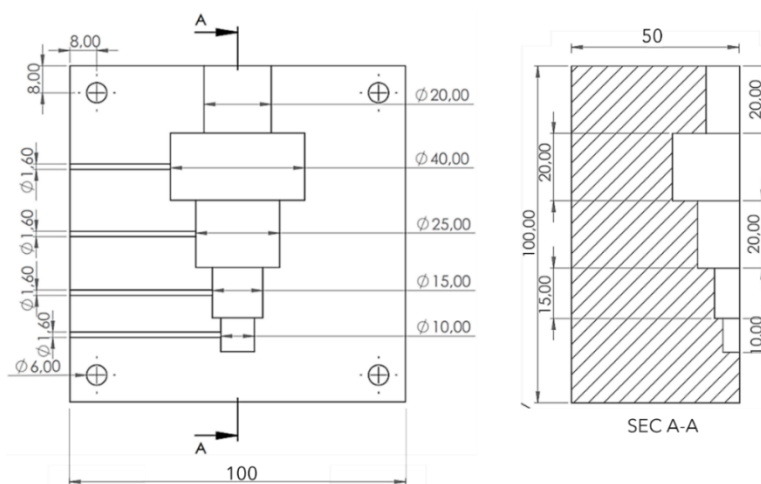
A literatura contém poucos trabalhos abordando o efeito da adição de Co no comportamento das propriedades mecânicas de ligas alumínio. Este trabalho tem por objetivo, avaliar os efeitos da adição de cobalto na morfologia microestrutural e na resistência mecânica

à tração de uma liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co, correlacionando características microestruturais e resistências mecânica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

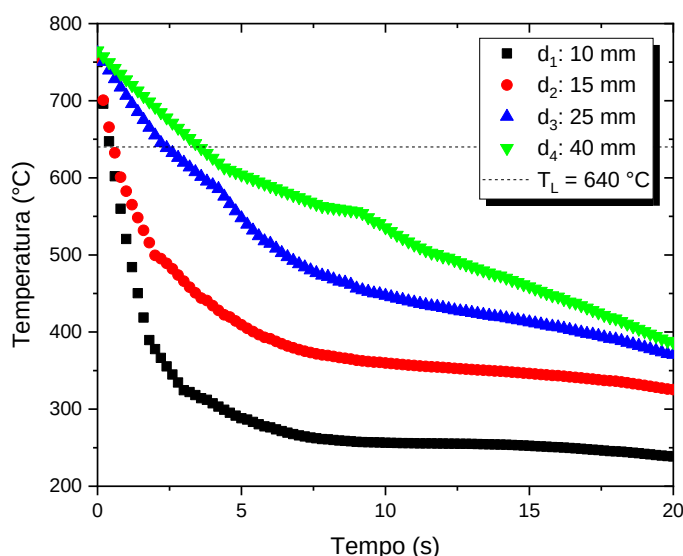
A liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co foi obtida a partir dos elementos Al, Cu, Mg e Co comercialmente puros. Após elaboração a liga foi vertida em uma lingoteira escalonada de latão (Figura 1), com quatro diâmetros 10, 15, 25, 40 mm, respectivamente. Tal configuração permitiu a obtenção amostras solidificadas com distintas taxas de resfriamento. Moldes cônicos oferecem uma dinâmica de transferência de calor distinta, promovendo taxas de resfriamento e gradientes de temperatura variados em comparação a moldes tradicionais. Isso resulta em microestruturas únicas, com variações no tamanho de grão e na estrutura dendrítica. Estudos mostram que esses moldes favorecem a solidificação direcional, útil em aplicações especializadas, e ajudam a prever e controlar defeitos como porosidade e fissuras [12]. A temperatura de vazamento foi de 750°C. As curvas de resfriamento, Figura 2, da liga foram obtidas através termopares tipo-K fixados em cada regiões da lingoteira, e conectados a um registrador Datalogger Novus modelo FieldLogger a uma frequência de 10 Hz, seguindo a metodologia descrita em [7].

Figura 1 - Desenho técnico do molde escalonado fabricado em latão.



A caracterização microestrutural foi realizada em uma amostra seccionada de diâmetro da lingoteira. As amostras foram polidas com lixas de SiC de granulometria de até 2500, seguida de polimento com pasta de diamante até 1 μ m. As superfícies das amostras foram então submetidas a um ataque químico com uma solução de 0,5% de ácido fluorídrico (HF) em água destilada. As micrografias foram adquiridas por microscópio óptico (microscópio Zeiss Axiovert5). Posteriormente os espaçamentos celulares e dendríticos secundários (λ_2) [7] foram medidos com auxílio do software Image-J.

Figura 2 – Curvas de resfriamento



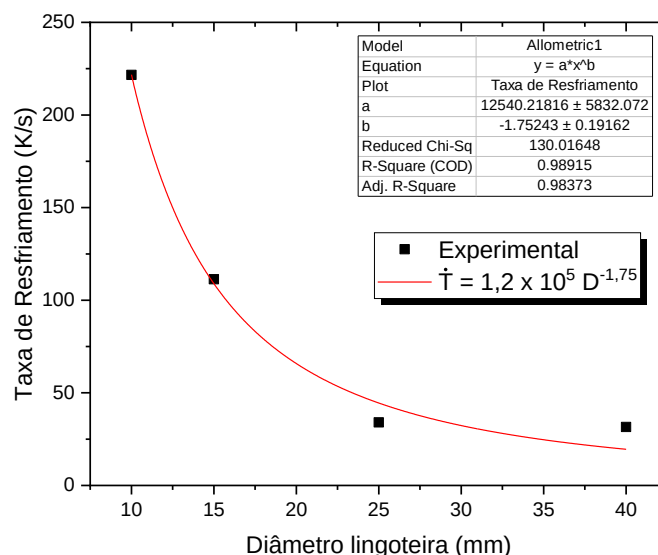
Os ensaios mecânicos foram realizados em amostras solidificadas em uma lingoteira de latão, projetada com quatro canais de 120 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. Essa configuração permitiu a obtenção de amostras com taxas de resfriamento equivalentes às alcançadas nas amostras solidificadas no diâmetro d_3 da lingoteira mostrada na Figura 1. Foram produzidos um total de 12 (doze) corpos de prova, 8 (oito) para tração e 4 (quatro) para compressão. Os corpos de prova (CP) para ensaio de tração foram preparados seguindo a norma ASTM E8M-22 [8] e os corpos de prova de compressão foram obtidos de acordo com a norma ASTM E9-19 [9]. Os ensaios de tração e compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos marca Biopdi, aplicou-se uma pré-carga de 100 N. Para a compressão, os ensaios foram realizados até que houvesse uma fratura dos corpos de prova ou que fosse notada uma deformação visível da estrutura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A taxa de resfriamento ($\dot{T}$) durante a solidificação da liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co foi calculada utilizando um modelo computacional que aplica a derivada de uma curva polinomial de segunda ordem ajustada na região próxima ao instante em que o perfil térmico atinge a temperatura liquidus, esse modelo é validado para o cálculo de $\dot{T}$ na solidificação direcional [13]. Para cada perfil de resfriamento, essa curva foi ajustada em um pequeno intervalo de pontos experimentais, imediatamente antes e depois do tempo de passagem da isoterma liquidus, garantindo uma transição suave. Diferentemente do método de Okamoto e Kishitake (1975) [15], que utilizava apenas dois pontos, este ajuste mais abrangente minimiza erros na determinação do tempo exato de passagem da isoterma. A curva apresentada na Figura 3 é uma adaptação desse modelo, aplicada ao cálculo da taxa de resfriamento durante a

solidificação em uma lingoteira escalonada de bronze, proporcionando uma representação precisa das condições experimentais utilizadas.

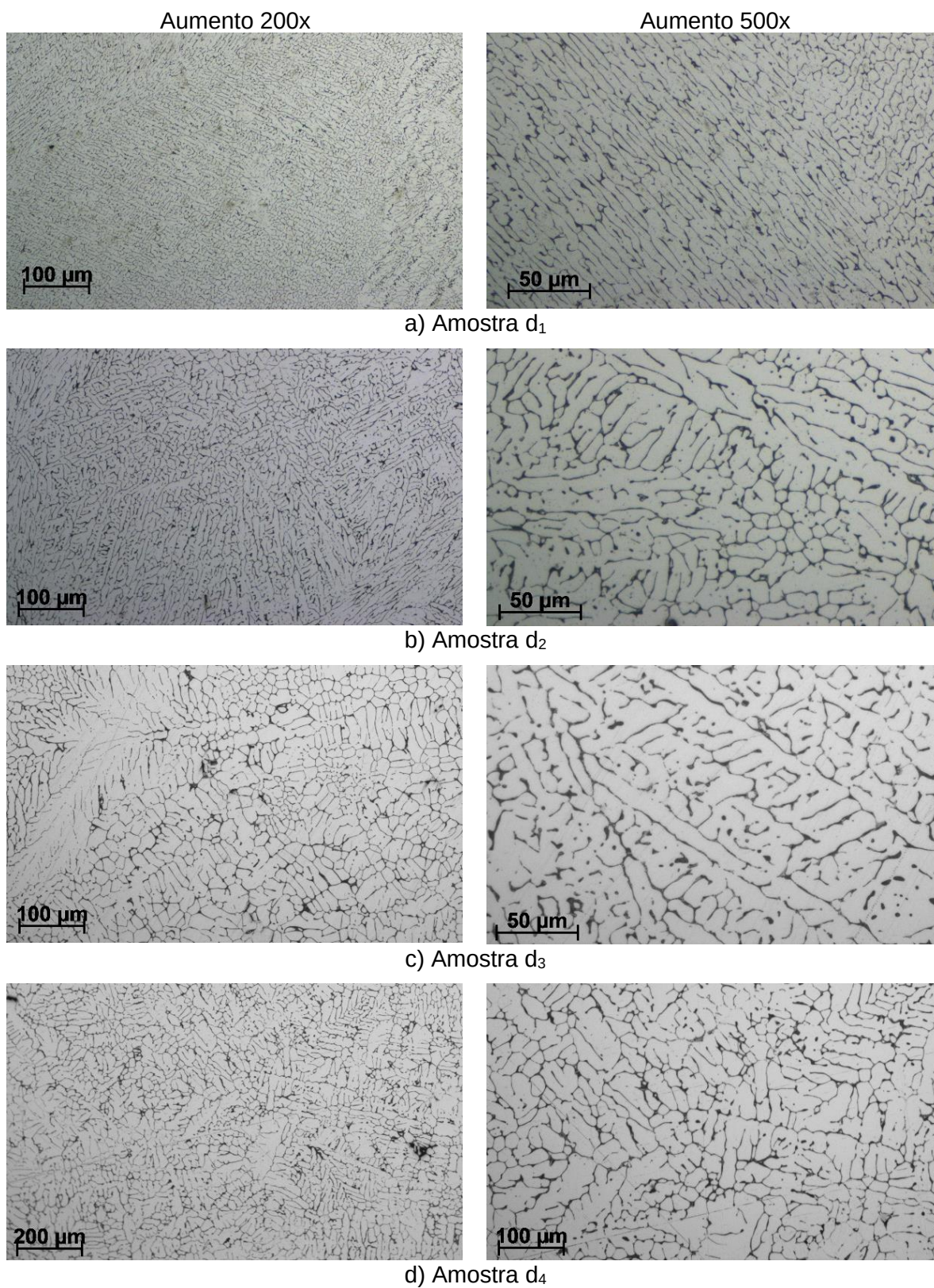
Figura 3 – Taxa de resfriamento em função do diâmetro do canal da lingoteira.



A morfologia microestrutural observada na Figura 4, referente à solidificação da liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co em um molde escalonado de latão, revela distintas características microestruturais que variam conforme as condições de taxa de resfriamento aplicadas. As micrografias das amostras solidificadas mostram a presença tanto de estruturas celulares quanto dendríticas, refletindo a influência direta da taxa de resfriamento no desenvolvimento da microestrutura. As Figuras 4a e 4b evidenciam uma matriz predominantemente celular, o que sugere que, sob as condições de maior taxa de resfriamento, a formação de células foi favorecida, possivelmente devido à rápida extração de calor que estabiliza as células ao invés de permitir a formação de dendritas.

Na Figura 4b, além da matriz celular, é possível observar uma transição entre células de alta velocidade e dendritas, indicando que a taxa de resfriamento pode ter variado durante o processo de solidificação, criando condições para a formação de estruturas dendríticas. Esta transição morfológica está de acordo com as observações de Brito et al. [10], onde foi relatado que a transição de células para dendritas ocorre em um regime de resfriamento onde a estabilidade celular é comprometida, levando ao crescimento de dendritas. A coexistência de células e dendritas na mesma amostra sugere que a taxa de resfriamento pode ter diminuído ligeiramente após o início da solidificação, permitindo o desenvolvimento de braços dendríticos.

Figura 4 - Micrografia Microestrutura típica da Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co: a) amostra d₁, b) amostra d₂, c) amostra d₃, d) amostra d₄.

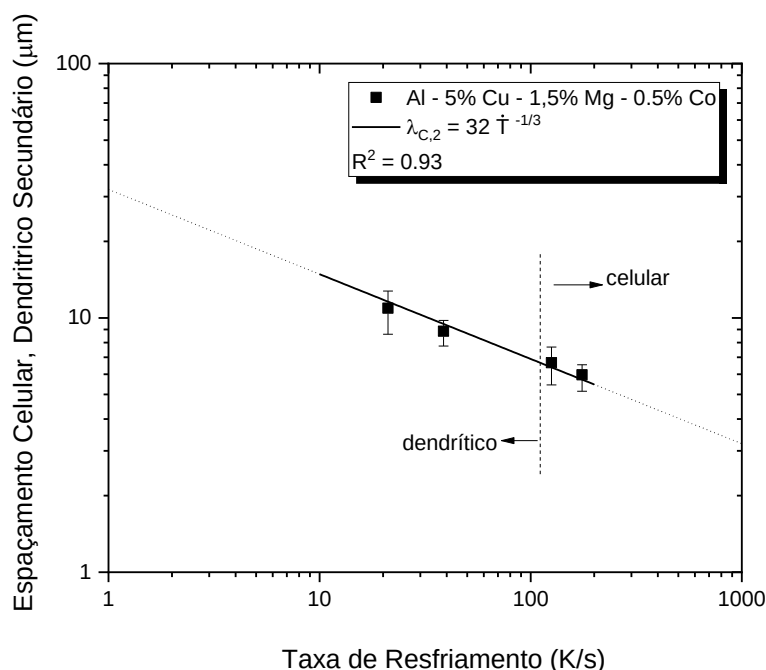


As Figuras 4c e 4d, por outro lado, mostraram uma morfologia predominantemente dendrítica, o que é típico de condições de resfriamento mais lentas, onde a difusão de soluto tem maior tempo para ocorrer, resultando na formação de dendritas bem definidas. Esse comportamento é consistente com as previsões teóricas de Hunt e Lu [16] que sugerem que, à medida que a taxa de resfriamento diminui, as dendritas tornam-se a estrutura mais estável, devido ao menor superresfriamento necessário para o crescimento dendrítico em comparação com o crescimento celular. O aumento do espaçamento dendrítico secundário observado nas imagens c e d também é coerente com a hipótese de que a difusão solutal domina o processo de crescimento em taxas de resfriamento mais baixas.

A presença de uma matriz de α -Al acompanhada por um composto eutético nos contornos celulares e dendríticos, como observado em todas as imagens, indica que, independentemente da morfologia predominante, a segregação de soluto ocorre, especialmente nas regiões interdendríticas. Essa observação é apoiada pelos estudos de Canté et al. [17] e Silva et al. [6], que relataram a formação de fases eutéticas em regiões de menor taxa de resfriamento em ligas de alumínio. A distribuição do composto eutético nos contornos celulares e dendríticos sugere que a solidificação se dá em um ambiente de resfriamento variável, onde diferentes regimes térmicos são estabelecidos ao longo do processo.

A análise microestrutural permitiu quantificar os espaçamentos celulares e dendríticos secundários ($\lambda_{c,2}$), os quais foram correlacionados com a taxa de resfriamento ($\dot{T}$). A relação entre o espaçamento celular e dendrítico secundário e a taxa de resfriamento pode ser descrita pela equação $\lambda_{c,2} = 32 \times \dot{T}^{1/3}$, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,93, indicando uma forte correlação entre as variáveis. Essa relação, ilustrada na Figura 5, sugere que quanto maior a taxa de resfriamento, menor os espaçamentos celulares e dendríticos. Ao considerar as hipóteses postuladas, é plausível que tanto o espaçamento celular quanto o dendrítico sigam uma relação empírica com a taxa de resfriamento, representada por uma equação do tipo potência com expoente de $-1/3$, Figura 5. Essa relação pode ser explicada pela difusão solutal que governa ambos os tipos de crescimento, e pela necessidade de marginalidade de estabilidade da interface sólido/líquido em diferentes condições térmicas. Em resumo, a morfologia observada na liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co é um reflexo direto das condições de resfriamento e dos mecanismos de solidificação em jogo, sendo crucial o controle desses parâmetros para a obtenção de microestruturas desejáveis em aplicações industriais.

Figura 5 - Evolução microestrutural da liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co: $\lambda_{c,2}$ em função da taxa de resfriamento

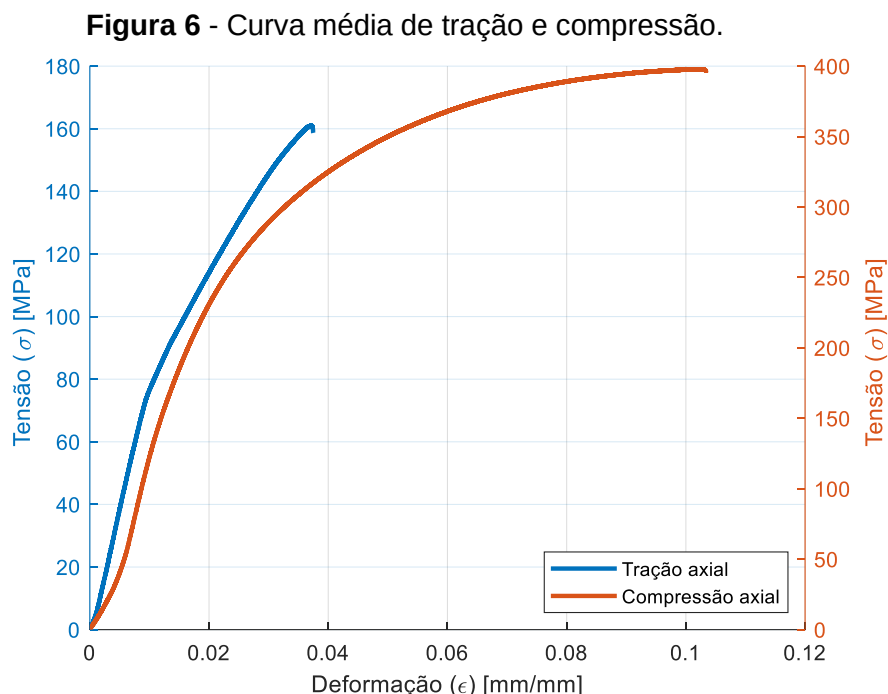


Os corpos de prova submetidos aos ensaios mecânicos apresentaram uma microestrutura similar à da amostra da seção d₃, caracterizada por uma morfologia dendrítica e um valor de taxa de resfriamento de ± 35 K/s. Os ensaios de tração uniaxial revelaram um limite de escoamento médio de 70MPa e uma tensão de ruptura média de 160 Mpa. A Fig. 6 apresenta as curvas tensão-deformação típicas. Comparado com outras ligas de alumínio da série 2000, como a Al-2024-T3 [1], o material apresentou menor ductilidade, indicando um comportamento mais frágil. Essa diferença pode estar relacionada à presença de uma segunda fase frágil e ao tamanho de grão fino, observados na análise microestrutural.

O comportamento da liga sob compressão apresenta valores de tensão de ruptura em torno de 300 MPa e deformações superior às observadas em tração. Essa alta ductilidade em compressão, juntamente com a menor resistência à tração, sugere a presença de defeitos microestruturais, como porosidade ou segregação, que atuam como concentradores de tensão e facilitam a propagação de trincas sob tração. Esses defeitos, formados durante a solidificação, podem comprometer a integridade da peça e limitar sua aplicação em componentes sujeitos a carregamentos cíclicos.

Uma inspeção mais detalhada na região da fratura revelou a presença de porosidade na liga, esses defeitos provavelmente foram originados durante a solidificação dos corpos de prova [11]. A porosidade pode assumir várias formas, desde a predominância de microporosidades dispersas na matriz até macroporosidades concentradas nas regiões de

solidificação final. Além disso, é importante considerar que ausência de tratamento térmico pós-fundição agrava no impacto da porosidade significativamente no comportamento mecânico.



Pan Deng et al. [18] avaliaram as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão de uma liga Al-Cu-Mg modificada, comparando a adição de elementos de liga como escândio (Sc) e zircônio (Zr) à liga Al-2024 comercial, ambas tratadas termicamente na condição T6. Os resultados demonstraram um aumento tanto no limite de escoamento quanto na resistência máxima à tração; contudo, observou-se uma leve redução no alongamento, indicando um comprometimento marginal na ductilidade. Embora a composição química das ligas seja ligeiramente distinta, a adição de cobalto resultou em uma microestrutura similar à da liga 2024 na condição como fundida (as-cast), sugerindo que, após o tratamento térmico adequado, as propriedades mecânicas, especialmente sob tração, podem ser significativamente aprimoradas. Tais achados ressaltam a importância do controle microestrutural e do tratamento térmico no desenvolvimento de ligas de alumínio de alta performance, proporcionando perspectivas valiosas para a otimização de materiais destinados a aplicações estruturais críticas.

Os principais avanços nas ligas de alumínio aeroespaciais são atribuídos ao conteúdo e às proporções otimizadas de soluto [1], que ajudam a alcançar um melhor equilíbrio de propriedades. Novas combinações de processamento de dispersóides podem resultar em estruturas de grãos desejáveis que possuem melhores propriedades de resistência a tração e aumentam a tolerância a danos.

4. CONCLUSÕES

A análise dos dados experimentais permitiu estabelecer uma correlação direta entre as taxas de resfriamento e morfologia da microestrutura da liga Al-5%Cu-1,5%Mg-0,5%Co. As taxas de resfriamento variaram função do diâmetro em que ocorreu a solidificação, indicando uma diminuição da taxa de resfriamento em função do aumento do diâmetro da lingoteira. As menores taxas de resfriamento favoreceram o crescimento dendrítico. A presença de regiões com morfologia celular, especialmente na zona de solidificação inicial, sugere uma transição celular-dendrítica de alta velocidade. Dos ensaios de tração e compressão, conclui-se que a que durante a solidificação do CP's de tração ocorreu a formação de porosidade e/ou outros defeitos comuns em ligas fundidas, que influenciou negativamente no comportamento mecânico gerando resultados distantes do esperado para uma liga com composição similar a liga Al 2024-T3. Logo, para melhorar as propriedades mecânicas da liga, recomenda-se a adoção de processos de fabricação mais controlados, como fundição sob pressão e/ou a injeção de argônio para minimizar a formação de porosidades. Além disso, a implementação de tratamentos térmicos específicos, como o envelhecimento artificial pode aumentar a resistência mecânica. O controle preciso das taxas de resfriamento durante a solidificação é fundamental para refinar a microestrutura, contribuindo para melhorar as propriedades mecânicas desejadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pelo CNPq (Projetos:126076/2022-7, 407871/2018-7); pela UNESP (Edital PROPe/UNESP n. 05/2023; e pela FAPESP (Processo 2022/03633-3). A ao CEPIMATE pelo acesso aos equipamentos indispensáveis à esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] DURSUN, T; SOUTIS, C. **Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys**. Mater Des. 2014; 56:862–71.
- [2] ZOLOTOREVSKY, V.S.; BELOV, N.A.; GLAZOFF, M.V. **Casting Aluminum Alloys**. Elsevier, p. 45-47, 2007.
- [3] POURALIAKBAR, H.; GHORBANZADEH, Z.; FALLAH, V.; MONAZZAH, A. H. **Impact of intermediate aging on the evolution of microstructure and intermetallics in thermos mechanically processed Al-Cu-Mg alloy**. Materials Letters, 355, número da edição, intervalo de páginas, 2024.

- [4] DENG, P., MO, W., OUYANG, Z., CHEN, J., LUO, B., & BAI, Z. **Effect of Zr content on corrosion behavior and chemically-milled surface roughness of Al-Cu-Mg alloy.** *Journal of Alloys and Compounds*, v. 965, p. 171364, 2023.
- [5] LEKATOU, Angeliki et al. **Al-Co alloys prepared by vacuum arc melting: Correlating microstructure evolution and aqueous corrosion behavior with Co content.** *Metals*, v. 6, n. 3, p. 46, 2016.
- [6] SILVA, C. A., KAKITANI, R., CANTÉ, M. V., BRITO, C., GARCIA, A., SPINELLI, J. E., & CHEUNG, N. **Microstructure, phase morphology, eutectic coupled zone and hardness of AlCo alloys.** *Materials Characterization*, v. 169, p. 110617, 2020.
- [7] BERTELLI, F., BRITO, C., FERREIRA, I. L., REINHART, G., NGUYEN-THI, H., MANGELINCK-NOËL, N., CHEUNG, N., SPINELLI, J.E. GARCIA, A. **Cooling Thermal Parameters, Microstructure, Segregation and Hardness in Directionally Solidified Al-Sn-(Si; Cu) Alloys.** *Materials & Design*, vol. 72, p. 31-42. 2015.
- [8] ASTM E8M - 22: **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** 2022.
- [9] ASTM. **Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature (E9 – 19).** 2019.
- [10] BRITO, C., et al. A. **Cellular-to-Dendritic and Dendritic-to-Cellular Morphological Transitions in a Ternary Al-Mg-Si Alloy.** *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 529 012018
- [11] GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** editora da Unicamp, 2007.
- [12] NISHIHARA, Taiki; NAKAMURA, Yuto; MAEDA, Yasuhiro. Shrinkage Cavities in Conical Mold Castings of Aluminum Alloy. **International Journal of Metalcasting**, v. 17, n. 4, p. 2431-2438, 2023.
- [13] BRITO, C., et al. **Cellular/dendritic arrays and intermetallic phases affecting corrosion and mechanical resistances of an Al-Mg-Si alloy.** *Journal of Alloys and Compounds* 673 (2016): 220-230.
- [14] QUARESMA, José MV; SANTOS, Carlos A.; GARCIA, Amauri. Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings, and mechanical properties of Al-Cu alloys. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 31, p. 3167-3178, 2000.
- [15] OKAMOTO, T.; KISHITAKE, K.; Dendritic Structure in Unidirectionally Solidified Aluminum, Tin, and Zinc Base Binary Alloys. **Journal of Crystal Growth**. v. 129, p. 137-146, 1975.
- [16] Hunt, J. D., and Shu-Zu Lu. "Numerical modeling of cellular/dendritic array growth: spacing and structure predictions." *Metallurgical and Materials Transactions A* 27 (1996): 611-623.

- [17] CANTÉ, Manuel V. et al. Interrelation of cell spacing, intermetallic compounds and hardness on a directionally solidified Al–1.0 Fe–1.0 Ni alloy. **Materials & Design**, v. 51, p. 342-346, 2013.
- [18] DENG, Pan et al. Mechanical properties and corrosion behaviors of (Sc, Zr) modified Al-Cu-Mg alloy. **Materials Characterization**, v. 196, p. 112619, 2023.

**EVALUATION OF THE POTENTIAL OF Al-5Cu-1.5Mg-0.5Co ALLOY FOR
AERONAUTICAL APPLICATIONS: A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL STRENGTH**

Abstract

The development of advanced materials is essential to improving performance and reducing costs in the aerospace industry. The Al-2024-T3 alloy is widely used due to its balance of low density and high strength. These properties are directly linked to the material's microstructure, which is defined by the shape, size, and distribution of phases, as well as the presence of inclusions and porosity. The addition of cobalt (Co) to aluminum alloys forms the intermetallic compound Al_9Co_2 , which refines the microstructure, making it more uniform and enhancing its mechanical properties. This study evaluated the Al-5%Cu-1.5%Mg-0.5%Co alloy, produced through step casting in a brass mold and characterized by optical microscopy. Tensile and compression tests, following ASTM E8 and E9 standards, indicated a tensile strength of 160 MPa and a compressive strength of 300 MPa. The analysis revealed a dendritic morphology, highlighting the alloy's potential for structural applications in demanding environments.

Keywords: alloy design, aeronautical materials, aluminum alloys, microstructure, mechanical properties.