

EFEITO DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL E TRATAMENTO TERMICO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DE UMA LIGA AL-8,5%CU-7,5%FE

**Mario V. M. Da Silva¹, Lorena G. O. Da Gama², Nelma C. S. Da Silva³;
Lourival. A. S. Neto⁴; Luiz G. da S. Nascimento⁵**

¹Mestrando de Engenharia de Materiais – PPGEMAT-IFPA, Belém, Brasil
(veniceusmachado@gmail.com)

²Mestranda de Engenharia de Materiais – PPGEMAT-IFPA, Belém, Brasil

³Mestranda de Engenharia de Materiais – PPGEMAT-IFPA, Belém, Brasil

⁴Bacharel em Engenharia de Materiais -IFPA, Belém, Brasil

⁵Doutor Engenharia de recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA -UFPA) - Docente do IFPA Campus-Belém, Belém, Brasil

Resumo: Ligas de alumínio do sistema Al-Cu-Fe apresentam grande interesse para a Engenharia de materiais, especialmente em aplicações estruturais e componentes submetidos a operações mecânicas e térmicas, devido à sua elevada relação resistência/peso e à presença de fases intermetálicas termicamente resistentes. A microestrutura dessas ligas é fortemente influenciada pelas condições de solidificação e pelos tratamentos térmicos aplicados, os quais impactam diretamente o desempenho mecânico do material. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a evolução microestrutural e o comportamento da dureza de uma liga Al-7%Cu-7,85%Fe obtido por solidificação unidirecional, considerando diferentes posições ao longo do lingote e os efeitos de um tratamento térmico T6 aplicado por três horas. O lingote foi produzido por solidificação unidirecional, promovendo gradientes térmicos ao longo da altura e, consequentemente, variações microestruturais. As análises foram realizadas em três regiões distintas: base do lingote, localizada a aproximadamente 5 mm da interface de remoção de calor; região interveniente, a cerca de 24 mm; e topo, a aproximadamente 70 mm. Foram realizadas análises microestruturais por microscopia óptica e ensaios de dureza Brinell tanto no estado como-solidificado quanto após o tratamento térmico T6 por três horas. No estado como-solidificado, a matriz da liga apresentou valores médios de dureza Brinell de aproximadamente 79 HB na base, 76 HB na região intermediária e 77 HB no topo do lingote. Após o tratamento térmico T6 por três horas, observou-se uma redução significativa da dureza, atingindo cerca de 49 HB na base, 62 HB na região intermédia e 59 HB no topo. Essas alterações foram acompanhadas por mudanças microestruturais associadas ao coalescimento e redistribuição das fases intermetálicas. Conclui-se que a combinação entre solidificação unidirecional e tratamento térmico T6 exerce influência significativa sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga, sendo uma estratégia relevante para a otimização de materiais de interesse da Engenharia Mecânica.

Palavras-chave: Materiais de engenharia, Liga Al-Cu-Fe, Solidificação, Tratamento térmico T6, Propriedades mecânicas

INTRODUÇÃO

Ligas à base de alumínio reforçadas por fases intermetálicas, como as pertencentes ao sistema Al-Cu-Fe, têm despertado grande interesse na Engenharia Mecânica devido à elevada relação resistência/peso e ao bom desempenho sob condições térmicas e estruturais severas (Mondolfo, 1976; Kaufman; Rooy, 2004, Silva et al., 2025). Essas ligas se destacam pela presença de fases intermetálicas

termicamente estáveis, capazes de conferir resistência mecânica mesmo em temperaturas elevadas.

A literatura aponta que a evolução microestrutural dessas ligas é fortemente dependente das condições de solidificação, uma vez que parâmetros como gradiente térmico e taxa de resfriamento influenciam diretamente a morfologia e a distribuição das fases interdendríticas. Técnicas que impõem gradientes térmicos controlados, como a

solidificação unidirecional, promovem variações microestruturais significativas ao longo do lingote, conforme amplamente discutido por (Kurz e Fisher, 1998 e Abbaschian e Reed-Hill 2014, Gama, 2025).

Do mesmo modo, tratamentos térmicos do tipo T6 atuam na redistribuição de solutos e na modificação da morfologia e continuidade das fases intermetálicas, afetando diretamente propriedades mecânicas como a dureza. Esses efeitos são descritos de forma consistente na literatura clássica e contemporânea sobre ligas de alumínio, especialmente no que se refere aos mecanismos de solubilização, precipitação e envelhecimento artificial (Kaufman; Rooy, 2004; Callister; Rethwisch, 2020; Silva et al., 2023).

Nesse contexto, o presente estudo investiga a evolução microestrutural e o comportamento da dureza da liga Al–8,5%Cu–7,5%Fe ao longo de um lingote obtido por solidificação unidirecional, com avaliação comparativa entre as regiões da base, intermediária e topo, tanto no estado bruto de solidificação quanto após a aplicação de tratamento térmico T6 por três horas. A análise desses efeitos permite compreender a relação entre gradiente térmico, morfologia das fases e desempenho mecânico, contribuindo para o desenvolvimento de materiais otimizados para aplicações na Engenharia Mecânica.

MATERIAL E MÉTODOS

Pesagem dos elementos químicos e solidificação direcional ascendente da liga Al–8,5%Cu–7,5%Fe

A liga Al–8,5Cu–7,5Fe foi produzida a partir de alumínio, cobre e ferro comercialmente puros, cujas massas foram calculadas de acordo com a composição química nominal da liga, correspondendo a 8,5% em massa de cobre, 7,5% em massa de ferro e o balanço em alumínio. A pesagem foi realizada em balança analítica de alta precisão, assegurando o controle rigoroso das proporções dos elementos.



Figura 1. Pesagem dos elementos químicos (Al, Cu, Fe) para confecção da liga

Após a pesagem, os materiais foram fundidos em forno elétrico de resistência até completa fusão e formação da liga no laboratório de fundição do IFPA campus Belém.

A solidificação da liga foi realizada por solidificação direcional ascendente, com resfriamento controlado a partir da base do molde em direção ao topo, promovendo um gradiente térmico ao longo da amostra e favorecendo a formação de uma macroestrutura direcional demonstrado na figura 2.



Figura 2 - Esquema ilustrativo do Forno de solidificação unidirecional ascendente

Processo metalográfico para revelação da macro e microestrutura

Para a análise da macroestrutura, a amostra solidificada foi seccionada longitudinalmente na região central. A superfície foi preparada por lixamento progressivo utilizando lixas de granulometria entre 80 e 400 mesh, seguido de ataque químico com reagente de Keller a 5%, aplicado pelo método de esfregaço, possibilitando a revelação da estrutura macroscópica e a identificação de características associadas ao processo de solidificação direcional.

A microestrutura foi analisada por microscopia óptica com o microscópio. As amostras foram submetidas a lixamento progressivo com lixas de 80 a 1200 mesh, seguido de polimento com alumina, utilizando pano de polimento impregnado com suspensão de alumina de 1 µm, até obtenção de superfície espelhada. O ataque químico foi realizado com reagente de Keller a 5%, por imersão no tempo de 5 segundos, com o objetivo de revelar a matriz de

alumínio e as fases intermetálicas presentes representado na figura 3, após foram analisadas a microestrutura com o microscópio óptico motic trinoculare BA310 MET.

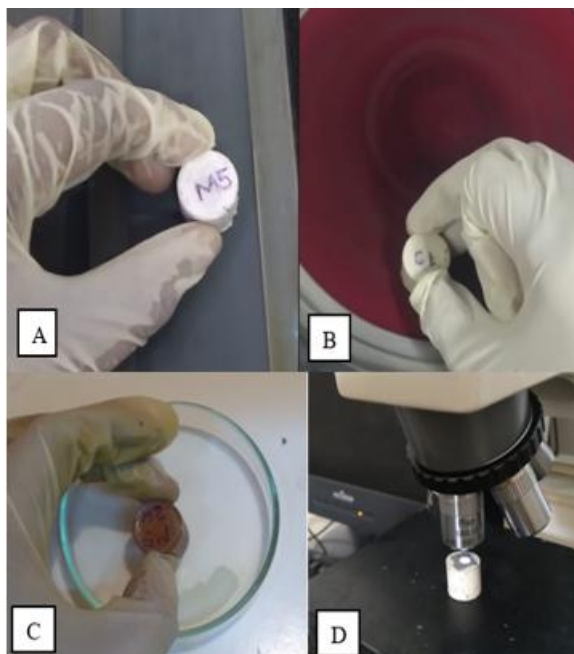


Figura 3. A) lixamento das amostras, B) Polimento, C) Ataque químico com keller, D) Análise microestrutura no microscópio óptico motic trinoculare BA310 MET

2.3 Tratamento térmico T6 (3h)

As amostras foram submetidas ao tratamento térmico T6, sendo previamente seccionadas de modo a garantir condições uniformes de processamento. A etapa de solubilização térmica foi realizada em forno elétrico de atmosfera aberta, mantido a $495 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 6 horas, tempo suficiente para promover a dissolução dos elementos de liga na matriz de $\alpha\text{-Al}$ e a homogeneização da microestrutura.

Após a solubilização, as amostras foram submetidas à têmpera por imersão em água à temperatura ambiente (aproximadamente $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$), com o objetivo de obter uma solução sólida supersaturada. O resfriamento rápido é fundamental para preservar os elementos de liga em solução sólida e viabilizar o subsequente endurecimento por precipitação.

Em seguida, foi realizado o envelhecimento artificial em forno de convecção forçada a $160 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo as amostras mantidas por 3 horas, condição típica do tratamento T6. Ao término do envelhecimento, as amostras foram submetidas a resfriamento natural ao ar até a temperatura ambiente, completando o ciclo térmico.

2.4 Ensaio de dureza Rockwell

A avaliação das propriedades mecânicas foi realizada por meio do ensaio de dureza Rockwell no durômetro

do modelo Pan Tec hrn 150 do laboratório de resistência dos materiais do IFPA Campus Belém, foi utilizado o penetrador esférico de aço de $1/16''$ (1,588 mm), com aplicação de carga preliminar de 10 kgf e carga principal de 60 kgf. O ensaio foi conduzido em durômetro devidamente calibrado, sendo realizadas múltiplas medições em diferentes regiões das amostras. O valor final de dureza foi obtido a partir da média aritmética das leituras, permitindo correlacionar os efeitos da solidificação direcional e do tratamento térmico T6 sobre a dureza da liga Al-8,5Cu-7,5Fe representado na figura 4.



Figura 4. Realização da dureza vickers no durômetro do modelo Pan Tec hrn 150

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise conjunta das microestruturas e dos valores de dureza Brinell da liga Al-8,5Cu-7,5Fe evidencia alterações significativas no comportamento da matriz metálica em função da aplicação do tratamento térmico T6. As micrografias da figura 5A, C e E, correspondentes às amostras na condição sem tratamento térmico (como solidificada), analisadas nas posições 1, 3 e 5, respectivamente, evidenciam uma matriz $\alpha\text{-Al}$ relativamente homogênea, associada

a uma elevada fração volumétrica do eutético θ (Al_2Cu) e à presença de intermetálicos ricos em ferro, tais como Al_3Fe , Al_6Fe e fases complexas do sistema Al-Fe-Cu , predominantemente distribuídas nas regiões interdendríticas e com morfologia acicular e alongada.

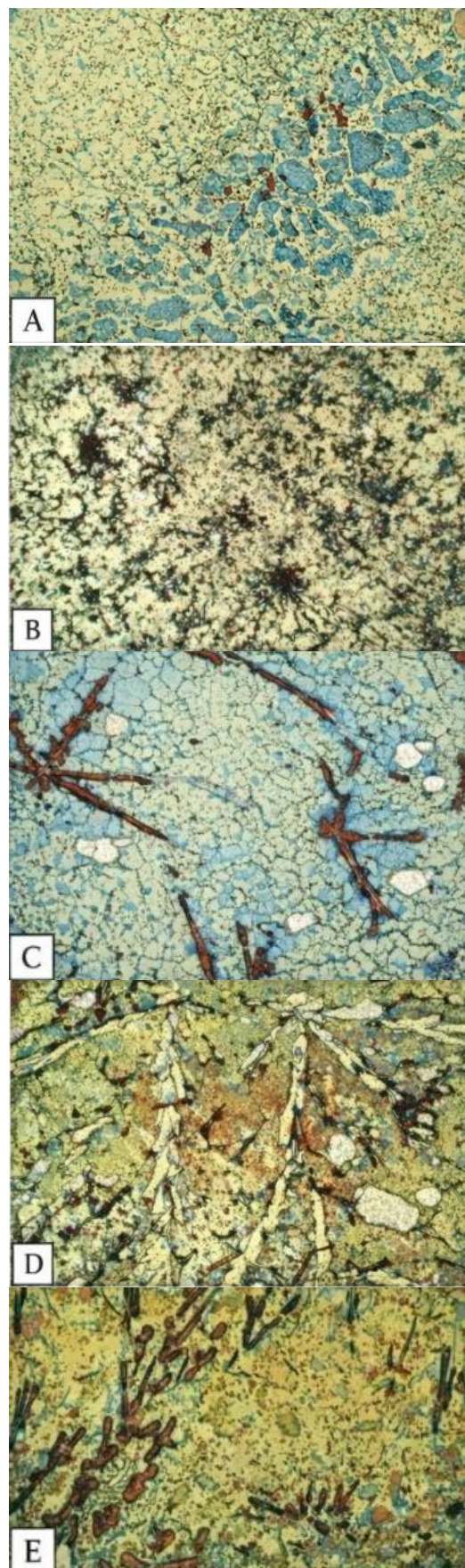
Essas características microestruturais observadas nas micrografias A, C e E são típicas de ligas Al-Cu-Fe na condição como solidificada e estão diretamente associadas ao elevado conteúdo de fases rígidas e frágeis, que atuam como barreiras ao movimento de discordâncias. A continuidade do eutético Al_2Cu e a elevada fração volumétrica de intermetálicos Fe-ricos intensificam o efeito de endurecimento da matriz, resultando em maiores valores de dureza Brinell nessa condição, conforme descrito por (Mondolfo, 1976), que estabelece a relação entre morfologia dos intermetálicos e comportamento mecânico em ligas de alumínio, e confirmado por estudos mais recentes que analisam a influência das fases Fe-ricas na resposta mecânica dessas ligas (Sepehrband et al., 2018; Farkoosh et al., 2020).

Após a aplicação do tratamento térmico T6, as micrografias da figura 5B, D e F, correspondentes às posições 1, 3 e 5, respectivamente, evidenciam modificações significativas na microestrutura. Na micrografia B, observa-se a fragmentação parcial do eutético θ (Al_2Cu) e a redução de sua continuidade interdendrítica, indicando a atuação dos mecanismos de solubilização durante a etapa de solubilização do tratamento T6. A micrografia D revela uma distribuição mais homogênea dos precipitados na matriz $\alpha\text{-Al}$, além de alterações na morfologia dos intermetálicos Fe-ricos, com tendência ao arredondamento e à diminuição da conectividade.

Na micrografia F, nota-se uma microestrutura mais refinada e homogênea, refletindo de forma mais evidente os efeitos combinados da solubilização e do envelhecimento artificial.

Essas transformações microestruturais observadas nas micrografias B, D e F indicam a transição de um mecanismo de endurecimento dominado pela presença contínua de fases rígidas para um endurecimento associado à precipitação controlada e à redistribuição dos constituintes secundários.

Esse comportamento está em concordância com os fundamentos clássicos apresentados por (Kaufman e Rooy, 2004) sobre o efeito do tratamento T6 em ligas Al-Cu , sendo também amplamente corroborado por estudos recentes que demonstram a influência do T6 na microestrutura e nas propriedades mecânicas de ligas Al-Cu e Al-Cu-Fe (Zhang et al., 2019; Jiang et al., 2024).



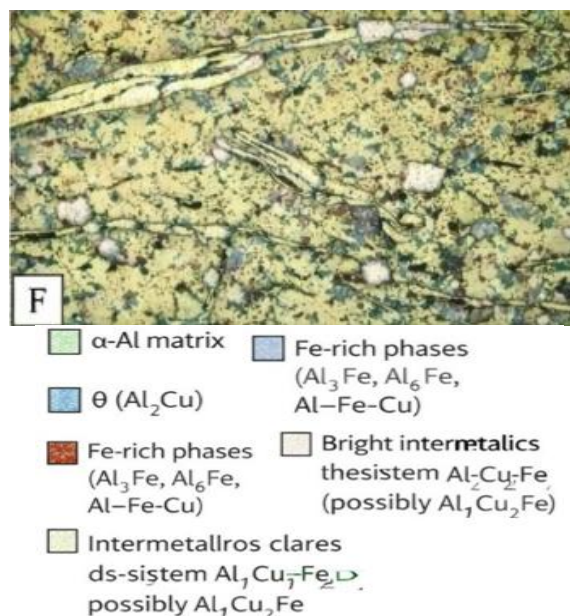


Figura 5. A) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe sem TTT6 (Posição 1), B) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe com TTT6 3H (Posição 1), C) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe sem TTT6 (Posição 2), D) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe com TTT6 3H (Posição 2), E) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe sem TTT6 (Posição 3), F) Microestrutura da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe com TTT6 3H (Posição 3).

Após a aplicação do tratamento T6 por 3 h, observa-se uma redução sistemática da dureza Brinell em todas as posições avaliadas ao longo do lingote, com quedas médias da ordem de 20 a 30 HB. A microestrutura tratada revela dissolução parcial do eutético Al_2Cu , com diminuição da espessura e da continuidade das regiões ricas em Cu. Esse processo promove maior homogeneização química da matriz $\alpha\text{-Al}$, porém reduz temporariamente os mecanismos de endurecimento associados à microestrutura como solidificada.

Embora o envelhecimento subsequente favoreça a reprecipitação de fases metastáveis θ' e θ'' , a densidade e a distribuição desses precipitados, nas condições de tratamento adotadas, não são suficientes para compensar a perda do endurecimento proporcionado pelo eutético contínuo e pelas fases intermetálicas aciculares. Esse comportamento está em consonância com os mecanismos discutidos por Ringer e Hono (2000), que demonstram que o endurecimento por precipitação em ligas Al-Cu depende fortemente do tempo e da temperatura de envelhecimento, sendo comum a ocorrência de amolecimento inicial após a etapa de solubilização.

A figura do gráfico de dureza Rockwell convertida para Brinell (figura 6) evidencia diferenças marcantes entre as condições sem tratamento térmico

e com tratamento T6 por 3 h, as quais podem ser diretamente correlacionadas às transformações microestruturais observadas nas micrografias da (figura 5A a F).

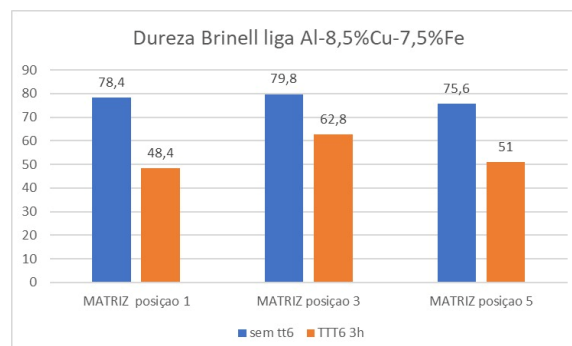


Figura 6 – Variação da dureza Brinell da liga Al-8,5%Cu-7,5%Fe ao longo das diferentes posições do lingote, comparando as condições de solidificada e após tratamento térmico T6 por 3 h

Na posição 1 do lingote (base), a microestrutura da figura 5A (sem tratamento térmico) apresenta matriz $\alpha\text{-Al}$ associada a uma elevada fração volumétrica de eutético θ (Al_2Cu) e de intermetálicos ricos em Fe, distribuídos de forma contínua nas regiões interdendríticas, com morfologia predominantemente acicular. Essa configuração microestrutural resulta em um valor elevado de dureza Brinell (78,4 HB), uma vez que as fases rígidas e contínuas atuam como barreiras eficazes ao movimento de discordâncias. Após o tratamento térmico T6, a microestrutura correspondente referente a Figura 5B evidencia dissolução parcial do eutético Al_2Cu e redistribuição das fases intermetálicas, agora mais fragmentadas e menos contínuas, refletindo-se em uma redução significativa da dureza para 48,4 HB.

Na posição 3 (região intermediária do lingote), observa-se o maior valor de dureza na condição sem tratamento térmico (79,8 HB), associado à microestrutura da Figura 5C. Nessa região, o gradiente térmico intermediário durante a solidificação favorece uma distribuição mais homogênea das fases intermetálicas Fe-ricas e do eutético Al_2Cu , com elevada densidade de interfaces matriz/intermetálico, intensificando o efeito de endurecimento por bloqueio de discordâncias. Após o tratamento T6, a microestrutura Figura 5D, apresenta significativa modificação morfológica, com coalescimento parcial e arredondamento das fases intermetálicas, além da redução da continuidade do eutético, resultando em uma diminuição da dureza para 62,8 HB, ainda superior às demais regiões tratadas.

Na posição 5 (topo do lingote), a microestrutura e, correspondente à condição sem tratamento térmico, revela fases intermetálicas mais grosseiras e menos uniformemente distribuídas, em decorrência das



menores taxas de resfriamento nessa região. Ainda assim, a elevada fração volumétrica dessas fases rígidas garante um valor relativamente alto de dureza (75,6 HB). Com a aplicação do tratamento térmico T6, a microestrutura da Figura 5F passa a apresentar fragmentação das fases intermetálicas e maior homogeneização da matriz, o que reduz a eficiência do endurecimento microestrutural, resultando em dureza de 51 HB.

De modo geral, os resultados indicam que a condição como solidificada apresenta maiores valores de dureza ao longo de todo o lingote, em função da elevada fração volumétrica e da morfologia acicular contínua das fases intermetálicas Al₂Cu e Fe-ricas. O tratamento térmico T6, embora promova homogeneização microestrutural e potencial melhoria de ductilidade e estabilidade dimensional, leva à redução da dureza Brinell devido à dissolução parcial do eutético θ e à modificação morfológica das fases intermetálicas, tornando-as menos eficazes como obstáculos ao movimento de discordâncias.

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que a liga Al–8,5%Cu–7,5%Fe apresenta, no estado como solidificado, uma microestrutura dominada por eutético θ (Al₂Cu) e intermetálicos Fe-ricos de morfologia acicular, os quais contribuem de forma decisiva para os maiores valores de dureza observados. Após o tratamento T6, a dissolução parcial do eutético, a redistribuição do Cu e a fragmentação das fases ricas em Fe reduziram a intensidade do endurecimento, resultando em queda significativa da dureza ao longo do lingote.

A microestrutura tornou-se mais homogênea, porém menos resistente, evidenciando que o T6 empregado favorece estabilidade e uniformidade, mas não maximiza a resistência mecânica imediata. Conclui-se que o comportamento observado é coerente com os mecanismos clássicos de solubilização e com a elevada estabilidade térmica dos intermetálicos Fe-ricos presentes na liga.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos alunos bolsistas e voluntários do curso de Engenharia de Materiais pela colaboração do GRUPMAT-IFPA, ao Instituto Federal do Pará (IFPA) pela infraestrutura laboratorial disponibilizada e à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo apoio concedido.

REFERÊNCIAS

Abbaschian, R.; Abbaschian, L.; Reed-Hill, R. E. *Physical metallurgy principles*. 4. ed. Stamford:

Cengage Learning, 2014.

Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

Farkoosh, A. R.; Janghorban, K.; Emamy, M. The role of Fe-rich intermetallic phases on the mechanical properties of cast aluminum alloys: a review. *Materials Science and Engineering A*, Amsterdam, v. 772, p. 138780, 2020.

Gama, L. G. *Estudo dos parâmetros térmicos e correlação com a estrutura e resistência mecânica da liga ternária Al-4%Cu-7,5%Ni solidificada sob regime de fluxo de calor transiente*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal do Pará, Belém, 2025.

Jiang, J.; Liu, Y.; Wang, Z.; Zhang, H.; Li, X. Effect of T6 heat treatment on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy components. *Materials Science and Engineering A*, Amsterdam, v. 912, p. 146974, 2024.

Kaufman, J. G.; Rooy, E. L. *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. Materials Park: ASM International, 2004.

Kurz, W.; Fisher, D. J. *Fundamentals of solidification*. Aedermannsdorf: Trans Tech Publications, 1998.

Mondolfo, L. F. *Aluminium alloys: structure and properties*. London: Butterworth-Heinemann, 1976.

Sepehrband, P.; Akbari, M.; Zarei-haghighi, F.; Emamy, M. Influence of Fe-rich intermetallics on microstructure and mechanical properties of aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, Amsterdam, v. 747, p. 843–856, 2018.

Silva, M. *Estudo microestrutural e de resistência mecânica de um nanocompósito de matriz metálica do sistema Al-Cu reforçado por NTC multiwall antes e depois do tratamento térmico T6*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal do Pará, Belém, 2023.

Silva, M. V. M. da; Silva, N. C. S. da; Gama, L. G. O. da; Braga, D. S.; Nascimento, L. G. da S. Quasicrystalline Al-Cu-Fe alloys: processing, microstructure and applications – a review.



Revista Contemporânea, v. 5, n. 4, e7959, 2025.
DOI: 10.56083/RCV5N4-074.

Zhang, P.-X.; Yan, H.; Liu, W.; Zou, X.-L.; Tang, B.-B. Effect of T6 heat treatment on microstructure and hardness of aluminum alloys. *Metals*, Basel, v. 9, n. 1, p. 44, 2019.