

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO ALUMÍNIO ELETROCONDUTOR COM ADIÇÃO DE [2 E 4] %MG.

Alex Márcio Cabral do Rosário (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAPÁ-UEAP)
alexmcrosario@gmail.com

Iago Yan Guimarães Moura da Rocha (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAPÁ-UEAP) iagoyan7@gmail.com

Yuri Kawê de Mello Ribeiro (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAPÁ-UEAP)
yuri.ribeiro.ap@gmail.com

Carlos Alexandre Cavalcante Matos Bahia (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAPÁ-UEAP) carlos.bahia@ueap.edu.br

Resumo

O presente trabalho investigou a influência da adição de magnésio (2 % e 4 % em peso) para a criação de ligas com o alumínio eletrocondutor (Al-EC) produzidas por fusão e solidificação unidirecional. A pesquisa teve como foco analisar como as adições de Mg alteram as características macroestruturais e as propriedades mecânicas — em especial o limite de resistência à tração (LRT), deformação e microdureza — sob diferentes posições ao longo do lingote solidificado. As ligas foram produzidas com controle térmico por termopares em moldes unidirecionais, e caracterizadas por espectrometria de emissão óptica, análise macroestrutural, ensaios de tração e microdureza Vickers. Os resultados revelaram que o teor de magnésio promoveu refinamento estrutural, influência na formação de zonas coquilhada, colunar e equiaxial, e aumento significativo de microdureza e resistência mecânica, sobretudo na liga com 4 %Mg. Observou-se também que a taxa de extração de calor pode estar diretamente ligada a alterações nas propriedades mecânicas e que ligas com maiores teores de Mg, o que indicaria maior sensibilidade às variações térmicas. Conclui-se que a adição de magnésio aprimora o desempenho mecânico do alumínio eletrocondutor solidificado, tornando-o mais adequado para aplicações em transmissão de energia elétrica e outras aplicações estruturais.

Palavras-Chaves: alumínio eletrocondutor, ligas Al-Mg, solidificação unidirecional, propriedades mecânicas, microdureza.



Abstract

This work investigated the influence of adding magnesium (2% and 4% by weight) on the creation of alloys with electroconductive aluminum (Al-EC) produced by unidirectional melting and solidification. The focus of the research was to analyze how Mg additions affect microstructural characteristics and mechanical properties — In particular, the limit of tensile strength (LRT), deformation and microhardness — under different positions along the solidified ingot. The alloys were produced with thermal control by thermometers in unidirectional molds, and created by optical emission spectroscopy, analysis macrostructural, tensile tests and Vickers microhardness. The results revealed that the magnesium content promoted structural refinement, influencing the formation of coquilled, columnar and equiaxial zones, It is a significant increase in microhardness and mechanical resistance, especially not combined with 4%Mg. It was also observed that the rate of heat extraction may be directly linked to changes in the mechanical properties and which are linked with greater heat levels. Mg, which would indicate greater sensitivity to thermal variations. It is concluded that the addition of magnesium improves the mechanical performance of solidified aluminum electroconductor, making it more suitable for applications in transmission of electrical energy and other structural applications.

Keywords: electroconductive aluminum, Al-Mg alloys, directional solidification, mechanical properties, microhardness.

1. Introdução

Os metais, durante toda a história humana, tem sido um dos principais materiais utilizados para o gerar desenvolvimento tecnológico. Isso se deve pelo fato de suas aplicações serem diversas dentro dos setores produtivos que vão da construção civil e transporte até a geração e distribuição de energia elétrica. Eles possuem uma versatilidade gigantesca em suas aplicações e isso muito em função de propriedades físicas e químicas como resistência mecânica, condutividade elétrica, facilidade de conformação, entre outras. Todas estas características tornam os metais indispensáveis no contexto atual mesmo surgindo novas tecnologias.

Dentre esse grupo, um dos metais que mais se destaca é o alumínio, por diversos motivos. Ele é farto na litosfera, isso resulta em uma vasta disponibilidade de matéria prima. Além disso, é extremamente leve (cerca de um terço da densidade do ferro). As características dele o fazem ser excelente para aplicações como embalagens, estruturas aeronáuticas, componentes automotivos e sistemas de transmissão elétrica, embora raramente encontrado em seu estado natural, precisando quase sempre ser obtido por meio da bauxita (Song et al., 2024).

Para atender as estas exigências, o alumínio é frequentemente misturado com outros elementos criando ligas que tornam suas propriedades ainda mais vantajosas para a aplicação desejada. Dentre os diversos elementos metálicos utilizados para a formação de ligas com o alumínio, os principais são o cobre, o zinco, o magnésio e o silício. Todos modificando em algum grau características como dureza, resistência a corrosão, resistência mecânica e condutividade elétrica (Bahia, 2018).

Nesse sentido, o objetivo da pesquisa é formar ligas de Al-EC com adições de magnésio de 2% a 4% e analisar como estas adições influenciam nas características mecânicas e macroestruturais, no Limite de Resistência a Tração (LRT), deformação e microdureza. A partir dos resultados dessas análises, inferir a aplicabilidade da liga em atividades como transmissão, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais eficientes.

2. Referencial Teórico

2.1. Ligas metálicas

As ligas metálicas são materiais que possuem propriedades de diferentes metais, composto pela união de dois ou mais componentes, no qual o componente principal é um metal (Santos, 2006), podendo até apresentar semi-metais e não-metais, mas sempre com predominância dos elementos metálicos. As ligas são, normalmente, desenvolvidas para

modificar ou acrescentar propriedades diferentes dos metais que as formam. O desenvolvimento das ligas metálicas busca, principalmente, alcançar elevados valores de resistência mecânica, dureza, condutividade elétrica, condutividade térmica e sua adaptabilidade às demandas específicas de cada procedimento de caracterização. Estudos têm demonstrado que a adição de elementos como nióbio e alumínio pode alterar significativamente as propriedades de materiais metálicos, como microestrutura, resistência e dureza, evidenciando a importância do desenvolvimento de ligas para o aprimoramento de propriedades desejadas (Beraldo et al., 2022).

2.2. Efeito do magnésio nas propriedades microestruturais e mecânicas das ligas de alumínio

O magnésio é um dos poucos elementos com alta capacidade de se dissolver no alumínio, sendo sua solubilidade influenciada principalmente pela temperatura. O equilíbrio de fases do sistema binário Al–Mg apresenta um eutético em 14,9% em peso de magnésio, e a solubilidade decresce linearmente com a temperatura, aproximando-se de zero a 20°C (Mondolfo, 1976 apud Almeida, 2015, p. 26). Embora esse sistema ofereça potencial para endurecimento por precipitação, o efeito dos precipitados é geralmente pequeno, de modo que o principal mecanismo de endurecimento resultante das adições de magnésio no alumínio é o endurecimento por solução sólida (metaestável) (Kaufman; Rooy, 2004).

De acordo com os autores Kaufman; Rooy (2004), a maioria das ligas da série 5XXX contém de 1 a 5% de teor de magnésio, adições de cromo e/ou manganês da ordem de 0,12 a 0,25% são frequentemente utilizadas como refinadores de grão. O cromo tem baixa taxa de difusão no alumínio e forma fases finas dispersas que retardam a nucleação e crescimento de grãos. Ainda segundo o referido autor, a presença de magnésio reduz sensivelmente a densidade da liga (2,65 g/cm³) e reduz a energia de falha de empilhamento no alumínio, o que causa um aumento da temperatura de recuperação dinâmica, permitindo à liga reter as propriedades do trabalho à frio a temperaturas mais elevadas antes da recuperação e recristalização ocorrerem. Ligas com teores de magnésio da ordem de 4% normalmente não formam Mg₂Al₃, a pesar de que ele pode precipitar-se nos contornos de grão se o metal for mantido à temperaturas de 120°C a 200°C, o que pode causar corrosão intergranular.

2.3. Solidificação

Durante o resfriamento de um metal líquido, a transformação para o estado sólido inicia-se por meio do processo de nucleação, seguido pelo crescimento cristalográfico, sendo ambos

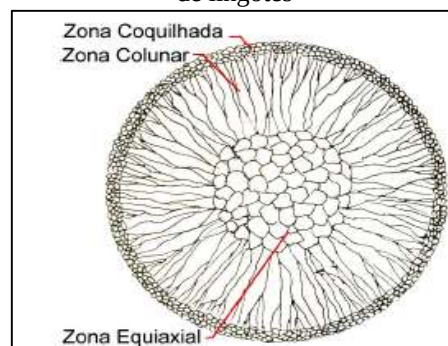
fortemente controlados pelo grau de super-resfriamento, pela taxa de extração de calor e pela mobilidade atômica. Simulações atomísticas baseadas em dinâmica molecular realizadas por Bizot e Jakse (2025), embora em ligas Al–Si, demonstram que a nucleação envolve a formação de múltiplos agrupamentos atômicos instáveis que evoluem até atingir um tamanho crítico, tornando-se núcleos estáveis. Apesar da diferença de composição química, os mecanismos físicos fundamentais são análogos aos observados em ligas Al–Mg, pois dependem diretamente da termodinâmica da interface sólido–líquido e da mobilidade atômica.

Após a nucleação, ocorre o crescimento cristalográfico, controlado pela dinâmica da interface sólido–líquido, pelo transporte de calor e pela redistribuição de soluto. O desenvolvimento microestrutural durante a solidificação rápida de ligas metálicas foi investigado por Ji et al. (2024), que demonstraram que, sob elevadas taxas de resfriamento, a interface pode se tornar instável, originando morfologias celulares e dendríticas em função do gradiente térmico e da velocidade de solidificação.

2.4. Zonas formadas durante a solidificação

A etapa de nucleação de um grão da fase sólida é a primeira etapa na formação da macroestrutura de grãos bruta da solidificação. A segunda etapa corresponde ao crescimento destes grãos, que muitas vezes ocorre simultaneamente a nucleação de outros grãos em diferentes partes do líquido. A competição entre a nucleação e o crescimento dos grãos determinará a macroestrutura final, que confere as propriedades finais ao produto. A macroestrutura de grãos bruta de solidificação pode consistir de três zonas, como mostra a Figura 1, (Flemings, 1974; Campos Filho; Davies, 1978).

Figura 1 – Representação esquemática das zonas presentes em uma macroestrutura típica de seção transversal de lingotes



Fonte: Campos Filho; Davies (1978)

Inicialmente, junto às paredes do molde, forma-se a zona coquilhada, constituída por uma camada de grãos muito finos e com orientações cristalinas aleatórias. Na sequência, à medida que o calor é extraído predominantemente de forma unidirecional, desenvolve-se a zona

colunar, caracterizada por grãos alongados que crescem perpendicularmente às paredes do molde, seguindo a direção do fluxo térmico.

Por fim, na zona equiaxial localizada no centro do lingote, o resfriamento é mais lento e a temperatura mais uniforme, permitindo a nucleação e o crescimento de grãos com formas aproximadamente equiaxiais e orientações aleatórias. Essa zona pode se formar por diferentes mecanismos: nucleação homogênea ou heterogênea na região central ainda líquida, fragmentação e desprendimento de dendritas da frente de solidificação, ou ainda pelo transporte de cristais já formados em outras regiões do banho líquido (Moutinho, 2011).

2.5. Mecanismos de endurecimento

Os elementos de liga quando adicionados às ligas de alumínio podem produzir efeitos de endurecimento por precipitação (endurecimento por envelhecimento), endurecimento por solução sólida, fortalecimento por dispersão, refino de grãos, modificação de fases metálicas e intermetálicas, supressão do crescimento de grãos a temperaturas elevadas (por exemplo, durante o recozimento), alteração na propriedades elétricas, alteração na temperatura de recristalização, resistência ao desgaste e outras propriedades tribológicas (Karabay, 2006a; Zhou et al., 2015a).

A inserção de um segundo elemento em um metal puro representa uma forma muito flexível de endurecimento. Este segundo constituinte pode agregar-se nas mais variadas formas ou tamanhos, de átomos de soluto aleatoriamente dispersos a clusters ou mesmo partículas de segunda fase, as quais poderão ser cisalhadas, ou não pelas discordâncias. Estas diferentes ocorrências influenciam de maneira diferente a resistência do material (Argon, 2008).

3. Metodologia

3.1. Produção das ligas e preparação do material

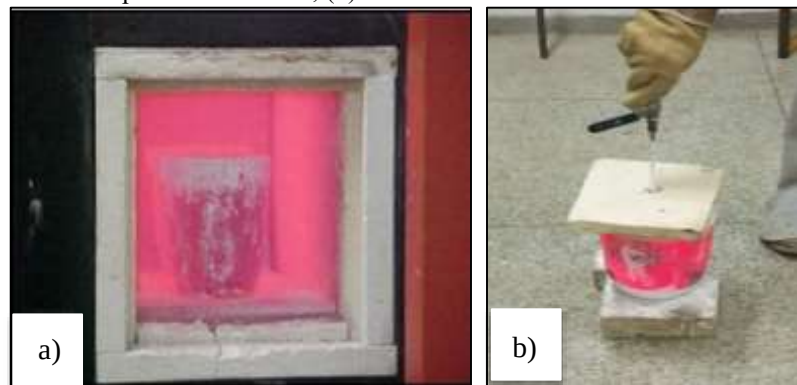
O alumínio eletrocondutor, bem como as ligas Al-2%Mg e Al-4%Mg, foram produzidos a partir de alumínio de pureza comercial e magnésio metálico. Inicialmente, o alumínio base foi seccionado com o auxílio de serra de fita (Figura 2a) e, em seguida, pesado em balança de precisão (Figura 2b), juntamente com o magnésio.

Figura 2 – Equipamentos utilizados: (a) serra fita, (b) balança de precisão e (c) forno mufla

Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT (2018)

A fusão foi realizada em cadinho de carbeto de silício (SiC), com capacidade de 3,5 L, previamente revestido com solução de caulim, com o objetivo de evitar a aderência do metal às paredes internas, conforme descrito por Sousa et al. (2018) e Cardoso et al. (2018). O cadinho foi inicialmente pré-aquecido a 250 °C por 20 minutos e, posteriormente, inserido em forno tipo mufla até atingir aproximadamente 800 °C, garantindo a completa fusão do alumínio (Figuras 2c e 3a).

A homogeneização do banho metálico foi realizada com espátula de aço previamente aquecida e revestida com caulim, sendo seguida pelo processo de desgaseificação por injeção de argônio na faixa de 0,2 a 0,4 L/s. Esse procedimento promoveu a remoção de gases dissolvidos e favoreceu a formação de escória superficial (Figura 3b), a qual foi removida manualmente antes da adição do magnésio.

Figura 3 – (a) Cadinho em processo de fusão; (b) Processo de retirada da escória com auxílio de gás argônio

Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT (2018)

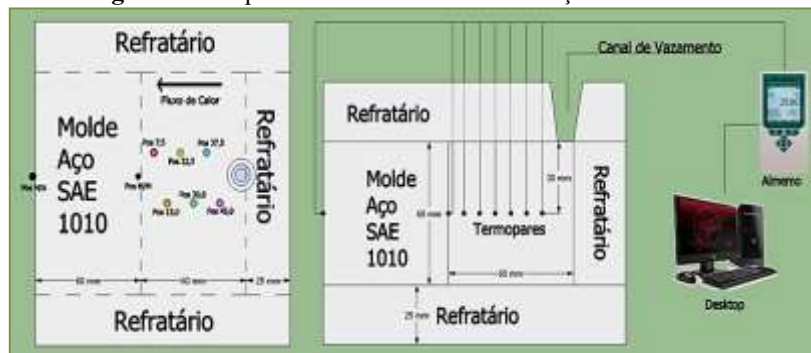
Após a retirada da escória, o magnésio foi adicionado diretamente ao banho metálico, sendo realizada agitação vigorosa para garantir sua completa dissolução. O metal líquido foi então vertido imediatamente após a homogeneização, a fim de minimizar perdas por volatilização do magnésio.

3.2. Solidificação unidirecional

A solidificação foi conduzida em molde unidirecional horizontal, baseado no aparato descrito por Quaresma (1999), Monteiro (2013) e Sousa (2017). O metal líquido foi vazado com superaquecimento de aproximadamente 10% acima da temperatura líquidus, assegurando adequada fluidez durante o preenchimento do molde.

O molde apresentava geometria regular com dimensões de 60 × 60 × 110 mm. A extração de calor foi promovida por meio de um bloco de aço SAE 1010, com dimensões equivalentes, previamente lixado e aquecido para eliminação de umidade, sendo posicionado em contato direto com a câmara de solidificação (Figura 4).

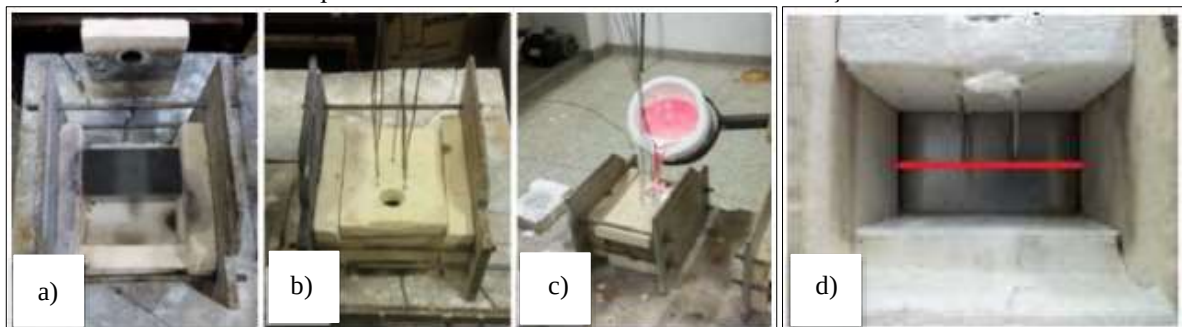
Figura 4 – Esquema da câmara de solidificação unidirecional



Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT (2018)

Com base na metodologia proposta por Jorge (2013), termopares do tipo K foram posicionados a distâncias de 7,5; 22,5; 37,5 e 52,5 mm a partir da interface metal/molde, com profundidade de 30 mm, permitindo o monitoramento do perfil térmico ao longo de todo o processo de solidificação. A distribuição e o posicionamento dos sensores encontram-se ilustrados nas Figuras 5.

Figura 5 – (a) Vista superior da câmara; (b) termopares posicionados; (c) vazamento da liga; (d) termopares posicionados no interior da câmara de solidificação



Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT, 2018

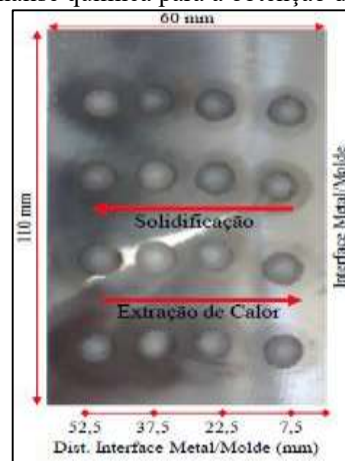
As medições obtidas possibilitaram validar a condição de extração de calor unidirecional, além de fornecer subsídios para a correlação entre a história térmica, a macroestrutura formada e as propriedades mecânicas resultantes.

3.3. Composição química e análise macroestrutural

A composição química das ligas foi determinada por espectrometria de emissão óptica (OES). Para tal, realizou-se um corte transversal do lingote a aproximadamente 30 mm da interface metal/molde, conforme procedimento adotado por Sousa et al. (2018). A superfície exposta foi posteriormente faceada, visando a obtenção de uma área plana e adequada para a realização das medições.

Em seguida, foram realizadas quatro leituras químicas por OES nas distâncias de 7,5; 22,5; 37,5 e 52,5 mm a partir da interface metal/molde (Figura 6), permitindo a verificação da composição final das ligas produzidas, em concordância com a metodologia empregada por Lobato (2016).

Figura 6 – Lingote após análise química para a obtenção do perfil de rejeição de soluto



Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT, 2018

Para a análise macroestrutural, a superfície previamente faceada foi utilizada diretamente para o registro das imagens, conforme descrito por Sousa et al. (2018). Não foram realizadas etapas adicionais de preparação metalográfica, como lixamento fino, polimento ou ataque químico, tampouco observação em microscópio. Tal procedimento está alinhado à metodologia tradicionalmente empregada pelo GPEMAT, baseada na observação direta do perfil macroestrutural após o corte transversal do lingote.

3.4. Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração foram realizados em máquina universal KRATOS (Figura 7), seguindo as normas ASTM E8M-95 e NBR 6810/ISO 6892. Foram ensaiados, no mínimo, três

corpos de prova para cada composição e posição ao longo do lingote. Os valores de limite de resistência à tração (LRT) e deformação percentual foram determinados a partir da média aritmética dos resultados obtidos.

Figura 7 – Máquina universal de ensaios KRATOS



Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT (2018)

3.5. Ensaio de microdureza

As análises de microdureza Vickers foram realizadas em um microdurômetro Shimadzu HMV-2, vide (Figura 8), utilizando carga de 100 gf (0,98 N) aplicada durante 15 s. As amostras foram preparadas utilizando técnicas de metalografia, iniciando pelo lixamento sequencial com lixas de granulometria 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200. Em seguida, procedeu-se ao polimento com pasta de diamante de 1 μ m. Não foi realizado ataque químico, de modo a preservar a integridade da superfície polida para obtenção de indentação precisa.

Figura 8 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2



Fonte: Arquivos do grupo GPEMAT (2018)

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise química

Inicialmente, após a aquisição das ligas por fundição, foi realizada a análise química das amostras. Considerando os resultados alcançados, observa-se a presença do elemento ferro (Fe), o qual está associado ao processo de obtenção do lingote de alumínio eletrocondutor. Mesmo que esse elemento não faça parte da composição intencional das ligas estudadas, sua presença

é inerente ao material base utilizado, sendo originária de impurezas típicas do alumínio comercial.

Examinou-se que o teor de ferro continuou praticamente constante em todas as ligas avaliadas, indicando repartição uniforme desse elemento ao longo do processo de solidificação. Os valores apresentados para o Fe são provenientes de um único lingote de alumínio EC utilizado como material base na produção das ligas.

Na Tabela 1 são exibidos os resultados quantitativos da composição química das ligas analisadas neste trabalho, conforme descrito no item 3.3 – Composição Química e Análise Macroestrutural.

Tabela 1 - Composição químicas das ligas obtidas na fundição, porcentagem em peso

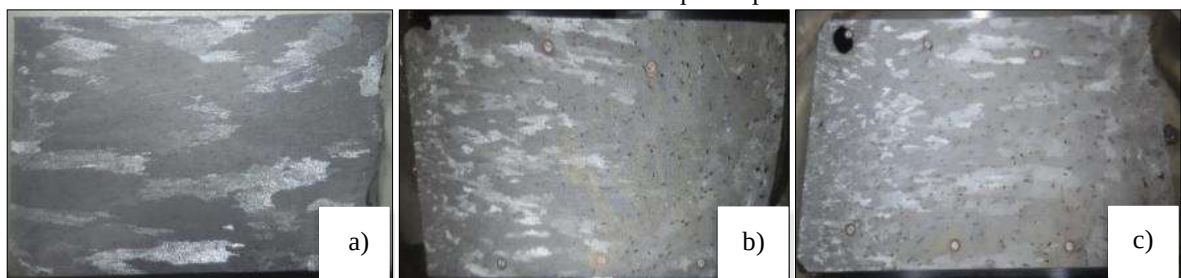
Ligas Desejadas	Elementos químicos		
	Alumínio	Magnésio	Ferro
Al-EC	99,86%	0,00%	0,14%
Al-2%Mg	97,76%	2,10%	0,14%
Al-4%Mg	95,75%	4,10%	0,14%

Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

4.2. Análise macroestrutural

A análise das macroestruturas de solidificação permitiu identificar diferenças entre as ligas estudadas. De modo geral, observa-se que as ligas não apresentam uma zona equiaxial bem definida, localizada na região final da solidificação, à direita das imagens apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Macroestrutura de solidificação para as ligas: Al-EC (a); Al-2%Mg (b); Al-4%Mg(c), com a extração de calor ocorrendo no sentido da esquerda para a direita



Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

De forma mais detalhada, verificou-se que todas as ligas apresentaram morfologia típica de solidificação unidirecional, caracterizada pela presença de uma região coquilhada próxima à interface metal/molde e por uma zona colunar bem desenvolvida ao longo do lingote, seguida por uma pequena região equiaxial. Esse comportamento é característico de processos nos quais há predominância da extração de calor em uma única direção.

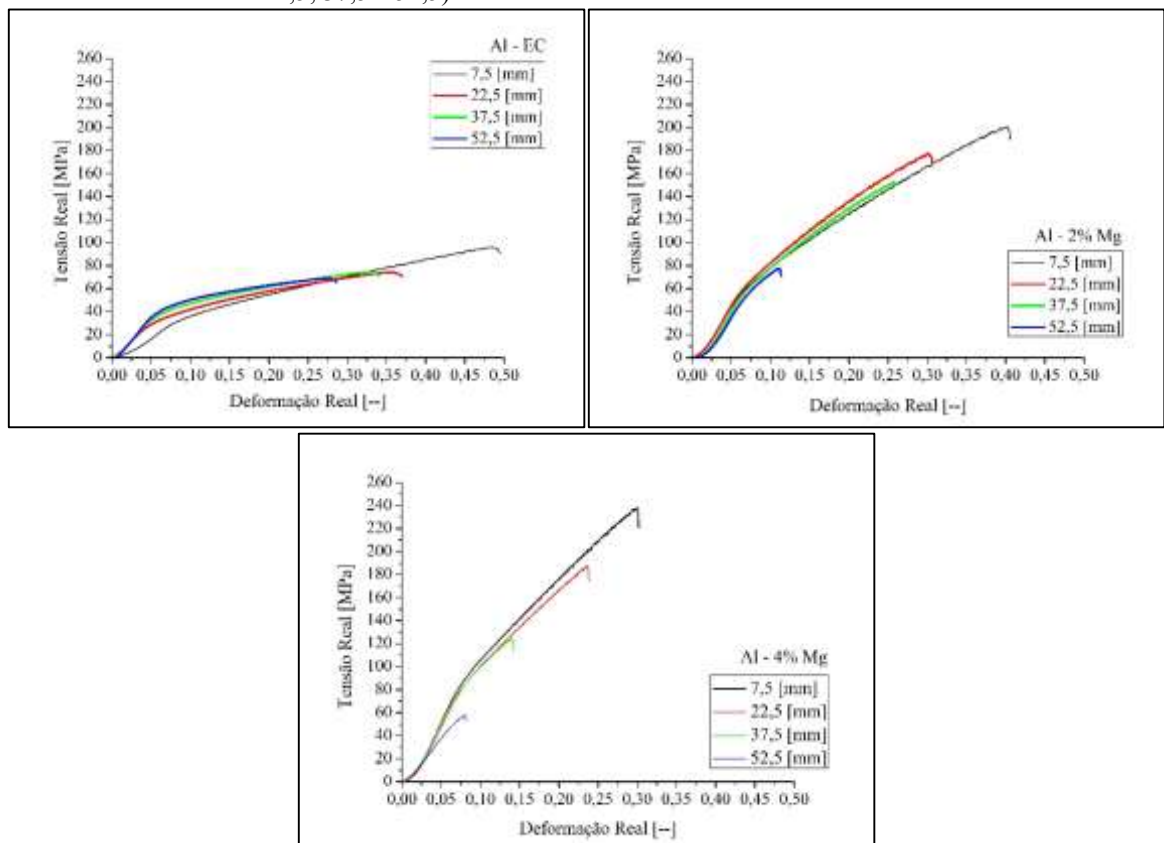
Além disso, observou-se que o aumento do teor de magnésio promoveu um leve refinamento estrutural. Esse efeito pode estar associado à tendência de redução da espessura dos braços dendríticos, decorrente da presença do magnésio na liga.

A Figura 9 evidencia essas diferenças microestruturais entre as ligas analisadas. A macroestrutura da liga Al-EC (Figura 9a) apresenta predominância de grãos colunares. Já a liga Al-2%Mg (Figura 9b) mostra uma camada de grãos coquilhados com extensão mais significativa, enquanto os grãos colunares apresentam menor espessura quando comparados à liga base. Por sua vez, a liga Al-4%Mg (Figura 9c) apresenta três regiões bem identificáveis em sua macroestrutura de solidificação: zona coquilhada, zona colunar e região equiaxial. Esses resultados indicam que a adição de magnésio influencia diretamente a morfologia da estrutura solidificada.

4.3. Análise de resistência

Os resultados obtidos nos ensaios de tração, apresentados na Figura 10, indicam que as diferentes posições analisadas ao longo do lingote apresentam comportamentos distintos em termos de propriedades mecânicas.

Figura 10 – Gráficos de Carga x Deslocamento para a liga Al-EC, Al-2%Mg e Al-4%Mg, por posições de (7,5; 22,5; 37,5 e 52,5) mm de distância da interface Metal/Molde



Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

Observa-se que as posições localizadas mais próximas à interface metal/molde apresentam os maiores valores de tensão e deformação para todas as ligas analisadas. À medida que aumenta a distância em relação a essa interface, verifica-se uma redução gradual dessas propriedades mecânicas.

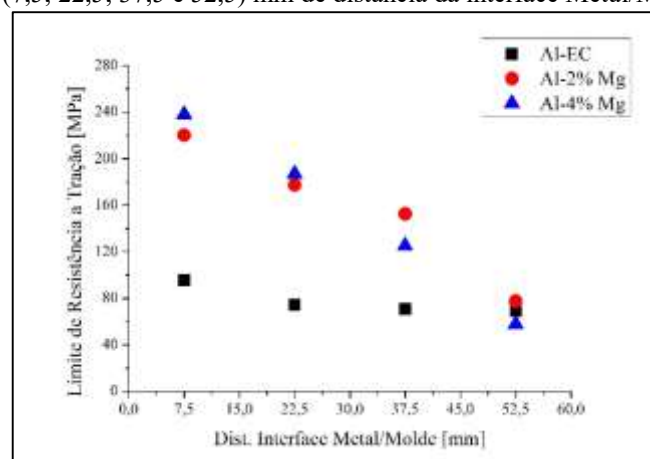
Esse comportamento pode ser explicado pela variação da taxa de extração de calor ao longo do lingote. Regiões mais próximas à interface metal/molde apresentam maiores taxas de resfriamento, favorecendo a formação de microestruturas mais refinadas e, consequentemente, melhores propriedades mecânicas.

Considerando o comportamento das ligas analisadas, observa-se que todas apresentam tendência semelhante: os maiores valores ocorrem no primeiro ponto analisado (7,5 mm), decrescendo progressivamente até o último ponto (52,5 mm). Entretanto, a intensidade dessa variação difere entre as ligas.

A liga Al-EC apresenta uma redução mais moderada dos valores de tensão ao longo das posições analisadas, associada a maiores níveis de deformação. Em contrapartida, as ligas Al-2%Mg e Al-4%Mg apresentam variações mais acentuadas, caracterizadas por maiores tensões e menores deformações relativas. Esse comportamento sugere que a taxa de extração de calor experimental possui influência significativa nas propriedades mecânicas do material, estando diretamente relacionada às variações observadas ao longo do lingote.

A Figura 11 mostra a variação do limite de resistência à tração (LRT) nas diferentes posições analisadas. Observa-se novamente que os maiores valores de LRT estão concentrados nas regiões mais próximas à interface metal/molde, enquanto ocorre redução progressiva nas posições mais afastadas.

Figura 11 – Gráficos do Limite de Resistência a Tração para a liga Al-EC, Al-2%Mg e Al-4%Mg, por posições de (7,5; 22,5; 37,5 e 52,5) mm de distância da interface Metal/Molde



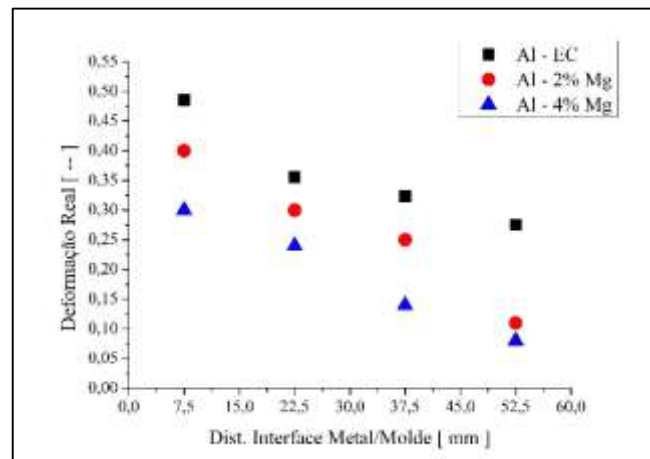
Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

Além disso, nota-se que a queda nos valores de LRT é mais acentuada nas ligas contendo magnésio quando comparadas à liga Al-EC. Percentualmente, a variação entre as posições de 7,5 mm e 52,5 mm corresponde a aproximadamente 72,83% para a liga Al-EC, 38,78% para a liga Al-2%Mg e 24,33% para a liga Al-4%Mg. Esses resultados reforçam a influência da taxa de extração de calor nas propriedades mecânicas do material, tanto para o alumínio eletrocondutor quanto para as ligas modificadas com magnésio.

4.4. Deformação

Os resultados de deformação obtidos para o Al-EC e para as ligas Al-2%Mg e Al-4%Mg, apresentados na Figura 12, mostram que todas as ligas apresentam maior capacidade de deformação nas posições mais próximas à interface metal/molde, diminuindo progressivamente com o aumento da distância.

Figura 12 - Gráfico de deformação para o Al-EC, Al-2%Mg e Al-4%Mg nas posições de [7,5; 22,5; 37,5 e 52,5] mm



Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

Esse comportamento sugere a influência direta da taxa de resfriamento sobre a ductilidade do material, uma vez que regiões com maior extração de calor tendem a formar microestruturas mais refinadas, favorecendo maior deformação plástica.

Entre as ligas analisadas, o Al-EC apresenta os maiores valores absolutos de deformação e menor variação ao longo das posições estudadas, indicando menor sensibilidade às mudanças microestruturais decorrentes do gradiente térmico.

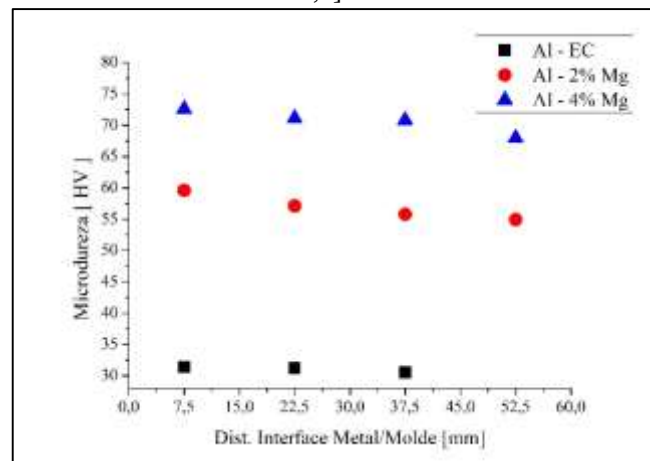
Por outro lado, as ligas contendo magnésio apresentam reduções mais acentuadas na deformação. A liga Al-2%Mg apresenta queda mais pronunciada em comparação ao Al-EC, indicando que a presença de magnésio reduz a mobilidade das discordâncias e limita a ductilidade à medida que diminuem as taxas de resfriamento. Esse efeito torna-se ainda mais evidente na liga Al-4%Mg, que apresenta os menores valores de deformação em todas as

posições analisadas, refletindo o efeito de endurecimento por solução sólida e maior dependência de microestruturas refinadas.

4.5. Microdureza

Os resultados de microdureza apresentados na Figura 13 mostram que todas as ligas analisadas — Al-EC, Al-2%Mg e Al-4%Mg — apresentam comportamento semelhante ao longo das posições avaliadas. Observa-se a ocorrência de maiores valores próximos à interface metal/molde, com redução gradual à medida que aumenta a distância dessa região, possivelmente associada ao aumento do espaçamento dendrítico.

Figura 13 - Gráfico de microdureza para o Al-EC, Al-2%Mg e Al-4%Mg nas posições de [7,5; 22,5; 37,5 e 52,5] mm



Fonte: Adaptado de Bahia (2018)

A liga Al-EC apresenta os menores valores de microdureza e pequena variação ao longo das posições analisadas, indicando baixa sensibilidade às mudanças microestruturais causadas pelo gradiente térmico, comportamento esperado para um material com baixo teor de soluto.

Em contrapartida, as ligas contendo magnésio apresentam valores significativamente superiores de microdureza. A liga Al-2%Mg apresenta redução mais acentuada ao longo das posições analisadas, refletindo a influência das variações microestruturais. Já a liga Al-4%Mg apresenta os maiores valores de dureza em todas as distâncias e menor variação entre os pontos analisados, evidenciando que teores mais elevados de magnésio intensificam o endurecimento por solução sólida e tornam essa propriedade menos sensível às variações térmicas.

5. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos ao longo das análises realizadas neste trabalho, verificou-se que, em relação à macroestrutura de solidificação, todas as ligas apresentaram predominância de grãos colunares. No entanto, foram observadas modificações significativas

com a adição de magnésio. A liga Al-2%Mg apresentou a formação de uma camada de grãos coquilhados junto à interface metal/molde, associada à elevada taxa de extração de calor, além da redução da espessura dos grãos colunares. Já a liga Al-4%Mg, além da presença dessas regiões, apresentou encurtamento da zona colunar e o surgimento de uma região equiaxial. Em comparação, o Al-EC demonstrou maior estabilidade microestrutural em relação às ligas contendo magnésio.

No que se refere às propriedades mecânicas, a liga Al-4%Mg destacou-se por apresentar os maiores valores de limite de resistência à tração (LRT), com comportamento decrescente ao longo do lingote, atingindo valores próximos a 240 MPa, conforme evidenciado nas Figuras 10 e 11. Esse comportamento foi acompanhado por menores valores de deformação, com valor final aproximado de 0,30 mm, indicando maior resistência mecânica associada à redução da ductilidade.

Em relação à deformação, verificou-se que os maiores valores ocorreram nas posições mais próximas à interface metal/molde para todas as ligas, com redução progressiva à medida que se aumenta a distância dessa região. Observou-se ainda que as ligas contendo magnésio apresentaram reduções mais acentuadas quando comparadas ao Al-EC, com variações de até aproximadamente 30% para a liga Al-4%Mg. Esse comportamento confirma o efeito do magnésio no endurecimento das ligas, influenciando diretamente a mobilidade de discordâncias e, consequentemente, a ductilidade do material.

Por fim, na análise de microdureza, constatou-se que as regiões mais próximas à interface metal/molde apresentaram os maiores valores para todas as ligas, em função da formação de microestruturas mais refinadas nessas condições. O Al-EC apresentou os menores valores de dureza em todas as posições analisadas, enquanto as ligas com magnésio apresentaram valores significativamente superiores. Destaca-se a liga Al-4%Mg, que apresentou os maiores valores de microdureza e menor variação ao longo das posições analisadas, indicando maior efeito de endurecimento por solução sólida.

Dessa forma, conclui-se que a adição de magnésio exerce influência direta tanto na evolução microestrutural quanto nas propriedades mecânicas do alumínio eletrocondutor, sendo possível, por meio do controle do teor desse elemento e das condições térmicas de solidificação, ajustar e otimizar o desempenho do material para aplicações específicas.



REFERÊNCIAS

- BAHIA, R. F. **Caracterização mecânica do alumínio eletrocondutor com adições de magnésio**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
- BERALDO, Bianca de Cássia Cardoso et al. **Comportamento eletroquímico de ligas de Ti-Mo-Nb as-cast para aplicações biomédicas**. In: Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares, v. 1, p. 1–9, 2022.
- BIZOT, Quentin; JAKSE, Nathalie. **Crystal nucleation in eutectic Al-Si alloys by machine-learned molecular dynamics**. arXiv preprint, arXiv:2506.08818, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.08818>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- CAMPOS FILHO, M. P.; DAVIES, G. J. Segregação e defeitos em peças fundidas. In: _____. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978. cap. 8, p. 185–219.
- CARDOSO, M. F. M. et al. **Comparação das propriedades mecânicas e do fenômeno de Portevin–Le Chatelier entre o Al-EC e a liga Al-4%Mg**. Brasil, 2018.
- FLEMINGS, M. C. **Solidification processing**. New York: McGraw-Hill, 1974.
- JI, Kai; CLARKE, Adam J.; MCKEOWN, Joseph T.; KARMA, Alain. **Microstructure development during rapid alloy solidification**. MRS Bulletin, v. 49, n. 3, p. 222–234, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2024.23>.
- KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **The influence and control of porosity and inclusions in aluminum castings**. In: KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes and applications**. Materials Park: ASM International, 2004. p. 47–54.
- LOBATO, M. Q. **Avaliação da influência da adição de teores de Zr na termorresistividade da liga Al-0,05%Cu-[0,35–0,45]%Fe-0,3%Si, solidificada em molde unidirecional horizontal**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
- MONDOLFO, L. F. **Aluminum alloys: structure and properties**. London: Butterworths, 1976.
- MOUTINHO, A. M. **Influência da convecção termossolutal na transição colunar-equiaxial de ligas Al-Si sob condições unidirecionais e transitórias de extração de calor**. 2011. Dissertação (Mestrado) – PPGEM/UFPA, Belém, 2011.
- QUARESMA, J. M. V. **Solidificação unidirecional de ligas metálicas: fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 1999.
- SOUSA, A. C. **Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-Cu-Fe-Si modificada com teores de zircônio para fins de transmissão e distribuição de energia elétrica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.
- SOUSA, C. A. C. et al. **Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-Cu-Fe-Si-Zr submetida a tratamento térmico**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 10., 2018, Salvador. Anais [...]. Salvador, 2018.
- SOUSA, C. A. C. et al. **Influência dos teores de 2, 4 e 6% de Mg nas variáveis de solidificação do alumínio eletrocondutor**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 10., 2018, Salvador. Anais [...]. Salvador, 2018.
- SONG, C.-R. et al. **Research progress on the microstructure evolution mechanisms of Al-Mg alloys by severe plastic deformation**. Materials, v. 17, n. 17, p. 4235, 2024. DOI: 10.3390/mat17174235.
- ZHOU, W. R.; ZHENG, Y. F. **Characterization of modified magnesium and magnesium alloys for biomedical applications**. In: Surface modification of magnesium and its alloys for biomedical applications. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 263–282. DOI: 10.1016/B978-1-78242077-4.00008-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782420774000085>. Acesso em: 19 jan. 2021.