

CORRELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DUREZA DA LIGA 6201 TRATADA TERMICAMENTE T6 E SOLIDIFICADA HORIZONTALMENTE

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.130112602032>

Luane Luiza Pereira Marques

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Pará, Campus Belém.
<https://orcid.org/0009-0000-5960-6777>

Hérciles Ruiliman Oliveira de Souza,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Pará, Campus Belém.
<https://orcid.org/0009-0005-0947-6384>

Lailson Souza Meireles,

Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua.
<https://orcid.org/0009-0008-9544-0151>

Athus Igor Castro Holanda

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Campus Belém.
<https://orcid.org/0009-0005-9861-9219>

Amanda Lucena de Medeiros

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará,
Campus Belém. <https://orcid.org/0009-0009-6897-6396>

Otávio Fernandes Lima da Rocha

Faculdade de Engenharia de Materiais, Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém.
<https://orcid.org/0000-0002-6037-6662>

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Pará, Campus Belém.
<https://orcid.org/0000-0002-7202-4541>

RESUMO: Este trabalho avaliou a correlação entre dureza e condutividade elétrica da liga Al-6201 (Al-0,6%Mg-0,8%Si) solidificada horizontalmente e submetida ao tratamento térmico T6, visando aplicações elétricas estruturais. A solidificação direcional horizontal resultou em variações microestruturais ao longo do comprimento do lingote, refletindo diretamente nas propriedades avaliadas. Com a aplicação do tratamento térmico T6, observou-se um aumento expressivo da dureza, com valores médios da ordem de 87,33 HRF, representando um incremento aproximado de 51% em relação à condição não tratada. A condutividade elétrica, expressa em %IACS, apresentou valor médio de 63,97% após o T6, evidenciando uma diminuição moderada associada ao endurecimento por precipitação. A correlação entre dureza Rockwell F e condutividade elétrica para a condição T6 foi descrita por um modelo empírico do tipo potência, $\sigma_{\%IACS} = 0,49(HRF)^{1,09}$, com coeficiente de determinação $R^2 \approx 0,70$, indicando relação positiva moderada entre essas propriedades. Os resultados confirmam a influência do tratamento térmico e da solidificação horizontal na resposta mecânica e elétrica da liga Al-6201, demonstrando sua viabilidade para aplicações elétricas estruturais.

PALAVRAS-CHAVE: Liga Al-6201; Tratamento térmico T6; Dureza Rockwell F; Condutividade elétrica.

CORRELATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND HARDNESS OF T6-HEAT-TREATED ALLOY 6201 SOLIDIFIED HORIZONTALLY

ABSTRACT: This work evaluated the correlation between hardness and electrical conductivity of horizontally solidified Al-6201 alloy (Al-0.6%Mg-0.8%Si) subjected to T6 heat treatment, aiming at structural electrical applications. Horizontal directional solidification resulted in microstructural variations along the length of the ingot, directly reflecting the evaluated properties. With the application of T6 heat treatment, a significant increase in hardness was observed, with average values on the order of 87.33 HRF, representing an approximate increase of 51% compared to the untreated condition. The electrical conductivity, expressed as %IACS, showed an average value of 63.97% after T6, evidencing a moderate decrease associated with precipitation hardening. The correlation between Rockwell F hardness and electrical conductivity for the T6 condition was described by an empirical power-type model, $\sigma_{\%IACS} = 0.49(HRF)^{1.09}$, with a coefficient of determination $R^2 \approx 0.70$, indicating a moderate positive relationship between these properties. The results confirm the influence of heat treatment and horizontal solidification on the mechanical and electrical response of the Al-6201 alloy, demonstrating its viability for structural electrical applications.

KEYWORDS: Al-6201 alloy; T6 heat treatment; Rockwell F hardness; electrical conductivity.

INTRODUÇÃO

A liga de alumínio 6201, pertencente ao sistema Al-Mg-Si, é amplamente utilizada como condutor elétrico em linhas aéreas de transmissão e distribuição devido à combinação de baixa densidade, boa resistência mecânica e condutividade elétrica adequada (Allamki *et al.*, 2023; Khangholi *et al.*, 2021; Czerwinski, 2024). Em aplicações de engenharia elétrica, o desempenho global do condutor é governado por um delicado compromisso entre resistência mecânica (dureza, limite de resistência) e condutividade, já que os mesmos mecanismos de endurecimento por solução sólida e precipitação que aumentam a resistência tendem a elevar a resistividade elétrica (Czerwinski, 2024; Trindade *et al.*, 2025; Abdo *et al.*, 2021). Assim, compreender e quantificar a correlação entre dureza e condutividade em ligas da série 6XXX é essencial para otimizar projetos de cabos mais leves e energeticamente eficientes.

Na liga 6201, a resistência mecânica é majoritariamente controlada pelo endurecimento por precipitação da fase Mg_2Si , obtida por sequências de têmpera em solução seguida de envelhecimento artificial (T6). Durante o tratamento T6, a decomposição da solução supersaturada leva à formação progressiva de precipitados que modificam simultaneamente a resistência e a condutividade (Allamki *et al.*, 2023; Atanacio-Sánchez *et al.*, 2024; Allamki *et al.*, 2021). Estudos em fios 6201 mostram que condições de envelhecimento otimizadas podem manter níveis de resistência próximos ao material encruado, com aumento significativo da condutividade, devido à redução de solutos em solução sólida e consequente diminuição do espalhamento eletrônico (Allamki *et al.*, 2023; Allamki *et al.*, 2021; Alshawreh *et al.*, 2021). De forma geral, observam-se relações funcionais (lineares ou exponenciais) entre resistência/dureza e resistividade/condutividade após tratamentos térmicos controlados, abrindo a possibilidade de monitorar propriedades mecânicas por meio de medições elétricas não destrutivas (Cao *et al.*, 2022; Alshawreh *et al.*, 2021).

Além da composição química e da cinética de precipitação, a microestrutura gerada durante a solidificação exerce papel relevante sobre as propriedades elétricas e mecânicas. Processos de solidificação direcionada ou com forte gradiente térmico tendem a produzir grãos colunares alongados, o que favorece o fluxo de corrente ao reduzir a resistividade e pode impactar a resposta ao endurecimento subsequente (Azevedo *et al.*, 2023). Em ligas de alumínio fundidas horizontalmente, parâmetros como taxa de resfriamento, espaçamento dendrítico e fração de grãos colunares versus equiaxiais influenciam a dureza após T6 e a condutividade ao longo do lingote (Azevedo *et al.*, 2023). Apesar de existirem diversos estudos relacionando

tratamentos térmicos, precipitação e balanço resistência-condutividade em ligas Al-Mg-Si para condutores (Allamki *et al.*, 2023; Khangholi *et al.*, 2021; Atanacio-Sánchez *et al.*, 2024; Allamki *et al.*, 2021; Alshwawreh *et al.*, 2021), há ainda escassez de trabalhos que explorem sistematicamente a correlação direta entre condutividade elétrica e dureza na liga 6201 T6 solidificada horizontalmente, isto é, incorporando simultaneamente os efeitos combinados da macroestrutura de solidificação e da precipitação.

Diante desse contexto, o presente trabalho investiga a correlação entre condutividade elétrica e dureza da liga 6201 submetida ao tratamento térmico T6 e solidificada horizontalmente. Busca-se relacionar as variações espaciais de condutividade e dureza ao longo do lingote, contribuindo para o entendimento do compromisso resistência-condutividade em condições mais próximas da realidade industrial de produção de condutores de alumínio de alta performance.

METODOLOGIA

Material e Composição Química

A liga analisada neste trabalho corresponde à liga de alumínio 6201, com composição nominal Al-0,6%Mg-0,8%Si (em peso). Para a sua produção, foi adotada uma carga total de 1800 g, valor suficiente para assegurar adequada homogeneização química do banho metálico e vazamento completo no sistema de solidificação horizontal.

Os elementos constituintes foram obtidos a partir de alumínio comercial com pureza de 99,58%, silício com pureza de 99,5% e de uma liga base Mg-7%Al. As quantidades de cada componente foram determinadas por cálculos estequiométricos visando atingir a composição nominal da liga, sendo as massas empregadas apresentadas na Tabela 1.

Componentes	Massa (g)	(% em peso)
Liga 6201	1800,0	100,0%
Si	14,4	0,8%
Mg	10,8	0,6%
Al	1774,8	98,6%

Tabela 1 - Massa dos componentes utilizados para produção da liga.

Fonte: Marques (2025)

A fusão dos materiais foi realizada em cadinho de carbetto de silício, promovendo a completa fusão e homogeneização do metal líquido. A temperatura do banho metálico foi monitorada por termopares do tipo K, permitindo o acompanhamento da evolução térmica durante o processo.

A verificação da composição química da liga produzida foi conduzida por meio de análise térmica, a partir da obtenção da curva de resfriamento do metal líquido durante o resfriamento natural até a temperatura ambiente. Com base nessa curva, foram determinadas as temperaturas *liquidus* (T_L) e *solidus* (T_S) experimentais, as quais foram comparadas com os valores teóricos calculados por simulação termodinâmica no software Thermo-Calc, utilizando o banco de dados TCAL8. As composições químicas dos materiais metálicos empregados na preparação da liga são apresentadas na Tabela 2.

Metais	Al	Ti	Ca	Fe	Ni	Cu	Mg	Si	Cr	Zn
Al	Eq.	-	0.009	0.175	0.0148	0.024	0.0011	0.103	-	-
Si	0.1094	0.0455	0.0214	0.3164	0.0102	-	-	Eq.	0.27	-
Mg-Al	6.981	-	-	0.001	0.001	0.115	Eq.	0.246	-	0.631

Tabela 2 - Composições químicas dos metais utilizada na preparação da liga.

Fonte: Marques (2025)

Esse procedimento de validação composicional, fundamentado na correlação entre dados térmicos experimentais e previsões de equilíbrio de fases, é vastamente visto na literatura para ligas de alumínio e permite a confirmação indireta do teor de solutos presentes no material (Paixão *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2021).

Após a determinação da T_L experimental, o metal líquido foi submetido a um superaquecimento da ordem de 10% acima dessa temperatura, resultando em uma temperatura de vazamento próxima de 715 °C. Em seguida, o metal foi vazado no dispositivo de solidificação horizontal, no qual foi conduzido o processo de extração de calor unidirecional.

Procedimento de Solidificação Direcional

A solidificação direcional da liga Al-0,6%Mg-0,8%Si foi realizada em um dispositivo experimental de solidificação horizontal, desenvolvido para impor um fluxo de calor predominantemente unidirecional ao longo do comprimento do lingote. O composto metálico foi fundido em forno tipo mufla até completa homogeneização e, em seguida, vazado no dispositivo de solidificação.

O sistema experimental (Figura 1) é constituído por uma lingoteira metálica dotada de resistências elétricas laterais, empregadas para reduzir perdas térmicas pelas superfícies não ativas do molde e assegurar que a extração de calor ocorra preferencialmente por uma única face lateral. Esse arranjo favorece a formação de um gradiente térmico orientado no sentido longitudinal do lingote, característico de processos de solidificação direcional horizontal.



- ① Metal líquido ② Placas de cerâmica refratária ③ Molde retangular de aço inoxidável
- ④ Termopares ⑤ Paredes externas do dispositivo ⑥ Entrada de água
- ⑦ Controlador de temperatura ⑧ Registrador de temperatura ⑨ Computador/ Software
- ⑩ Alimentação de água ⑪ Dispositivo de solidificação direcional ⑫ Saída de água
- ⑬ Rotâmetro ⑭ Bomba de água

Figura 1 - Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal descendente.

Fonte: Azevedo (2023).

Após o vazamento do metal líquido e a estabilização inicial do sistema, as resistências elétricas foram desligadas e o resfriamento foi iniciado por meio da aplicação de um fluxo contínuo de água à temperatura ambiente, direcionado exclusivamente à face de extração de calor da lingoteira. As demais superfícies

permaneceram termicamente isoladas ao longo de todo o experimento, de modo a preservar a direcionalidade do fluxo térmico. O resfriamento foi mantido até a completa solidificação do lingote.

Preparação Metalográfica e Tratamento Térmico T6

Após o desmolde, o lingote solidificado foi seccionado longitudinalmente, de modo a preservar a direção preferencial de extração de calor imposta durante o processo de solidificação direcional. O corte foi realizado com o auxílio de uma serra de fita, garantindo a integridade da superfície e a adequada orientação das amostras para a posterior análise microestrutural.

Para a realização do tratamento térmico T6, foram selecionadas amostras provenientes de três regiões distintas do lingote solidificado, localizadas a 10-20 mm, 50-60 mm e 90-100 mm a partir da base refrigerada. As amostras foram seccionadas transversalmente ao eixo do lingote e posteriormente usinadas, de modo a obter corpos de prova com dimensões finais de 10 × 10 × 50 mm.

O tratamento térmico T6 foi conduzido em duas etapas. Inicialmente, as amostras foram submetidas ao tratamento de solubilização em forno elétrico, à temperatura de 530 °C, mantida por um período de 3 h. Em seguida, os corpos de prova foram resfriados em água em temperatura ambiente. Posteriormente, foi realizado o envelhecimento artificial em forno elétrico à temperatura de 200 °C, com tempo de patamar de 2,5 h e as amostras foram resfriadas em ar até temperatura ambiente.

As variações de temperatura dos fornos mantiveram-se dentro de uma faixa de ± 10 °C em relação aos valores nominais estabelecidos, assegurando condições térmicas compatíveis com aquelas recomendadas na literatura para a liga 6201 e para ligas do sistema Al-Mg-Si. Dessa forma, foram garantidas as faixas adequadas de temperatura tanto para a etapa de solubilização quanto para o envelhecimento artificial, conforme preconizado em estudos anteriores (Maia, 2012; Kim *et al.*, 2022; Huynh, 2019)

Após a aplicação do tratamento térmico T6, as amostras foram submetidas aos ensaios de condutividade elétrica e de dureza Rockwell F, com o objetivo de avaliar e comparar o efeito do tratamento térmico nas propriedades elétrica e mecânica da liga ao longo das diferentes regiões do lingote.

Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando um durômetro digital de bancada da marca TIME (Figura 2), empregando o método Rockwell na escala F

(HRF). Esse método foi selecionado por sua adequação à caracterização mecânica de ligas de alumínio solidificadas direcionalmente.

As medições de dureza foram conduzidas aplicando-se uma carga de 60 kgf, mantida por um tempo de indentação de 4 s. Em cada posição analisada, foram realizadas três impressões (representando início, meio e fim do lingote), sendo o valor final de dureza determinado pela média aritmética das medições.

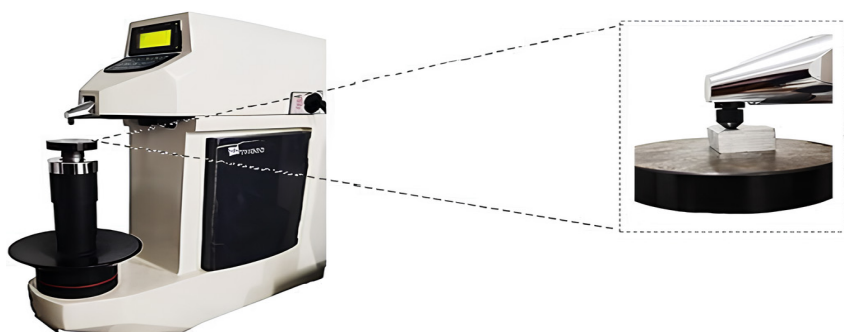


Figura 2 - Durômetro utilizado para o ensaio e zoom (à direita) evidenciando a realização da indentação.

Fonte: Adaptada de Marques (2025).

Para evitar a interferência entre impressões consecutivas, as indentações foram realizadas respeitando uma distância mínima de aproximadamente três vezes o diâmetro da impressão anterior, conforme recomendado pela norma ASTM E18-15 (2015). As medições foram efetuadas nas posições 10, 15, 19, 50 e 90, medidas a partir da base refrigerada do lingote.

Medição da Resistência e Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica da liga Al-0,6%Mg-0,8%Si foi determinada indiretamente a partir da medição da resistência elétrica dos corpos de prova, utilizando um microhmímetro. As correlações foram estabelecidas com base em três posições representativas ao longo do lingote (região inicial, intermediária e final), escolhidas por corresponderem a diferentes condições térmicas de solidificação. A limitação no número de pontos está associada à disponibilidade de amostras e ao delineamento experimental adotado. Como a grandeza diretamente fornecida pelo equipamento é a resistência elétrica, foi necessário o emprego de procedimentos

matemáticos adicionais para a obtenção da resistividade e, posteriormente, da condutividade elétrica do material.

O procedimento experimental (Figura 3) e o tratamento dos dados seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 6814 (1986), originalmente destinada a fios condutores. No presente trabalho, os princípios físicos e as expressões matemáticas dessa norma foram aplicados a corpos de prova de seção transversal não circular, abordagem amplamente aceita na literatura para a avaliação comparativa da condutividade elétrica em ligas metálicas.

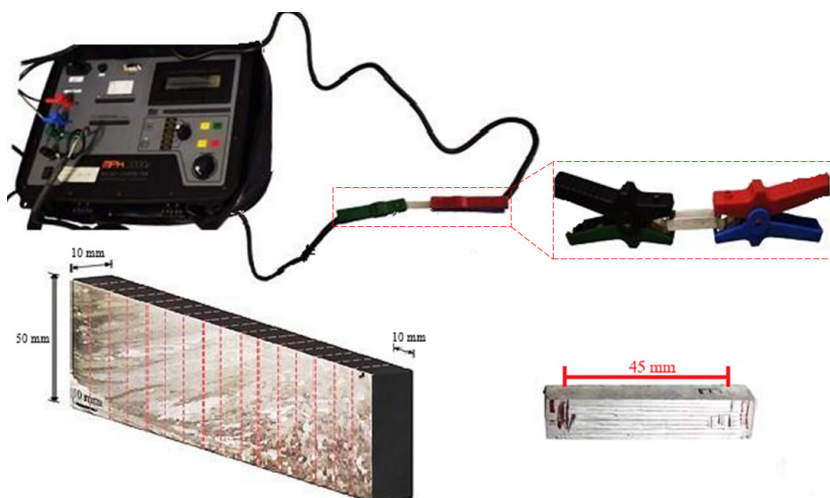


Figura 3 - Esquematização do ensaio de condutividade elétrica nas amostras de seção transversal não circular.

Fonte: Adaptada de Marques (2025).

Inicialmente, os valores de resistência elétrica medidos foram corrigidos para a temperatura de referência de 20 °C, de modo a eliminar a influência das variações térmicas durante o ensaio. Essa correção foi realizada por meio da Equação (1), considerando o coeficiente de temperatura da resistência elétrica característico das ligas de alumínio:

$$R_{20} = R_T \left[\frac{1}{1 + \alpha(T - 20)} \right] \quad (1)$$

Em que R_{20} é a resistência elétrica corrigida para a temperatura de 20 °C, R_T é a resistência medida na temperatura do ensaio, α é o coeficiente de temperatura da resistência elétrica, adotado como 0,00403 °C⁻¹ para ligas de alumínio, T é a temperatura de medição e 20 °C é a temperatura de referência. Após a correção térmica, a resistividade elétrica (ρ) das amostras foi calculada a partir da Equação (2):

$$\rho_{v,20} = \frac{R_{20}A}{L} \quad (2)$$

onde A corresponde à área da seção transversal do corpo de prova, igual a 100 mm², e L é o comprimento efetivo de medição, fixado em 45 mm.

A condutividade elétrica (σ) foi então obtida como o inverso da resistividade elétrica, conforme a Equação (3):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Os valores de condutividade elétrica também foram convertidos para a escala %IACS (*International Annealed Copper Standard*), padrão internacional amplamente empregado para comparação de materiais condutores. Essa conversão foi realizada de acordo com a Equação (4):

$$\sigma_{\%IACS} = \frac{\rho_{Cu,20}}{\rho_{Al,20}} \times 100\% \quad (4)$$

em que $\rho_{Cu,20}$ corresponde à resistividade elétrica do cobre recozido padrão, adotada como $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, e ρ_{Al} é a resistividade elétrica da liga de alumínio corrigida para a temperatura de 20 °C.

Esse conjunto de procedimentos permitiu a obtenção de valores confiáveis e comparáveis de condutividade elétrica, possibilitando a análise do efeito da solidificação direcional e do tratamento térmico T6 sobre o comportamento elétrico da liga estudada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação da Dureza

Com o objetivo de avaliar os efeitos do tratamento térmico T6 sobre o comportamento mecânico da liga solidificada horizontalmente, foram selecionadas amostras provenientes de diferentes posições ao longo do lingote, medidas a partir da superfície de extração de calor, e submetidas ao ciclo de endurecimento por precipitação de acordo com os parâmetros adotados neste estudo. A Figura 4 apresenta a variação da dureza Rockwell F em função da posição para amostras tratadas termicamente na condição T6.

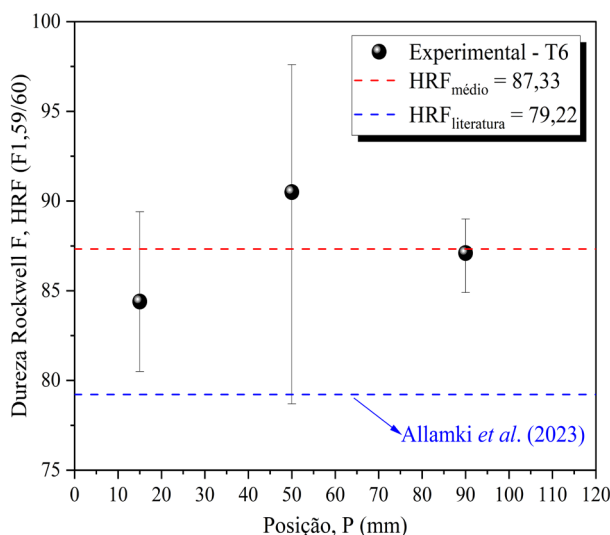


Figura 4 - Dureza Rockwell F (T6) vs. Posição.

Fonte: Adaptada de Marques (2025)

Observa-se que, após a aplicação do tratamento térmico T6, os valores de dureza apresentam distribuição relativamente homogênea ao longo do comprimento analisado, com pequenas variações em torno de um valor médio de aproximadamente 87,33 HRF. Esse comportamento indica que o tratamento térmico foi eficaz em reduzir a influência das heterogeneidades microestruturais oriundas do processo

de solidificação direcional, promovendo uma resposta mecânica mais uniforme ao longo do lingote.

Observa-se um aumento dos resultados, quando comparados à literatura - obtidos por Allamki *et al.* (2023) -, elevando de 79,22 HRF para 87,33 HRF. Já quando comparados aos resultados obtidos para a liga na condição não tratada, conforme relatado por Marques (2025), verifica-se um aumento expressivo nos valores médios de dureza após o tratamento térmico, correspondendo a um incremento da ordem de 51%. Esse ganho de resistência mecânica exibe a efetividade do endurecimento por precipitação promovido pelo tratamento T6.

Do ponto de vista metalúrgico, esse comportamento está associado à presença de magnésio na liga Al-Si, elemento que possibilita o endurecimento por precipitação. Durante o envelhecimento artificial, o magnésio combina-se com o silício, resultando na formação da fase Mg_2Si , responsável pelo aumento da resistência ao movimento de discordâncias e, consequentemente, pela elevação da dureza do material (Pedersen; Arnberg, 2001; Totten; Mackenzie, 2003; Tash *et al.*, 2007; Ozbakir, 2008; Lima, 2012; Oliveira, 2012).

Variação da Condutividade Elétrica

O efeito do tratamento térmico T6 sobre a condutividade elétrica da liga Al-0,6%Mg-0,8%Si solidificada horizontalmente foi avaliado em três amostras extraídas de diferentes posições ao longo do lingote, conforme apresentado na Figura 5. Observa-se que, após a aplicação do tratamento térmico, os valores de condutividade elétrica apresentam variação relativamente pequena ao longo da posição, concentrando-se em torno de um valor médio de aproximadamente 64,0%IACS.

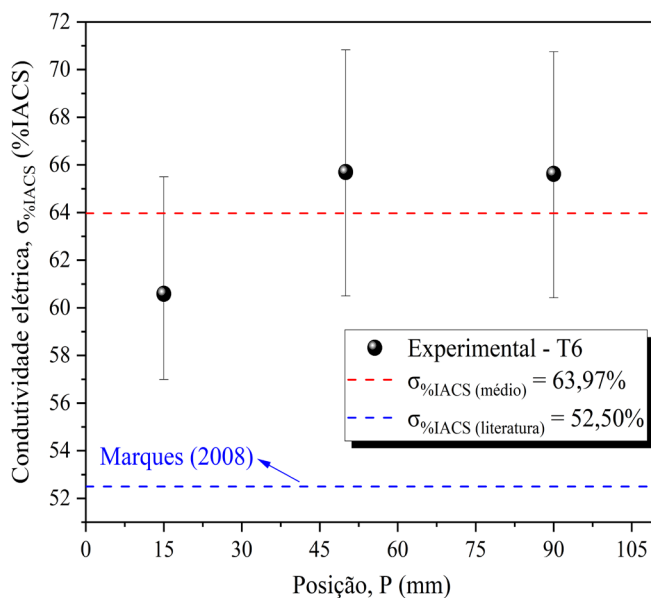


Figura 5 - Condutividade elétrica vs. Posição de medição.

Fonte: Adaptada de Marques (2025)

Quando comparados, os resultados de condutividade elétrica da liga tratada termicamente neste trabalho superaram os resultados da literatura - Marques (2008) -, elevando de 52,50%IACS para, aproximadamente, 64,00%IACS. Já na liga na condição não tratada, reportados por Marques (2025), verifica-se uma redução moderada da condutividade elétrica média, que passa de cerca de 70,00%IACS para 64,00%IACS após o tratamento térmico T6. Essa diminuição, embora perceptível, não é expressiva quando comparada ao ganho substancial de resistência mecânica promovido pelo endurecimento por precipitação.

Além disso, em comparação aos condutores comerciais empregados em redes aéreas, os valores de condutividade elétrica obtidos neste trabalho (~ 64,00%IACS na condição T6) superam a faixa típica reportada para condutores AAAC (~ 52-59%IACS) (Alshwawreh *et al.*, 2021), produzidos a partir de ligas da série 6XXX, nas quais a presença de Mg e Si em solução sólida reduz a mobilidade eletrônica. Em relação aos condutores AAC (alumínio comercialmente puro, série 1XXX), cuja condutividade usual situa-se em torno de 61-62%IACS (Wang *et al.*, 2021), o valor

de 64% IACS também se mostra superior aos níveis tradicionalmente especificados para alumínio de grau elétrico recozido.

Do ponto de vista normativo, a aplicação prática desses materiais é regida por norma, como a BS EN 50182 (2001), que estabelece limites máximos de resistência elétrica em corrente contínua a 20 °C (Ω/km), além de requisitos mecânicos mínimos. Para condutores AAAC, por exemplo, são especificados valores máximos de resistência elétrica da ordem de 0,0397 a 0,0448 Ω/km . Esses parâmetros normativos definem o desempenho elétrico admissível em serviço.

Assim, sob a perspectiva elétrica, a condutividade de 64 % IACS posiciona a liga estudada acima das faixas típicas de condutores AAAC convencionais e dentro (ou mesmo ligeiramente acima) dos patamares associados ao alumínio comercial de alta condutividade, indicando potencial competitivo para aplicações em condutores, desde que os requisitos normativos completos (elétricos e mecânicos) sejam integralmente atendidos.

Além disso, a relativa homogeneidade dos valores de condutividade ao longo do lingote sugere que o tratamento térmico T6 foi eficaz em atenuar as variações microestruturais associadas ao processo de solidificação direcional, resultando em um comportamento elétrico mais uniforme independentemente da posição analisada. As barras de erro indicam variações experimentais compatíveis com a dispersão esperada para medições de condutividade elétrica em ligas de alumínio submetidas a tratamento térmico.

Correlação entre Dureza e Condutividade Elétrica

A Figura 6 apresenta a correlação entre a condutividade elétrica e a dureza Rockwell F das amostras submetidas ao tratamento térmico T6. Observa-se uma tendência crescente da condutividade elétrica com o aumento da dureza, indicando que, nas condições avaliadas, o incremento das propriedades mecânicas não resultou em uma penalização significativa da condução elétrica.

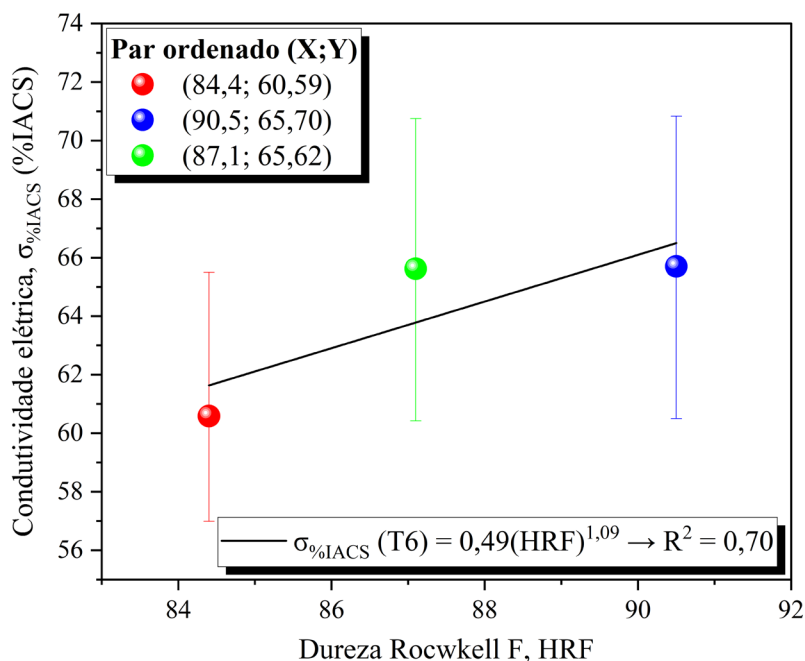


Figura 6 - Correlação entre condutividade elétrica e dureza Rockwell.

Fonte: Os autores (2026).

Na equação apresentada, o expoente próximo da unidade (1,09) indica uma relação aproximadamente linear, ainda que levemente não linear, entre as duas variáveis. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ revela que cerca de 70% da variação da condutividade elétrica é explicada pela variação da dureza, caracterizando uma correlação moderada a boa, especialmente considerando o número reduzido de pontos experimentais e as incertezas associadas às medições.

Do ponto de vista metalúrgico, esse comportamento sugere que o endurecimento promovido pelo tratamento T6 ocorre de forma relativamente homogênea, sem introduzir uma quantidade excessiva de soluto em solução sólida ou defeitos cristalinos capazes de intensificar o espalhamento de elétrons. Assim, mesmo com o aumento da dureza, a condutividade elétrica se mantém em patamares elevados, variando aproximadamente entre 60 e 66 %IACS.

Portanto, a correlação observada indica que o tratamento T6 proporciona um equilíbrio favorável entre resistência mecânica e condutividade elétrica, aspecto relevante para aplicações em que desempenho mecânico e eficiência elétrica são

simultaneamente requeridos, como em ligas da família 6xxx destinadas a condutores estruturais.

Interpretação Metalúrgica e Implicações Tecnológicas

O envelhecimento artificial promove a formação e o crescimento controlado desses precipitados coerentes e semicoerentes na matriz rica em alumínio, os quais atuam como barreiras ao movimento de discordâncias, resultando no aumento da dureza. Simultaneamente, a manutenção de valores relativamente elevados de condutividade elétrica indica que a maior fração do magnésio e do silício se encontra na forma de precipitados estáveis, reduzindo a concentração de soluto em solução sólida (principal responsável pelo espalhamento de elétrons na matriz) (Tao *et al.*, 2024).

A influência da densidade de defeitos cristalinos e da microsegregação também deve ser considerada. Regiões solidificadas sob diferentes condições térmicas tendem a apresentar variações locais na densidade de discordâncias, na distribuição de precipitados e na homogeneidade química. Entretanto, os resultados obtidos indicam que, após o tratamento T6, tais heterogeneidades foram parcialmente mitigadas, refletindo-se na ausência de variações abruptas de condutividade elétrica ao longo das amostras e na correlação moderada observada entre dureza e condutividade. Isso sugere que o tratamento térmico foi eficaz em promover uma microestrutura relativamente uniforme, apesar das variações microestruturais herdadas do processo de solidificação (Azevedo *et al.*, 2023).

Quando comparados com dados da literatura para ligas do sistema Al-Mg-Si submetidas ao tratamento T6, os valores médios de condutividade elétrica (~64 %IACS) e de dureza obtidos neste estudo encontram-se em consonância com o intervalo reportado para ligas da série 6xxx destinadas a aplicações estruturais e elétricas. Trabalhos prévios indicam que a queda moderada da condutividade elétrica após o T6 é um efeito esperado, decorrente do balanço entre precipitação endurecedora e espalhamento eletrônico residual causado por defeitos cristalinos e precipitados finos, corroborando os resultados aqui apresentados (Trindade *et al.*, 2025).

Do ponto de vista tecnológico, a combinação de dureza elevada com condutividade elétrica relativamente alta evidencia a viabilidade da liga para aplicações elétricas estruturais, como cabos reforçados, componentes condutores submetidos a esforços mecânicos e sistemas onde resistência mecânica e eficiência elétrica são requisitos simultâneos. A correlação positiva entre dureza e condutividade, ainda que moderada, indica que o ganho mecânico não compromete severamente o

desempenho elétrico, o que é particularmente relevante para projetos de engenharia (Khangholi *et al.*, 2021).

Por fim, os resultados demonstram que a otimização das propriedades da liga pode ser alcançada por meio do controle integrado dos parâmetros de solidificação e do tratamento térmico. A redução de microsegregações, o controle da taxa de resfriamento e o ajuste das etapas de solubilização e envelhecimento artificial podem favorecer uma distribuição mais homogênea dos precipitados Mg_2Si , maximizando a dureza sem perdas significativas de condutividade elétrica. Dessa forma, o processamento termomecânico adequado surge como ferramenta essencial para a engenharia de ligas Al-Mg-Si com desempenho balanceado entre propriedades mecânicas e elétricas.

Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras

O presente estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A correlação entre dureza e condutividade elétrica foi estabelecida com número limitado de pontos experimentais, o que restringe a robustez estatística do modelo empírico proposto. Além disso, não foram abordadas análises microestruturais quantitativas detalhadas capazes de correlacionar diretamente a distribuição, morfologia e fração volumétrica dos precipitados Mg_2Si com as propriedades elétricas e mecânicas obtidas.

Outra limitação reside na avaliação restrita à condição T6, não sendo investigadas outras rotas de envelhecimento ou estados termomecânicos intermediários que poderiam fornecer uma compreensão mais ampla do compromisso resistência-condutividade. Adicionalmente, os ensaios foram conduzidos em escala laboratorial, sem a incorporação de etapas industriais como trefilação ou encruamento controlado.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a ampliação da caracterização microestrutural por técnicas de microscopia eletrônica, o estudo sistemático da cinética de envelhecimento e a incorporação de rotas termomecânicas representativas do processamento industrial de condutores. A aplicação de modelos físico-matemáticos baseados em mecanismos de espalhamento eletrônico poderá contribuir para uma descrição mais precisa da relação entre precipitação e condutividade elétrica. Tais abordagens permitirão consolidar o entendimento do equilíbrio entre resistência mecânica e desempenho elétrico na liga 6201.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais alcançados no presente estudo permitiram analisar de forma integrada a resposta mecânica e elétrica da liga Al-6201 solidificada horizontalmente e submetida ao tratamento térmico T6, possibilitando concluir que:

1. O tratamento térmico T6 promoveu um incremento significativo da dureza Rockwell F da liga, associado à precipitação controlada do composto intermetálico Mg_2Si , ao mesmo tempo em que resultou em uma redução moderada da condutividade elétrica média, de aproximadamente 70,01 %IACS (condição sem tratamento) para 63,97 %IACS, evidenciando o compromisso entre endurecimento por precipitação e transporte eletrônico.
2. A condutividade elétrica apresentou distribuição relativamente homogênea ao longo das posições analisadas, indicando que o tratamento T6 foi eficaz na mitigação parcial das heterogeneidades microestruturais oriundas do processo de solidificação horizontal.
3. Observou-se a existência de uma correlação positiva entre dureza Rockwell F e condutividade elétrica para a condição T6, descrita pelo modelo empírico do tipo potência, com coeficiente de determinação $R^2 \approx 0,70$, indicando que regiões com maior endurecimento não apresentaram perdas severas de condutividade.
4. A combinação de dureza elevada e condutividade elétrica relativamente alta confirma a viabilidade da liga Al-6201 tratada termicamente para aplicações elétricas estruturais, como cabos condutores reforçados e componentes submetidos simultaneamente a solicitações mecânicas e exigências de eficiência elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão pelo apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil. Agradecemos também ao Núcleo de Processamento de Materiais (NPM), à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Instituto Federal do Pará (IFPA) pela infraestrutura de pesquisa, instalações laboratoriais e apoio institucional que tornaram este trabalho possível. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABDO, H. S.; SEIKH, A. H.; MOHAMMED, J. A.; SOLIMAN, M. S. Alloying elements effects on electrical conductivity and mechanical properties of newly fabricated Al based alloys produced by conventional casting process. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 3971, 2021.

ABNT. (1986). **NBR 6814**: Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro, mar. 1986.

ALLAMKI, A.; AL-MAHARBI, M.; ARUNACHALAM, R.; ZAHID, S. Improved tensile strength and electrical conductivity of the electrical conductor aluminum alloy 6201. In: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. American Society of Mechanical Engineers, 2021. p. V003T03A026.

ALLAMKI, A.; AL-MAHARBI, M.; QAMAR, S. Z.; AL-JAHWARI, F. Precipitation hardening of the electrical conductor aluminum alloy 6201. **Metals**, v. 13, n. 6, p. 1111, 2023.

ALSHWAWREH, N.; ALHAMARNEH, B.; ALTWARAH, Q.; QUANDOUR, S.; BARGHOUT, S.; AYASRAH, O. Electrical resistivity and tensile strength relationship in heat-treated all aluminum alloy wire conductors. **Materials**, v. 14, n. 19, p. 5738, 2021.

ASTM International. (2015). **ASTM E18-15**: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: 10.1520/E0018-15.

ATANACIO-SÁNCHEZ, X.; GARAY-REYES, C. G.; MARTÍNEZ-GARCÍA, A.; ESTRADA-GUEL, I.; MENDOZA-DUARTE, J. M.; GUERRERO-SEAÑEZ, P.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, R. Enhancement of the Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Al-Mg-Si and Al-Mg-Zn Ternary Systems After a T8 Heat Treatment. **Metals**, v. 14, n. 11, p. 1286, 2024.

AZEVEDO, H. A. M. **Efeito dos parâmetros de solidificação e do tratamento térmico T6 na microestrutura, microdureza, desgaste e condutividade elétrica da liga Al-3%Cu-5%Nb**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2023.

AZEVEDO, H. M.; MENDES, G. H.; RODRIGUES, H. C.; ROCHA, F. S.; COSTA, T. S.; MOREIRA, A. L.; ROCHA, O. L. Effects of solidification, solution and aging processes on an AlCuNb alloy: thermal and microstructural analysis, microhardness, electrical resistivity and conductivity. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 149, n. 3, p. 953-966, 2023.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 50182:2001**: Conductors for overhead lines: round wire concentric lay stranded conductors. London: BSI, 2001. p. 6, 8, 10, 50, 61.

CAO, F.; YAOHUI, X.; CHANG, C.; ZHAOHUI, Q.; CHI, D. Hardness and Conductivity of Die Forged ZYK530 Magnesium Alloy. **Materials Science**, v. 28, n. 3, p. 287-294, 2022.

CZERWINSKI, Frank. Aluminum alloys for electrical engineering: a review. **Journal of Materials Science**, v. 59, n. 32, p. 14847-14892, 2024.

HUYNH, K. C. Effects of the heat treatment on the mechanical properties of 6201 aluminium alloy wire. **Vietnam Journal of Science and Technology**, v. 57, n. 3A, p. 11-11, 2019.

KHANGHOLI, S. N.; JAVIDANI, M.; MALTAIS, A.; CHEN, X. G. Effects of natural aging and pre-aging on the strength and electrical conductivity in Al-Mg-Si AA6201 conductor alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 820, p. 141538, 2021.

KIM, Y. M.; CHOI, S. W.; KIM, Y. C.; KANG, C. S. Increasing the thermal diffusivity of Al-Si-Mg alloys by heat treatment. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 3, p. 2139-2146, 2022.

LIMA, N. A. G. **Tratamento térmico de envelhecimento da liga de fundição AlSi10Mg(Fe)**. Porto, 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

MAIA, A. M. P. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. Porto, 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Portugal, 2012.

MARQUES, Luane Luiza Pereira. **EFEITO DOS PROCESSOS DE SOLIDIFICAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO NA ESTRUTURA, PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DA LIGA 6201**. 2025. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2025.

MARQUES. P. R. **Caracterização térmica, mecânica e elétrica da liga Al-0,6%Mg-0,8%Si refinada e modificada com diferentes teores de cobre**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2008.

OLIVEIRA, G. R. V. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

OZBAKIR, E. **Development of aluminum alloys for diesel-engine applications**. Thesis, McGill University, Canada, v. 560, p. 130, 2008.

PAIXÃO, J. L.; SOUSA, R.; FREITAS, P. R.; SOUSA, R. M.; LUZ, J. R.; SILVA, B. L.; SPINELLI, J. E. Role of Zn in the Microstructure, Segregation, and Cytotoxicity of Sn-0.2 Ni Solders. **ACS omega**, v. 9, n. 8, p. 8829-8845, 2024.

PEDERSEN, L.; ARNBERG, L. The effect of solution heat treatment and quenching rates on mechanical properties and microstructures in AlSiMg foundry alloys. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 32, n. 3, p. 525-532, 2001.

RODRIGUES, J. A. F.; JÚNIOR, G. E. M.; BARROS, A. D. S.; ROCHA, O. F. L. D.; MOREIRA, A. L. S. Liga hipoeutética Al-11% Si: coeficiente de transferência de calor interfacial, variáveis térmicas, parâmetros microestruturais e microdureza. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13064, 2021.

TAO, X.; HE, H.; LI, K.; DING, Q.; WANG, T.; MO, Y.; GONG, Z. Influence of temperature on the precipitation phase transformation behavior of RR350 aluminum alloy during artificial aging and related mechanisms. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 970, p. 172550, 2024.

TASH, M.; SAMUEL, F. H.; MUCCIARDI, F.; DOTY, H. W. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 443, n. 1-2, p. 185-201, 2007.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott (Ed.). **Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes**. CRC press, 2003.

TRINDADE, W. G.; PADOVEZZI, R. O.; PINTO, E. P. G.; MARQUES, G. A.; AMORESE, R. A.; SILVA, M. C.; DAMASIO, T. S.; ANDRADE, G. O.; DE LUCA, R.; NASCIMENTO, P. H. T. Influence of alloying elements on the mechanical properties and electrical conductivity of 6000 series aluminum alloy. A review. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 18, n. 6, p. e18763, 2025.

WANG, Y.; ZHU, L.; NIU, G.; MAO, J. Conductive Al alloys: the contradiction between strength and electrical conductivity. **Advanced Engineering Materials**, v. 23, n. 5, p. 2001249, 2021.