



C A P Í T U L O 1

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MACROESTRUTURAL, ELÉTRICA E MECÂNICA DA LIGA 6101

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.130112602031>

Lailson Souza Meireles

Universidade Federal do Pará

Ananindeua – Pará

<http://lattes.cnpq.br/6255277396258296>

Fernanda da Silva de Lima

Universidade Federal do Pará

Ananindeua – Pará

<https://lattes.cnpq.br/0475097303672768>

Alicia Regina Zanon Barbosa

Universidade Federal do Pará

Belém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/2085252897942870>

Luane Luiza Pereira Marques

Universidade Federal do Pará

Belém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/9438927804105514>

Emerson Rodrigues Prazeres

Universidade Federal do Pará

Belém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/8918189837419936>

Amanda Lucena de Medeiros

Universidade Federal do Pará

Belém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/7734539626373520>

Deibson Silva da Costa

Universidade Federal do Pará

Ananindeua – Pará

<http://lattes.cnpq.br/1521124351431087>

RESUMO: Em decorrência do crescimento populacional e desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, nota-se a necessidade de melhorar a eficiência energética do país. Diante deste cenário, é desejável procurar alternativas para reduzir o sucateamento das linhas de transmissão. O alumínio tem se destacado como o material mais utilizado para linhas de transmissão e distribuição de eletricidade, pois sua excelente relação condutividade/peso permite que as concessionárias utilizem mais fios com menos estruturas de suporte, porém o alumínio não possui uma resistência mecânica elevada. Perante a isso, foi realizado um estudo das características da liga 6101 solidificada em molde de coquilha metálico tipo “U”, levando em consideração, a composição química, macroestrutura e as propriedades elétricas e mecânicas. Os resultados demonstraram que a liga fundida apresentou uma macroestrutura mista composta por grãos equiaxiais na região central da peça e grãos colunares próximos as bordas. A liga conseguiu uma excelente correlação entre a condutividade elétrica e o limite de resistência a tração (LRT), sendo superior aos valores mínimos da companhia paraense de energia (COPEL).

PALAVRAS-CHAVE: Macroestrutura, Fundição, Caracterização, Liga.

CHEMICAL, MACROSTRUCTURAL, ELECTRICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ALLOY 6101

ABSTRACT: Due to population growth and technological development in recent years, there is a need to improve the country's energy efficiency. Given this scenario, it is desirable to seek alternatives to reduce the deterioration of transmission lines. Aluminum has become the most widely used material for electricity transmission and distribution lines because its excellent conductivity-to-weight ratio allows utilities to use more wires with fewer support structures; however, aluminum does not have high mechanical strength. Given this, a study was conducted on the characteristics of alloy 6101 solidified in a U-shaped metal die mold, taking into account the chemical composition, macrostructure, and electrical and mechanical properties. The results demonstrated that the cast alloy presented a mixed macrostructure composed of equiaxed grains in the central region of the piece and columnar grains near the edges. The alloy achieved an excellent correlation between electrical conductivity and tensile strength (TSL), exceeding the minimum values of the Pará state energy company (COPEL).

KEYWORDS: Macrostructure, Casting, Characterization, Alloy.

INTRODUÇÃO

O alumínio é amplamente empregado em aplicações industriais e, de forma destacada, no setor elétrico, em razão de sua elevada condutividade elétrica, baixa densidade e boa resistência à corrosão. Essas propriedades tornam o material particularmente adequado para sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, possibilitando a redução do peso próprio das linhas, menores esforços mecânicos nas estruturas de suporte e diminuição das perdas elétricas ao longo das redes (ABAL, 2026). Entretanto, o alumínio comercialmente puro apresenta limitações quanto à resistência mecânica, o que restringe sua aplicação em situações que exigem maior desempenho estrutural.

Para superar essa limitação, são empregadas ligas de alumínio contendo elementos de liga em teores controlados, de modo a promover um equilíbrio entre resistência mecânica e condutividade elétrica. Estas propriedades são as mais importantes dos materiais condutores e estão diretamente relacionadas às perdas de energia e à segurança. Os esforços comuns de engenharia visam aprimorar o desempenho mecânico por meio de ligas e tratamento termomecânico que aumenta a densidade de centros de dispersão de elétrons (Czerwinski, 2024).

Em contextos industriais, as ligas de alumínio da série 6000 são amplamente empregadas em setores que exigem uma alta relação resistência/durabilidade, combinada com boa conformabilidade e estabilidade metalúrgica (Gao, Dong, *et al.*, 2024; Rahman, Butcher, *et al.*, 2022). A liga 6101 destaca-se por ser amplamente utilizada na fabricação de fios e cabos condutores, especialmente em aplicações que demandam boa condutividade elétrica associada a resistência mecânica adequada para suportar esforços mecânicos durante a operação e instalação das linhas (Abal, 2026; Totten; Mackenzie, 2003)

As propriedades elétricas e mecânicas da liga 6101 estão diretamente relacionadas à sua composição química, à homogeneidade estrutural e aos processos de fabricação, como conformação plástica e tratamentos térmicos. A caracterização microestrutural permite avaliar a distribuição dos grãos e possíveis heterogeneidades formadas durante a solidificação, enquanto a análise química é fundamental para verificar a conformidade da liga com os limites normativos. Além disso, os tratamentos térmicos constituem ferramentas importantes para o ajuste das propriedades do material, uma vez que envolvem operações controladas de aquecimento e resfriamento capazes de modificar seu comportamento físico, elétrico e mecânico (Garcia, 2001; Prazeres, 2014).

Nesse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as características da liga 6101, levando em consideração a composição química, microestrutura, e as propriedades elétricas e mecânicas. O artigo busca contribuir para o entendimento

do comportamento dessa liga em condições de serviço, fornecendo subsídios técnicos para sua aplicação em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, considerando as demandas operacionais e o crescimento do consumo energético observados no cenário nacional

MATERIAIS E MÉTODOS

A liga desenvolvida para este estudo tem o objetivo de ser aplicada em cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica. A metodologia desenvolvida neste trabalho para caracterização da liga está descrita abaixo como mostrado no fluxograma da Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma detalhando os processos metalúrgicos realizados no estudo da liga.

Fonte: Autores (2026)

Fundição

Para o início do processo de fundição, utilizou-se um cadinho e um molde de coquilha metálica com geometria de "U", que foram lixados e pré aquecidos até 250°C, em seguida revestidos com uma fina camada de alumina, afim de impedir a contaminação e facilitar o processo de desmoldagem da liga.

O alumínio a ser fundido foi adicionado ao forno da marca GREFORTEC, a 900 °C por 1 hora, temperatura e tempo necessários para garantir a fusão total.

Imediatamente após este período, ocorreu a etapa de homogeneização do banho metálico, foi utilizada uma espátula de aço, lixada e pintada com alumina e foi feita a agitação do material líquido.

Posteriormente, em consonância com a metodologia utilizada por Prazeres (2014), foi injetado o gás argônio na vazão de 0, 2 l/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 mm³ durante 1 minuto, os elementos de liga foram adicionados a 760 °C, e o vazamento foi realizado de maneira no molde em formato de U na temperatura de aproximadamente 720 °C

Análise Química

Após o vazamento e solidificação na coquilha metálica, as amostras foram seccionadas para realização da caracterização química, a amostra foi previamente preparada através de lixamento nas lixas: 80 a 220 *mesh*. Em seguida, foram direcionadas ao Espectrômetro óptico de massa, da marca OXFORD- *Foundry Master Xpert*, no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM). Os resultados foram obtidos a partir da média 3 leituras da composição química da amostra.

Metalografia

Foram utilizadas as lixas desbastadoras de granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400 para nivelar as peças e lixas de acabamento: 600, 800, 1000, 1200 e 2000 para deixar as peças mais regulares para a análise. Em seguida, foi realizado o polimento utilizando aluminas líquidas de: 1, 0,3 e 0,05 µm para retirar os riscos das lixas e melhorar o acabamento nas peças.

Na etapa de revelação da macroestrutura, foi realizado o ataque químico com reagente Keller pelo método de imersão durante 60 segundos. Em seguida, foi verificada a olho nu ou com uma ampliação de no máximo 10 vezes, de uma superfície plana

Produção dos Fios

No processo de produção dos fios, após a peça ser desmoldada e seccionada, ocorreu a etapa de usinagem no torno industrial Nardini modelo mascote MS205, para diminuição do diâmetro de 22,5 mm para 9,5 mm, com objetivo de facilitar o processo de laminação a frio. Posteriormente, as amostras foram conformadas em laminadoras semi industriais da marca MENAC duo reversível. Desta maneira, as peças foram conformadas através dos canais até o diâmetro de 3,0 mm.

Caracterização elétrica

Posteriormente ao processo de laminação e tratamento térmico, foi realizado o ensaio de condutividade elétrica, com o auxílio do microhmímetro MEGABRÁS (ponte de Kelvin), modelo MPK-2000. A análise consistiu em calcular a resistência elétrica do corpo de prova, o teste ocorreu em três pontos, com distância entre garras de 400 mm, a uma temperatura superior a 10 °C e inferior a 30 °C e corrigida para a temperatura de 20 °C como a norma NBR 5118.

Ensaio de Tração

Após o ensaio de condutividade elétrica, os fios foram seccionados em amostras de 200 mm de comprimento para realização do ensaio. A caracterização mecânica foi realizada em uma máquina de ensaio de tração KRATOS modelo IKCL1– USB, acoplada a um microcomputador para o armazenamento de dados, os corpos de prova foram adaptados para esse ensaio de acordo com a norma NBR 6810 e NBR ISO 6892, respeitando as distâncias entre garras de 150 mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Química

Após a análise química realizada, foi confirmado que a liga produzida no molde está no padrão da liga 6101. Os valores expressos são resultados de uma média realizada de no mínimo três pontos aleatórios para análises, como pode ser visto na Tabela 1.

LIGAS	Fe%	Cu%	Mg%	Si%	Al%
6101 - AA	0,35 – 0,80	0,10	0,35 – 0,80	0,30 – 0,70	97,61 – 98,46
Al-Mg-0,5%Si	0,521	0,0439	0,689	0,497	98,25

Tabela 1 – Composições químicas dos lingotes fabricados.

Fonte: autores (2026)

A composição está de acordo com a faixa estabelecida pela (Aluminum Association, 1997), ao analisar os dados obtidos, pode-se verificar um aumento no teor de Ferro na liga da série 6101, tal composição tem potencial para afetar diretamente as propriedades da liga estudada.

Macroestrutura

De acordo com Peixoto (2009), as condições termodinâmicas de solidificação se processam dando origem a núcleos, que vão crescendo e formando grãos cristalinos, que definirão a macroestrutura da peça. A macroestrutura da liga 6101 pode ser observada na Figura 2.

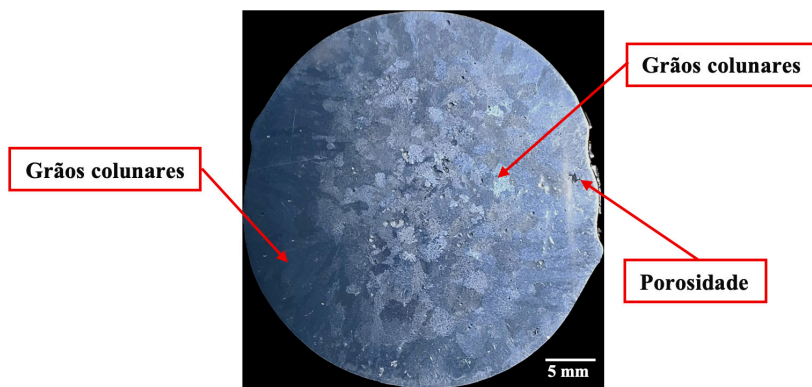


Figura 2 – Macroestrutura da liga 6101

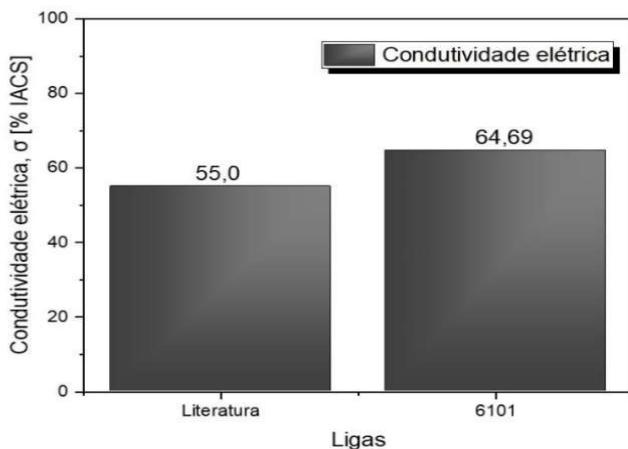
Fonte: Autores (2026)

A partir da visualização da macrografia da liga 6101 na Figura 2, foi possível identificar que no centro da amostra há uma grande zona com grãos sem orientação determinada, caracterizando os grãos equiaxiais. Nas extremidades da amostra, é possível observar uma grande densidade de grãos colunares, que pode ter ocorrido à medida que o calor é extraído. Os cristais tendem a crescer na direção oposta ao fluxo. Estudos de Zhang et al. (2005) mostram o efeito do teor de ferro em alumínio eletrocondutor como refinador de grão. A diminuição dos grãos na zona coquilhada pode ser decorrente do tempo de solidificação, tendo em vista que os estudos de Garcia (2001), mostram que o maior tempo de solidificação favorece a formação de grãos equiaxiais.

Condutividade Elétrica

Após o processo de conformação plástica, a liga estudada foi submetida a análise de resistividade elétrica, os resultados foram convertidos em IACS estão apresentados graficamente na Figura 3.

Figura 3 - Condutividade elétrica da liga 6101.



Fonte: Autores (2026)

A liga 6101 apresentou um crescimento de 17,62% na condutividade elétrica em comparação aos 55 (%IACS) encontrado na liga comercial. Segundo Moreira (2008), a avaliação do ponto de vista da propriedade elétrica acontece melhor em teores de Fe inferiores a 0,8%, quando se tem boa performance mecânica associada à excelente performance elétrica, podendo ser compatíveis com às ligas de alumínio da série 6000, tratadas termicamente. A presença de grãos colunares e equiaxiais em uniformidade acabaram facilitando a passagem de corrente devido à baixa anisotropia, e redução dos contornos de grão.

LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

São apresentados os resultados do ensaio mecânico nos corpos de prova (Cp's) da liga 6101 observados na Figura 4 (a), onde nota-se que a liga apresentou um LRT coerente com a Literatura podendo ser observado na Figura 4 (b), ressaltando que está no seu estado encruado (*strain hardened* - SH) teve um aumento de 30,75 MPa.

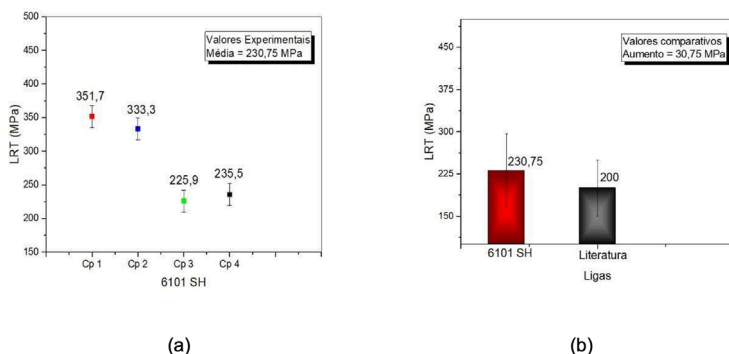


Figura 4 - Limite de resistência a tração da liga 6101 (a) Valores de limite de resistência a tração para cada corpo de prova. (b) comparação entre a liga 6101 sem endurecimento (SH) e a liga comercial.

Fonte: Autores (2026)

No gráfico da Figura 4 (b), pode se avaliar que a liga estudada obteve um crescimento de 15,37% no limite de resistência a tração, tal crescimento deve estar relacionado ao teor de Fe e Cu, que tem características aprimoram a resistência da liga, conforme Santos *et al.* (2009).

CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos através dos processos realizados para caracterização da liga 6101 fundida, conclui-se que:

→ A caracterização química demonstrou que a liga está dentro dos padrões estabelecidos pelas normas internacionais. Além disso as macroestruturas apresentaram grãos predominantemente equiaxiais e colunares, de modo que a zona coquilha foi suprimida e não pode ser visualizada a olho nu.

→ Em relação ao desempenho mecânico, a liga 6101 obteve um crescimento LRT, com aumento de 15,37% em comparação à liga comercial da série 6101.

→ Para a caracterização elétrica, a condutividade elétrica obtida foi de 64,69% com 17, 62% de crescimento em comparação a literatura.

Diante dos resultados, conclui-se que a liga 6101 pode ser utilizada na rede de distribuição de energia elétrica pois, apresentou relações adequadas entre o LRT e a condutividade elétrica, acima dos parâmetros exigidos pela COPEL.

REFERÊNCIAS

- ALUMINUM ASSOCIATION. **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminium and Wrought Aluminum Alloys**, fev 1997. Associação Brasileira de Alumínio–ABAL. <<http://www.abal.org.br/aluminio.asp>>. Acesso em: 01 fev. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6810: Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, nov. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5118: Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos**. Rio de Janeiro, jul. 2007.
- CZERWINSKI, Frank. Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science*, v. 59, p. 14847–14892, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09890-0>.
- DONG, Xiaonan.; SONG, Gang.; LIU, Liming. **Microstructure Evolution and Forming Characteristics of Post-Weld Composite Treatment of 6061 Aluminum Alloy Tailor Welded Blanks**. Applied Sciences, v. 14, n. 19, p. 8998, out. 2024.
- GAO, Yi-Cheng. *et al.* **Research progress, application and development of high performance 6000 series aluminum alloys for new energy vehicles**. Journal of Materials Research and Technology, v. 32, p. 1868-1900, set. 2024.
- GARCIA, Amauri. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2001.
- MOREIRA, Aline Emanuelle Albuquerque *et al.* **Avaliação do teor de ferro na formação da macroestrutura e o consequente efeito sobre a condutividade elétrica do alumínio eletro-condutor**. Engevista, 2008
- PEIXOTO, Leandro César de Lorena.; **Microestruturas de solidificação e resistências mecânicas e a corrosão de ligas Pb-Sn diluídas**. Dissertação. 111p. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.
- PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Avaliação da modificação da liga base Al –Cu –Fe –Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde “U”**. 2016. Dissertação de Mestrado –PPGEM/UFPA. Belém. 2016.
- SANTOS, W. L. R. *et al.* **Análise do efeito da variação do teor de cu na trabalhabilidade da liga al-mg-cu**. Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.
- ZHANG, Liming; SCHNEIDER, Julius; LÜCK, Reinhard. **Phase transformations and phase stability of the AlCuFe alloys with low-Fe content**. Intermetallics. v. 13, p. 1195–1206, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.03.006>