

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO E MECÂNICO DA LIGA EUTÉTICA DE AL-1,5%NI TRATADA TERMICAMENTE

*Data de submissão: 22/02/2024*

*Data de aceite: 01/04/2024*

### **Luane Luiza Pereira Marques**

Universidade Federal do Pará. Belém - PA  
<http://lattes.cnpq.br/9438927804105514>

### **Deibson Silva da Costa**

Universidade Federal do Pará  
Ananindeua - PA  
<http://lattes.cnpq.br/1521124351431087>

### **Wellington Bruno Silva de Jesus**

Instituto Militar de Engenharia  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/7737719249484101>

### **Héricles Ruiliman Oliveira de Souza**

Universidade Federal do Pará. Belém - PA  
<http://lattes.cnpq.br/6917023290436260>

### **Emerson Rodrigues Prazeres**

Universidade Federal do Pará. Belém - PA  
<http://lattes.cnpq.br/8918189837419936>

### **Otávio Fernandes Lima da Rocha**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Pará. Belém - PA  
<http://lattes.cnpq.br/0702326922309672>

### **Maria Adrina Paixão de Souza da Silva**

Universidade Federal do Pará. Belém - PA  
<http://lattes.cnpq.br/6642036918358829>

**RESUMO:** Com o avanço da globalização, aumentou-se a procura por novas tecnologias e materiais que possam substituir os já existentes, isso impulsiona o meio científico, principalmente dentro do setor energético. Desta forma a produção de ligas de alumínio está ganhando bastante espaço nesse setor, pois suas propriedades são atraentes ao setor de energia. O objetivo deste trabalho foi produzir uma liga de Al-1,5%Ni, tratá-las termicamente, em seguida avaliar suas propriedades elétricas e de resistência a tração. A liga foi fundida pelo método de fundição convencional, em seguida usinada, solubilizada e envelhecida artificialmente a 350°C, laminada para produção dos fios com diâmetro de 3 mm, posteriormente, submetidos aos ensaios de condutividade elétrica e resistência mecânica. A análise dos dados obtidos mostrou que o tratamento térmico proporcionou um crescimento de apenas 1,07% em sua condutividade, diferentemente do LRT obtido no qual a liga teve um decréscimo de 28,94%, verificando que após o tratamento térmico o material possivelmente apresentará maior fragilidade. **PALAVRAS-CHAVE:** Ligas de alumínio. Tratamento térmico. Condutividade elétrica. Resistência à tração.

## ANALYSIS OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF THE EUTECTIC ALLOY AL-1.5%NI THERMALLY TREATED

**ABSTRACT:** With the advancement of globalization, there has been an increased demand for new technologies and materials that can replace existing ones, driving scientific advancements, particularly within the energy sector. In this context, the production of aluminum alloys is gaining significant traction in the energy sector due to their appealing properties. The objective of this study was to produce an Al-1.5%Ni alloy, subject it to heat treatment, and subsequently evaluate its electrical and tensile strength properties. The alloy was melted using the conventional casting method, then machined, solutionized, and artificially aged at 350 °C. It was further rolled to produce wires with a diameter of 3 mm, which were then subjected to tests for electrical conductivity and mechanical strength. The analysis of the obtained data revealed that the heat treatment resulted in a mere 1.07% increase in conductivity, contrasting with the Longitudinal Residual Tensile (LRT) obtained, where the alloy experienced a 28.94% decrease. This suggests that after heat treatment, the material may exhibit increased fragility.

**KEYWORDS:** Aluminum alloys. Heat treatment. Electrical conductivity. Tensile strength.

### INTRODUÇÃO

O grande avanço global impulsionou o procura por novas tecnologias, que sejam mais viáveis e menos onerosas ao setor industrial, ou seja, materiais capazes de substituir os já existentes, tendo menores custos produtivos e impactos ambientais. De acordo com a InterAcademy Council (2007), é necessário o desenvolvimento de tecnologias, que melhorem a transmissão desta energia para suprir tal demanda. Em função desta problemática os estudos das ligas de alumínio para fins de transmissão de energia elétrica, vem avançando exponencialmente, pois este metal possui propriedades bastantes satisfatórias a essa utilização.

As ligas metálicas são materiais que possuem propriedades metálicas, composto pela união de dois ou mais componentes, no qual o componente principal é um metal (SANTOS, 2006) podendo conter metais ou ametais como elementos de liga, essa solução sólida busca melhorar as propriedades do metal base da liga quando solicitado eletricamente.

O níquel é o elemento mais comumente utilizado em conjunto com o cobre para realçar as propriedades do material à altas temperaturas. Também é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica da liga (KAUFMAN e ROOY, 2004). O tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades (PRAZERES, 2014).

O objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades elétricas e o limite de resistência a tração (LRT) da liga de Al-1,5%Ni, após o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial a 350 °C por 4 horas.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O alumínio é um metal leve com densidade de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Seu ponto de fusão corresponde a  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sua ductilidade é elevada: alongamento de  $60 \%$  a  $70 \%$ ; e a sua resistência a corrosão é boa, devido à formação de óxido superficial  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que é muito estável (CHIAVERINI, 2003). Vale ressaltar que o alumínio (Al), tem a segunda maior condutividade elétrica dos metais não preciosos, perdendo apenas para o cobre que, entretanto, apresenta vários obstáculos para o seu uso em função do alto custo (MARQUES, 2008). Com isso pode-se afirmar também que o alumínio possui uma alta capacidade de ser submetido a deformações sem sofrer fissuras, além de endurecer gradativamente (FREITAS, 2010).

Assim, de acordo com Dantas (2014), o níquel é um dos poucos metais solúveis em alumínio, capaz de formar intermetálicos como  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ,  $\text{AlNi}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}_5$  e  $\text{AlNi}_3$ , que produzem efeitos pronunciados nas propriedades mecânicas, mesmo presente em pequenas quantidades. A adição de Ni, na presença de tratamento térmico de envelhecimento, faz com que a liga de alumínio tenha boa resistência mecânica sem uma perda considerável de suas propriedades elétricas, o que sugere que este material pode ter potencial uso na indústria (PRAZERES, 2016).

Então, o processo de fabricação por fundição é aquele em que se obtêm peças pela aplicação de temperaturas acima do ponto de fusão do metal ou da liga desejada, com subsequente solidificação e resfriamento em um molde (PARIS, 2008). O molde é comumente chamado de coquilha e é largamente utilizado na fabricação de peças como alumínio e suas ligas, pois é quase sempre fabricado em aço que tem ponto de fusão muito superior ao do alumínio (MASSARO, 2017). A solidificação de ligas é caracterizada por uma transformação de fase com mudança de estado, em que a fase líquida se transforma em uma fase sólida, através da nucleação e do crescimento de partículas da fase sólida no interior da fase líquida (SANTOS, 2006).

O alumínio e suas ligas podem ser tratados de modo a obter a combinação de propriedades mecânicas e físicas desejadas. Os tratamentos térmicos baseiam-se na variação das solubilidades dos elementos microestruturais (OLIVEIRA, 2012). O recozimento é um processo térmico aplicado a materiais para alterar suas propriedades físicas e mecânicas. Esse processo envolve o aquecimento do material a uma temperatura elevada e, em seguida, o resfriamento controlado (DE MORI e CESCNETI, 2018).

## METODOLOGIA

As ligas foram vazadas em cadinhos de SiC, Figura 1(a), que primeiramente foi aquecido no forno de marca GREFORTEC Figura 1(b), até 400 °C para eliminação da umidade que pode ter sido absorvida da atmosfera, em seguida retirado e pintado com caulim que é um material formado por silicatos hidratados de alumínio, sua utilização se dá devido a sua propriedade de cobertura quando utilizado como pigmento diluído em H<sub>2</sub>O, possuindo baixa condutividade térmica que o faz um excelente material para revestimento interno no cadinho.

De acordo com Prazeres (2014) após o pré-aquecimento, o cadinho foi aquecido no forno até a 900 °C, permanecendo por 30 minutos para formação dos vidrados que auxiliam na resistência e durabilidade do recipiente.



(a)



(b)

Figura 1 - Cadinho pintado com caulim; (b) Forno utilizado para produção das ligas.

O alumínio e níquel foram colocados dentro do cadinho retornando ao forno por mais uma hora e trinta minutos, após a constatação da fundição total dos elementos o cadinho e retirado do forno para a realização da homogeneização do material utilizando uma espátula de aço que anteriormente foi aquecida em uma estufa e pintada com caulim evitando a aderência do material durante a agitação vigorosa.

Posteriormente, foi injetado o argônio na vazão de 0,2L/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 mm<sup>3</sup> durante 1 minuto, para a remoção de gases e impurezas com baixa densidade, foi formado na superfície do banho uma camada de escória que o protege contra a reincidência de gases nocivos ao banho metálico, o gás e injetado duas ou mais vezes para garantia da remoção de boa parte das impurezas na solução.

Após, foi realizado o vazamento do banho metálico no molde em formato de U conforme mostra Figura 2, que foi anteriormente lixado, aquecido e pintado com solução de caulim juntamente com a espátula de aço. O vazamento foi realizado de maneira continua sendo feito o desmolde da peça após 24 horas tempo hábil para total solidificação. Em seguida foram feitos cortes para a retirada de uma seção para a metalografia e outra para usinagem.



Figura 2 – Molde utilizado no vazamento.

Os corpos de prova foram usinados no torno mecânico para diminuição do diâmetro de 22,5 mm (molde) para 18,5 mm, com intuito de facilitar o processo de laminação a frio realizado em uma laminadora semi-industrial, para produção dos fios com diâmetro de 3 mm. Desta maneira os fios obtidos foram cortados em tamanhos de 45 cm e 20 cm dentro dos parâmetros para os seguintes ensaios.

Após o processo de usinagem o tarugo da liga foi solubilizado, aquecido em estufa até a de 350 °C durante 4 horas, em seguida os corpos de prova foram resfriados, rapidamente em água, para eliminação de partículas de segunda fase devido a presença do Ni. Posteriormente, envelhecidos artificialmente a temperaturas 175 °C durante uma hora, em seguida foram resfriados lentamente dentro da estufa, retirados após 24 horas.

O ensaio foi realizado com o auxílio do Microhmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000, as resistências elétricas dos fios foram medidas 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), para o diâmetro estudado também foi utilizada a norma NBR 6814 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Os resultados sendo transformados em condutividade elétrica (IACS) “*International Annealed Cooper Standard*”, padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento, 1 mm<sup>2</sup> de seção transversal a 20 °C.

A caracterização mecânica foi realizada em uma máquina de ensaio de tração KRATOS, 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) e NBR ISO 6892 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), respeitando as distâncias entre garras, nesse ensaio foram usados dois corpos de prova com diâmetro de 3 mm e 20 cm de comprimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3, apresenta os resultados do ensaio de condutividade elétrica para as liga Al-1,5%Ni, sem tratamento térmico e tratada termicamente por envelhecimento artificial a 350 °C durante 4 horas para o diâmetro de 3 mm. Este ensaio foi realizado em três pontos ao longo do fio.

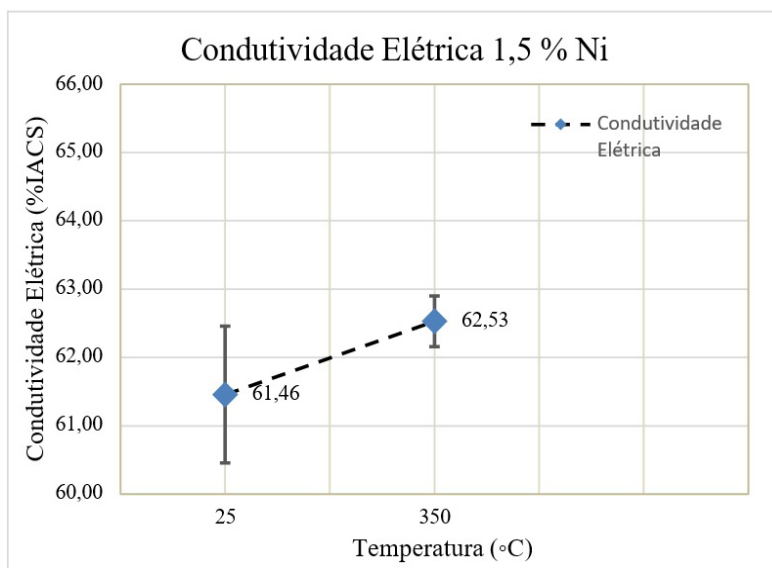


Figura 3 - Condutividade elétrica em função da temperatura da liga Al-1,5%Ni sem e com tratamento térmico

Os dados da Figura 3 mostra que a liga Al-1,5%Ni teve um aumento de 1,07% passando de 61,46% para 62,53% após ser tratada termicamente, ao ser comparada com os padrões estabelecidos pela Associação Brasileira do Alumínio (2014) que evidencia que a condutividade do alumínio puro é 62%, observa-se que os resultados obtidos estão dentro do critério estabelecido, não havendo perdas em sua condutividade quando comparado com o material puro.

Este fenômeno pode estar relacionado a maior concentração de soluto que aumentou o número de discordâncias no material, funcionando como barreiras e dificultando a propagação de corrente elétrica. O mecanismo de segregação que compreende a diferença de concentração da liga produzida foi influenciado na distribuição dos elementos na mesma, impactando diretamente nas propriedades físicas e químicas do produto, onde pode ocorrer heterogeneidades tanto de forma macroscópica como microscópica e pontual. Neste caso, nota-se diferenças em suas características elétricas (FERREIRA, 2004; GOMES, 2012).

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de tração que foi realizado nos fios das ligas Al-1,5%Ni sem e com tratamento térmico na temperatura 350°C, com o objetivo de analisar o LRT (Limite de Resistência a Tração) dos fios, realizando a comparação dos resultados.

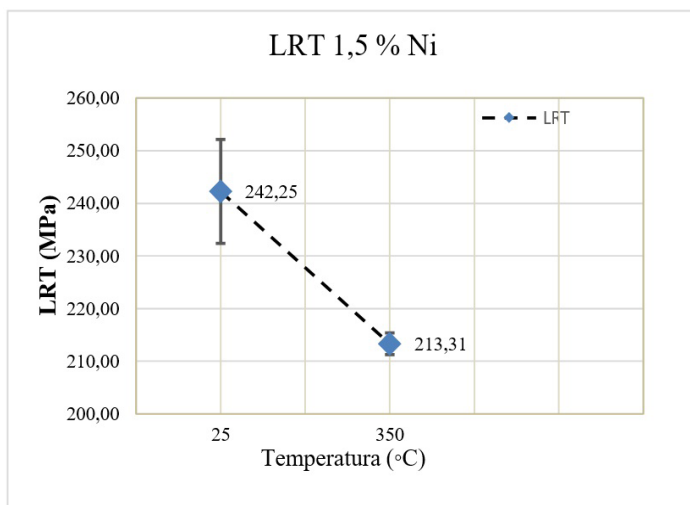


Figura 4 - LRT em função da temperatura da liga Al-1,5%Ni sem e com tratamento térmico

A análise gráfica demonstra que diferentemente da condutividade houve uma diminuição no LRT da liga Al-1,5%pNi após o tratamento térmico de 242,25(MPa) para 213,31(Mpa) respectivamente, com uma diminuição de 28,94%. Segundo Santos (2006), a densidade das discordâncias, concentradas nos contornos dos grãos deformados influencia diretamente na resistência mecânica e na dureza, ao contrário dos defeitos pontuais.

De acordo com Prazeres (2014), a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. Pois após ser tratada termicamente e notável a diminuição no seu LRT e na ductilidade do material, tornando possivelmente mais frágil.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos no ensaio de condutividade indicam que o tratamento térmico foi eficaz em realçar as propriedades elétricas do material, pois foi observado um pequeno ganho em suas características, melhorando assim sua capacidade de condução de corrente elétrica. Diferentemente, dos resultados obtidos no ensaio de tração, o limite de resistência à tração foi inferior após o tratamento térmico, apresentando uma drástica diminuição, o que sugere um aumento na fragilidade do material.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA (LABEM-UFPA), assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5118: **Fios De Alumínio 1350 Nus, De Seção Circular, Para Fins Elétricos**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6810: **Fios E Cabos Elétricos – Tração À Ruptura Em Componentes Metálicos**, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6814: **Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica**, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892-1: **Materiais metálicos - Ensaio de Tração Parte 1: Métodos de ensaio à temperatura ambiente**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: Extrusão**. Ed. Cinco, n. 1, São Paulo, 2014.

CHIAVERINI, Vincente. **Tratamento Térmicos das Ligas Metálicas**. São Paulo: ABM, 2003, p. 243.

COUNCIL, InterAcademy. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, p. 301, São Paulo, 2007.

DANTAS, P. P. **Caracterização de ligas hipereutéticas da Al-Ni solidificadas unidirecionalmente**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia), Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2014.

DE MORI, G. N.; CESCNETI, Lorena Bertranda. Análise das propriedades metalográficas do aço SAE 1045 nos processos térmicos de normalização, revenimento e têmpera. **Revista Esfera Acadêmica Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 29-38, 2018.

FERREIRA, Ivaldo Leão. **Análises numérica, analítica e experimental da macrossegregação inversa na solidificação**. 2004. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2004.



FREITAS, E. S. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e zircônio**. 2010. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

GOMES, Laercio Gouvea. **Microestrutura dendrítica, macrossegregação e microporosidade na solidificação de ligas ternárias Al-Si-Cu**. 2012. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2012.

KAUFMAN, J. Gilbert; ROOY, Elwin L. The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminum Castings. **Aluminum alloy castings: properties, processes and applications**. Materials Park. ASM International, p. 47-54, 2004.

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, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

MASSARO. A. G. **Comparação das características de desempenho de um rotor fechado de fluxo radial, aplicado em bomba centrífuga, produzido via fundição convencional e fundição de precisão (investment casting)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

OLIVEIRA, Guilherme Ruivo Gordalina de. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**. 2012. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2012.

PARIS, Aleir Antonio Fontana. **Tecnologia da Fundição**. Santa Maria - RS: Independente, 2008. 185 f.

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.

PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Estudo do tratamento térmico e da modificação da liga al0,05%pcu-[0,24- 0,28]%pfe-0,6%pmg com a adição de 0,03%**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2014.

SANTOS, Rezende Gomes. **Transformação de fases em materiais metálicos**. Campinas: Editora da Unicamp, p. 399-408, 2006.