



**AVALIAÇÃO DA MACROESTRUTURA DA LIGA Al-1,5%Ni COM AS
PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS APÓS TRATAMENTO
TÉRMICO DE RECOZIMENTO A 280 °C POR 1H**

**Meireles, L. S¹.; Barbosa, A. R. Z¹.; Marques, L. C. P².; Prazeres, E. R.;
Medeiros², A. L.; Silva², M. A.; Costa, D. S¹.;**

¹ Faculdade de Engenharia de Materiais - Femat, Universidade Federal do Pará – UFPA, Tv. We Vinte e Seis, 02, Cidade nova IV, Ananindeua – PA, 67133-000;

² Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará-UFPA, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, Belém – PA, 66075-110; 3. Faculdade de Engenharia de Materiais- Femat, Universidade Federal do Pará – UFPA;

lailsonmeireles111@gmail.com; aliciareginazanon@gmail.com;
luanemarques18.lm@gmail.com; eng.emersonrodrigues@gmail.com;
amandalucena@ufpa.br; deibson@ufpa.br;*

RESUMO

Em decorrência do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional alcançado 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. Perante a isso, foi realizado este estudo visando avaliar a correlação das macroestruturas nas propriedades elétricas e mecânicas da liga de Al - 1,5%Ni, tratada termicamente por recozimento a 280 °C durante o tempo de 1 hora, avaliando os efeitos do tratamento térmico de recozimento sob estas propriedades, correlacionando os resultados obtidos com a literatura e avaliar se são viáveis para aplicação em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Através das análises dos resultados obtidos, pode-se concluir que a liga não é indicada para utilização na produção de cabos de transmissão de energia elétrica.

Palavras-chave: Macroestrutura, Fundição, Caracterização, Liga.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, a emissão dos gases geradores dos efeitos estufa, amplitudes das temperaturas regionais, radiação solar, intensidade dos ventos, densidade do ar e intensidade das chuvas são variáveis que podem afetar diretamente a ampacidade dos cabos condutores das linhas, diminuindo sua eficácia ao longo da rede (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Diante desse cenário, uma das alternativas para melhorar a eficiência da transmissão de energia elétrica é através da pesquisa de novas ligas capazes de propagar a corrente elétrica por longas distâncias e possam resistir as intemperes. Desta maneira, o alumínio (Al), por sua elevada condutibilidade elétrica e leveza, reúne as características ideais para uma aplicação confiável na transmissão de energia, com uma das menores taxas de desperdício de eletricidade ao longo das redes de transmissão (ABAL, 2023).

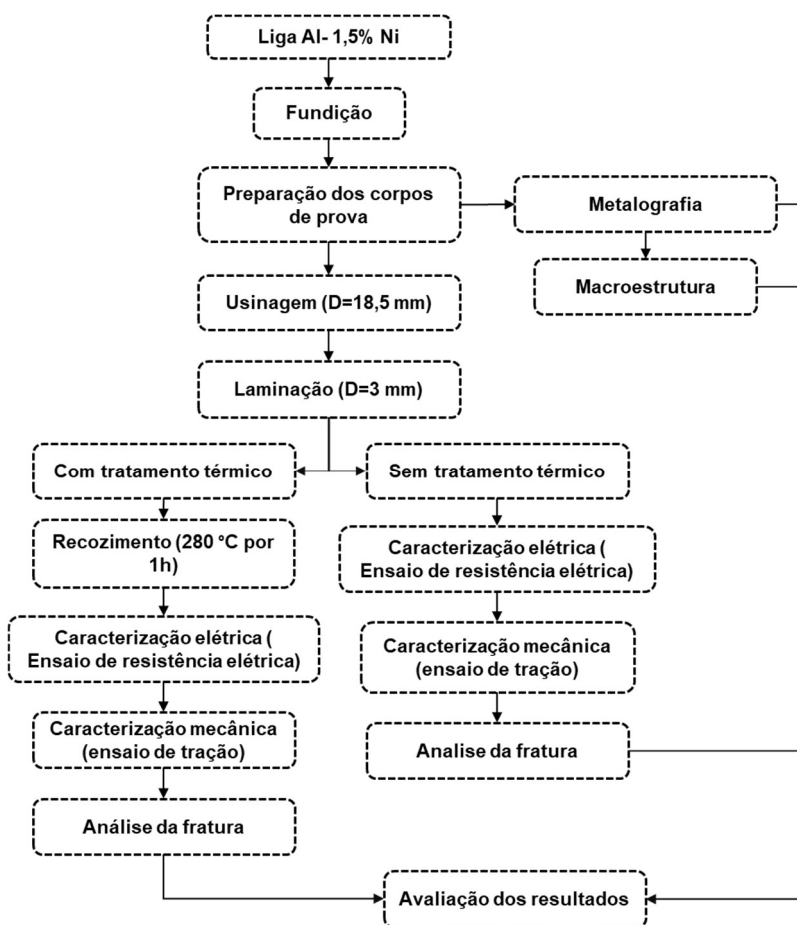
No entanto, como o Al comercialmente puro não possui uma resistência mecânica elevada, para isso são adicionados alguns elementos químicos na sua matriz, com o objetivo de elevar os valores de suas propriedades mecânicas e elétricas (PRAZERES, 2016). O alumínio e suas ligas podem ser tratados de modo a obter a combinação de propriedades mecânicas e físicas desejadas. 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, visando alterar as suas propriedades (PRAZERES, 2014).

Com base nesse cenário, o Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais (GPEMAT) produz e estuda novas ligas de alumínio, para aplicação na transmissão e distribuição de energia elétrica. Desta maneira, o presente trabalho busca desenvolver e estudar a influência da macroestrutura, comportamento elétrico e mecânico da liga Al – 1,5% Ni tratada termicamente a 280 °C durante 1h, avaliando os efeitos do tratamento térmico de recozimento sob estas propriedades, correlacionando os resultados obtidos com a literatura e analisar se são viáveis para aplicação em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção da liga Al-1,5%Ni, foi utilizado método de fundição convencional partindo do alumínio com pureza de 99,8% adicionando a porcentagem desejada de níquel. Os equipamentos utilizados neste trabalho para caracterização desta liga estão descritos abaixo no fluxograma da Figura 1.

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



Fonte: Autores, 2024.

Fundição e solidificação

A liga foi vazada em um cadinho de SiC, que primeiramente foi aquecido no forno de marca GREFORTEC, até uma temperatura de 400 °C para eliminação da umidade, em seguida, retirado e pintado com caulim, sua utilização se deu devido a sua propriedade de cobertura quando utilizado como pigmento diluído em H₂O, possuindo baixa condutividade térmica que gerou um excelente material para revestimento interno no cadinho.

Após o pré-aquecimento, o cadinho foi aquecido no forno até a temperatura chegar a 900 °C, permanecendo por 30 minutos para formação dos vidrados que auxiliam na resistência e durabilidade do recipiente.

Em seguida, foram adicionados o alumínio e níquel retornando o cadinho permanecendo no forno por mais uma hora e trinta minutos, cujo seja suficiente para a difusão dos elementos, após a constatação da fundição total dos elementos o cadinho e retirado do forno para a realização da homogeneização, como observado na Figura 2 (A). Posteriormente, como pode ser visto na Figura 2 (B), em consonância com a metodologia utilizada por Prazeres (2014), foi injetado o 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, para a remoção de gases e impurezas com baixa densidade.

Figura 2. (A) Retirada do cadinho do forno para homogeneização do material; (B) Injeção do gás argônio.



(A)



(B)

Fonte: Autores, 2024.

O desmolde da peça foi realizado após 24 horas, tempo necessário para total solidificação. Em seguida foi realizado um corte para a retirada de uma amostra para a metalografia e outra para usinagem.

Metalografia

Após a desmoldagem do material, retirou-se uma seção da liga para realização da metalografia. Foram utilizadas as lixas desbastadoras de granulometria: 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 μ ; 0,5 μ e 0,3 μ para retirar os riscos das lixas e melhorar o acabamento nas peças.

Macroestrutura

Posteriormente à metalografia, foi realizado o ataque químico na peça para revelação das macroestruturas da liga. Foi realizado o ataque químico com reagente Keller pelo método de imersão durante 10 segundos. Em seguida, foi verificada a olho nu e com uma ampliação de no máximo 10 vezes no microscópio óptico LEICA® modelo DM750-MC120HD.

Para a produção dos fios, após a peça ser desmoldada e seccionada, foram realizados o processo de usinagem no torno, para diminuição do diâmetro de 22, 5 mm para 18, 5 mm, com o objetivo de facilitar o processo de laminação a frio. Em seguida, estas foram conformadas em laminadoras semi industrial de marca MENAC elétricos duo reversíveis. Desta maneira, as peças foram conformadas através dos canais até o diâmetro de 3,0 mm.

Tratamento térmico

Os fios produzidos no processo de laminação foram cortados no tamanho de 600 mm, em seguida, um deles foi tratado termicamente em estufa de marca NEVONI. Desenvolveu-se o tratamento térmico de recozimento na liga, na temperatura de 280°C por 1h, essa foi especificada pela norma ASTM B941, utilizada como padrão normativo para ensaios de tração em fios de liga Al-Zr para aplicações elétricas.

ASTM B941 – 10: Especifica critérios para enquadrar fios da liga Al-Zr como termorresistentes em aplicações elétricas. O condutor elétrico não deve apresentar perda superior a 10% de seu limite de resistência à tração (LRT) quando submetido à temperatura de 280 °C por 1h e resfriado à temperatura ambiente.

Caracterização elétrica

Posteriormente ao processo de laminação e tratamento térmico, foi realizado o ensaio de condutividade elétrica Figura 3, com o auxílio do microhmímetro MEGABRÁS (ponte de Kelvin), modelo MPK-2000. A análise consiste em calcular a resistência elétrica do fio, realizou-se a medida 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.

Figura 3. Microhmímetro usado no ensaio.



Fonte: Autores, 2024.

Após a obtenção dos resultados a partir da leitura das resistências dos corpos de provas para o diâmetro de 3 mm, utilizar a equação fornecida pela norma NBR 6814 mostrada na Equação 1.

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

onde:

t = temperatura na qual foi efetuada a medição, °C;

R_t = resistência a T °C, em Ω;

R₂₀ = resistência corrigida a 20 °C, em Ω;

α = coeficiente de variação da resistência com a temperatura 20 °C, especificado pela norma para liga de alumínio.

Com a resistência corrigida para 20 °C pode-se obter a resistividade fornecida através da Equação 2, conforme a norma NBR 6815.

$$R_v = \rho_c \cdot A \quad (2)$$

onde:

R_v = resistência elétrica do corpo de prova por unidade de comprimento a 20 °C, em Ω/m;

ρ_c = resistividade volumétrica do corpo de prova a 20 °C, em Ω.mm²/m;

A = área da secção transversal do corpo de prova, em mm².

Os resultados obtidos foram, em seguida, transformados em condutividade elétrica (IACS), como observado na equação 3, "International Annealed Cooper

Standard”, padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento, 1 mm² de seção transversal a 20 °C, através da fórmula:

$$\varphi = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Al}} \quad (3)$$

onde:

φ = a condutividade elétrica do fio em IACS;

ρ_{Cu} = a resistividade elétrica do cobre em $\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

ρ_{Al} = a resistividade elétrica do alumínio em $\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$.

Caracterização mecânica (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 mostrada na Figura 4 (A), acoplada a um microcomputador para o armazenamento de dados, os corpos de prova foram adaptados para esse ensaio consoante a norma NBR 6810 e NBR ISO 6892, respeitando as distâncias entre garras Figura 4 (B).

Figura 4. (A) Máquina de tração usada no ensaio mecânico; (B) ensaio de tração realizado em fio.



(A)



(B)

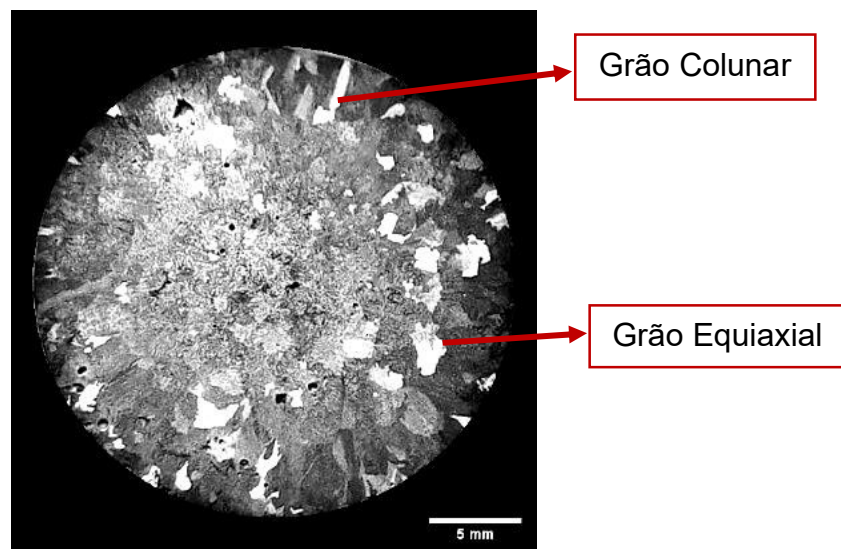
Fonte: Autores, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Macroestrutura

Na morfologia apresentada na Figura 5 da liga Al- 1,5%Ni, observa-se que a maioria dos grãos são equiaxiais, com direções aleatórias e presente em toda extensão da amostra, a intensa nucleação dessa fase pode ter ocorrido devido à porcentagem de níquel que impediu a formação da zona colunar e provavelmente agiu como controlador de nucleação dentro do processo de solidificação.

Figura 5. Macroestrutura da liga Al – 1,5%Ni



Fonte: Autores, 2024.

De acordo com Garcia (2001), o bloqueio do crescimento da zona colunar ocorre quando o líquido torna-se super-resfriado, tanto por efeito térmico quanto constitucional, fazendo com que os embriões do sólido, ao surgirem, cresçam de forma aleatória. Desta maneira, para essa liga, provavelmente a quantidade de soluto pode ter elevado a taxa de resfriamento, impedindo o crescimento da zona colunar, tornando os grãos menores. De acordo com Oliveira (2012), um tamanho de grão mais fino promove uma sanidade melhorada do fundido, pois minimiza a contração, a fratura a quente e a porosidade causada pelo hidrogênio. Assim, as propriedades mecânicas e desempenho a altas temperaturas são normalmente melhorados com estruturas de grão mais fino.

Em função do teor de níquel, observa-se que aumenta a presença de grãos equiaxiais, desta forma têm-se mais contornos de grão e consequentemente mais

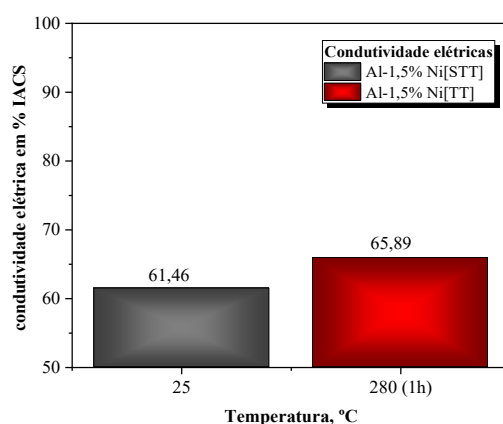
barreiras na estrutura desta liga, implicando diretamente na propagação de corrente elétrica ao longo de sua estrutura e elevando sua resistência.

Como o citado pelo autor Totten (2003), o endurecimento ocorre através da formação de barreiras que dificultam o movimento das deslocções. Os elementos de liga querem como soluto, quer sob a forma de fases precipitadas (muitas vezes intermetálicos), são os responsáveis pelas barreiras formadas na matriz de alumínio, e por consequência do aumento de dureza e resistência.

Condutividade elétrica

Após o processo de conformação plástica e tratamento térmico, a liga estudada foi submetida à análise de resistividade elétrica. Para os dados alcançados da condutividade elétrica da liga Al- 1,5%Ni, são mostrados na Figura 6, onde o valor máximo para condutividade é de 65,89% em IACS, após o tratamento térmico de 280 °C por 1 hora.

Figura 6: Condutividade da liga Al – 1,5% Ni



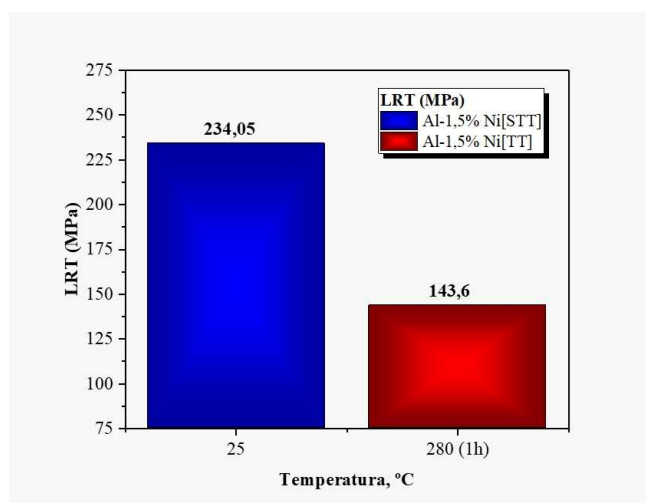
Fonte: Autores, 2024.

O menor valor obtido para essa liga Al- 1,5%Ni foi de 61,46% para temperatura de 25 °C, verificando-se que não houve perda de condutividade elétrica, quando comparado com o Al-EC que possui resistividade elétrica de 61% IACS. Após comparar o resultado mínimo e máximo, observa-se um crescimento de 4,43% na condutividade elétrica. Segundo Kamizono (2014), a aplicação de temperatura no material pode recuperá-lo, eliminando a concentração de discordâncias e melhora a condutividade elétrica.

LRT (Limite de resistência a tração)

Na Figura 7, verifica-se que o maior valor obtido para a liga Al- 1,5% Ni foi de 234,05 MPa, à 25 °C, onde se observa um decrescimento em função do aumento de temperatura, pois o valor obtido foi de 143,60 MPa, após o tratamento de 280 °C por 1 hora, aproximadamente 61,35% menor que a liga sem tratamento térmico.

Figura 7. Limite de resistência a tração da liga Al – 1,5% Ni tratada termicamente



Fonte: Autores, 2024.

Kamizono (2014), sugere que o tratamento térmico causa um aumento na concentração de Ni nas partículas de segunda fase, e isto reflete na diminuição das perdas de propriedades mecânicas após os testes de termorresistividade. Isso explica o motivo da diminuição do LRT da liga, com a queda do limite de resistência a tração.

CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas e com a sustentação da literatura, observa-se que a liga com 1,5% Ni demonstrou uma macroestrutura predominante equiaxial. Desta maneira, conclui-se que o teor do níquel provocou um refinamento de grãos, ocasionando mais barreiras na estrutura da liga, aumentando consequentemente a sua resistência à condutividade elétrica. O tratamento térmico na liga Al-1,5% Ni não foi eficaz, pois se observou uma diminuição considerável no LRT, mas, em contrapartida, foi obtido um aumento de 4,43% na condutividade elétrica. Pode-se

concluir que a liga não é indicada para utilização na produção de cabos de transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- (1). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO
<<http://www.abal.org.br//aluminio/temperas.asp>> Disponível em: Acesso em: 10 jan.2023
- (2). EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas) tabela Mercado Mensal 2004 2018: consumo mensal de energia elétrica por classe, Brasil e regiões.** Disponível em: [http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/consumo de energia eletrica](http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica). Acesso em: 05 jan. 2023.
- (3). GARCIA, A. Solidificação: **Fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2001.
- (4). 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**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- (5). KAMIZONO, K. A.; **Caracterização elétrica e mecânica da liga Al-Cu-Fe-Si modificada com diferentes teores de Ni para aplicação na fabricação de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica**. 2014. Dissertação de mestrado –Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2014.
- (6). PRAZERES, E. R. **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.
- (7). PRAZERES, E. R. **Estudo do tratamento térmico e da modificação da liga al-0,05%pcu-[0,24-0,28]%pfe-0,6%pmg com a adição de 0,03%pn**. 2014. TCC – FEM/UFPA. Belém. 2014.
- (8). TOTTEN, G.E. AND MACKENZIE, D.S., Eds. **Handbook of Aluminium: Vol. I: Physical Metallurgy and Processes**. CRC Press, New York, 481-532. 2003.

EVALUATION OF THE MACROSTRUCTURE OF THE Al-1.5%Ni alloy WITH THE ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AFTER ANNEALING HEAT TREATMENT AT 280 °C FOR 1H

Abstract

As a result of the economic development and population growth achieved in recent years, there is a need to improve the country's energy efficiency. Given this scenario, it is desirable to look for alternatives to reduce the scrapping of transmission lines. In view of the above, this study was carried out in order to evaluate the correlation of macrostructures in the electrical and mechanical properties of the Al-1.5%Ni alloy, heat-treated by annealing at 280 °C and with a time interval of 1 hour, evaluating the effects of annealing heat treatment on these properties, correlating the results obtained with the literature and evaluating whether they are feasible for application in electric power transmission and distribution networks. Through the analysis of the results obtained, it can be concluded that the alloy is not suitable for use in the production of electric power transmission cables.

Keywords: Macrostructure, Casting, Characterization, Alloy.