

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DA LIGA BINÁRIA HIPOEUTÉTICA Al – 1%Ni PARA FINS DE TX E DX DE ENERGIA ELÉTRICA

Yan Christian Silva de Araújo, ycsaraujo@gmail.com¹
Eric Elian Lima Espindola, eric.espindola@itec.ufpa.br²
Luane Luiza Pereira Marques, luanemarques18.lm@gmail.com¹
Wellington Bruno Silva de Jesus, wellingtonjesus.eng@gmail.com²
Emerson Rodrigues Prazeres, emerson.prazeres@itec.ufpa.br²
Amanda Lucena de Medeiros, amanda.lucena@ufpa.com.br²
Deibson Silva da Costa, deibsonsc@yahoo.com.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, Cidade Nova 4, Tv. We Vinte e Seis, 02 - Coqueiro, Ananindeua - PA, 67130-660.

²Universidade Federal do Pará, R. Augusto Corrêa, 01-Guamá, Belém-PA, 66067-110.

Resumo: Em face do crescente índice de consumo de energia elétrica, tornou-se pertinente a necessidade de se buscar melhorias na transmissão e distribuição de energia elétrica. Por conseguinte, o presente trabalho tem como objetivo analisar as propriedades elétricas e mecânicas da liga Al-1 %Ni, buscando o uso desta liga em cabos de transmissão e distribuição de energia elétrica. O estudo foi realizado tendo como base o alumínio de pureza comercial com adição de 1% de níquel que posteriormente foi solidificada em molde coquilha metálica “U”. Após a solidificação, uma amostra do material foi retirada para a metalografia, enquanto o material restante foi submetido a um processo de usinagem para o diâmetro de 18,5 mm. Com o material usinado, realizou-se o processo de laminação a frio para os seguintes diâmetros: (4,0; 3,8; 3,0; 2,7) mm. A liga foi caracterizada mecanicamente através dos ensaios de tração e de microdureza, eletricamente através do ensaio de resistência elétrica e estruturalmente através da análise das macro estruturas. Nos fios obtidos após a laminação o ensaio de resistência elétrica foi realizado em amostras com comprimento útil de 40 cm e no ensaio de tração foram utilizadas amostras com comprimento útil de 15 cm. Ao finalizar os ensaios, a amostra que obteve os melhores resultados na razão - Resistência mecânica x Resistência elétrica - foi a amostra de 3 mm. Com o resultado do ensaio de resistência elétrica, notou-se que a adição do níquel não influenciou de maneira considerável a passagem da corrente elétrica pelo fio quando comparado ao alumínio puro. Na análise da macro estrutura foi constatado a presença de tanto de grãos colunares quanto de grãos equiaxiais. Tendo como base a análise dos ensaios, os resultados foram satisfatórios com o teor de níquel adicionado, evidenciando a viabilidade da sua utilização em cabos elétricos.

Palavras-chave: Energia elétrica, Resistência mecânica, Condutividade elétrica, Liga Al-1%Ni.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal de grande importância na indústria atual, sendo o metal não-ferroso com maior produção, e o segundo metal mais produzido no mundo, perdendo somente para o ferro (Abal, 2007). De acordo com (ASM, 2010), sua leveza, alta ductilidade, excelente capacidade na propagação de corrente elétrica, alta resistência a corrosão e abundância na crosta terrestres, impulsionam sua utilização nesse setor.

Porém, suas principais limitações referem-se à resistência mecânica, uma vez que seu módulo de elasticidade é relativamente baixo em comparação aos materiais estruturais, como o aço e o cobre; mas suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas com a adição de elementos de liga (Dantas, 2014). O níquel é o elemento mais comumente utilizado em conjunto com o cobre para realçar as propriedades do material a altas temperaturas, o mesmo também é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica da liga (Kaufman; Rooy, 2004). Logo, esta é a justificativa para a adição outros elementos, de forma controlada, visando aprimorar certas propriedades das ligas de alumínio.

O alumínio pode formar ligas com diversos metais, dentre eles o níquel, elemento pouco solúvel no alumínio, capaz de formar intermetálicos como Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi$, Al_3Ni_5 e $AlNi_3$, que produzem efeitos pronunciados nas propriedades mecânicas, mesmo presente em pequenas quantidades (Dantas, 2014). Os intermetálicos formados nas ligas binárias de alumínio e níquel, estão relacionados diretamente com o desempenho de suas propriedades mecânicas.

A solidificação de metais e ligas é caracterizada por uma transformação de fase com mudança de estado, em que a fase líquida se transforma em uma fase sólida, quando as condições termodinâmicas são tais que o sólido apresenta menor energia livre, devido a liberação de calor latente, tornando-se mais estável; dá-se através da nucleação e do crescimento de partículas da fase sólida no interior da fase líquida (Santos, 2006). É na fundição dos metais que a solidificação encontra seu mais vasto campo de aplicação. O objetivo fundamental é dar forma adequada ao metal, vertendo-o em estado líquido dentro da cavidade de um molde com a forma desejada (Dantas, 2014).

O foco deste trabalho é fundir alumínio de pureza comercial (99,99 %), com 1 % de níquel, aplicar os processos metalográficos e posteriormente realizar ensaios mecânicos de microdureza e tração. Para as propriedades elétricas, utilizou-se o ensaio de resistência elétrica visando avaliar a condutividade para efetuar a razão entre propriedades elétricas e mecânicas desempenhadas pelo material quando solicitado, para uma possível utilização em cabos de transmissão e distribuição de energia elétrica.

2. METODOLOGIA

2.1. Fabricação da Liga

O primeiro processo para a fabricação da liga analisada neste trabalho, foi o cálculo estequiométrico para determinar a quantidade em peso de 1 % Ni dentro da quantidade utilizada de alumínio. Posteriormente o material foi posto para a fundição, os componentes da liga foram colocados dentro de um cadinho e levados ao forno à uma temperatura de 900 °C, da marca GREFORTEC, Fig. 1 a), para serem fundidos, a partir do momento que todo material estiver homogeneizado a liga é então vazada em moldes de coquilha no formato “U”, Fig. 1 b). A liga então solidifica, e retira-se a amostra para os procedimentos seguintes.

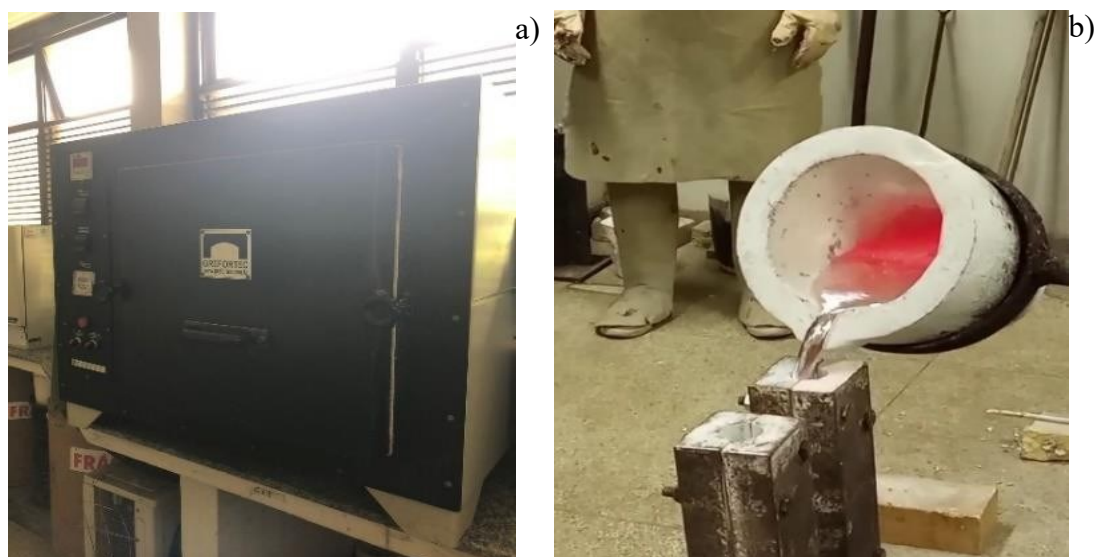


Figura 1. a) Forno GREFORTEC; b) Vazamento no molde em “U” Fonte: Autor, 2022.

2.2. Metalografia

Uma parte da amostra do molde em “U” foi retirada para sofrer os processos de metalográficos, visando as análises de sua macrografia e dureza da peça. A superfície foi preparada por meio do lixamento, de modo a deixá-la mais plana e regular possível para o ensaio, utilizando lixas de granulometria crescente, neste caso, da lixa 80 à 1500 mesh. Após o lixamento, foi realizado o polimento com alumina líquida. A etapa seguinte é utilizada especificamente para a macrografia, no qual consiste no ataque químico por imersão de Keller para revelar a macroestrutura da peça.

2.3. Macrografia

O ensaio de macrografia consiste na verificação visual com uma ampliação de, no máximo 10 vezes, de uma superfície plana, tal processo é aplicado para verificar o processo de fabricação ao qual o produto siderúrgico foi submetido. Neste caso, foi usado este ensaio para verificar as condições das macroestruturas formadas no momento da solidificação do metal fundido.

2.4. Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado baseando-se na norma ASTM E384, na Fig. 2 pode-se observar o equipamento utilizado, o microdurômetro modelo HV- 1000B, com tempo de indentação de 13 s concomitante com uma aplicação de carga de 100 gf. Para avaliação da microdureza foram feitas 10 marcações na peça, sendo quatro na vertical, quatro na horizontal e duas na região central da peça, buscando uma avaliação ampla de todas as regiões da amostra.



Figura 2. Microdurômetro modelo HV-1000B. Fonte: Autor, 2022.

2.5. Fabricação dos Fios

O material restante do molde “U” foi utilizado para a fabricação de fios, essas amostras foram usinadas e tiveram seu diâmetro reduzido de 22,0 mm para 18,5 mm. A usinagem se faz necessária para melhorar o acabamento superficial das amostras, evitando o surgimento de defeitos na laminação. As amostras foram deformadas por laminação a frio utilizando-se dois laminadores elétricos duo reversível, da marca MENAC, apresentados na Fig. 3. Esses laminadores possuem diferentes secções circulares em seus cilindros de laminação, sendo que neste trabalho os diâmetros utilizados foram [2,7; 3,0; 3,8; 4,0] mm.



Figura 3. Laminadores MENAC. Fonte: Autor, 2022.

2.6. Condutividade

As amostras laminadas foram testadas eletricamente em um microohmmetro MegaBras 2000-e, exibido pela Fig. 4, através do método de ponte de Kelvin. O ensaio foi executado em concordância com os procedimentos descritos pelos padrões normativos disponíveis na literatura (NBR 6814, NBR 5118, ASTM B193). Os resultados obtidos foram em seguida transformados em condutividade elétrica (IACS), “International Annealed Cooper Standard”.



Figura 4. Microohmmetro MegaBras 2000-e. Fonte: Autor, 2022.

2.7. Tração

Após o teste de condutividade, o material laminado foi utilizado também no ensaio de tração, no qual, as amostras tiveram suas resistências mecânicas avaliadas. O ensaio foi feito por meio da máquina de ensaio universal KRATOS, modelo IKCL1 – USB, Fig. 5, acoplada a um computador com sistema de aquisição de dados, pertencente ao laboratório de ensaios mecânicos do grupo GPEMAT. Os testes de tração foram realizados segundo a norma para cabos elétricos NBR 6810, executados em amostras com 15 cm de comprimento útil.



Figura 5. KRATOS, modelo IKCL 1. Fonte: Autor, 2022.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Macroestrutura

Na Figura 6, observa-se que no percentual de 1 % de Níquel, a macroestrutura da peça evidencia uma presença considerável de grãos equiaxiais, grãos esses que são típicos de estruturas mais refinadas. Segundo (Prazeres, 2016), a liga de Al-0,03 %Ni possui grãos predominantemente colunares, sendo assim, fazendo uma associação simples, pode-se afirmar que a presença do Níquel aumenta a quantidade de grãos equiaxiais, na peça.

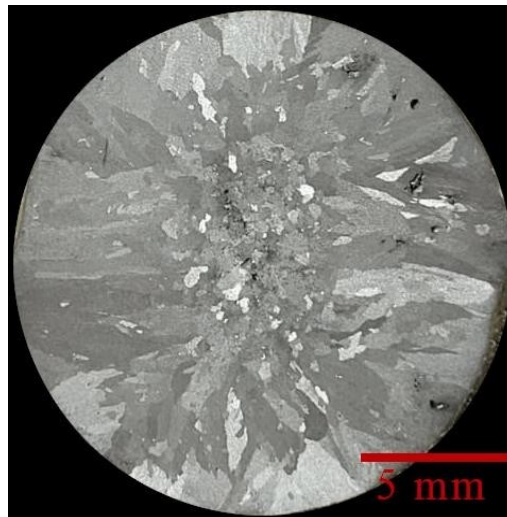


Figura 6. Amostra metalografada da liga Al-1%Ni. Fonte: Autor, 2022.

É possível que a presença de Al_3Ni tenha influência direta na presença de grãos equiaxiais, pois com o aumento do teor de Níquel para 1 %, em seu diagrama de fases, na Fig. 7, nota-se que no momento de sua solidificação ocorre a formação de $\text{Al} + \text{Al}_3\text{Ni}$, sendo uma fase predominante da estrutura junto com a matriz de alumínio.

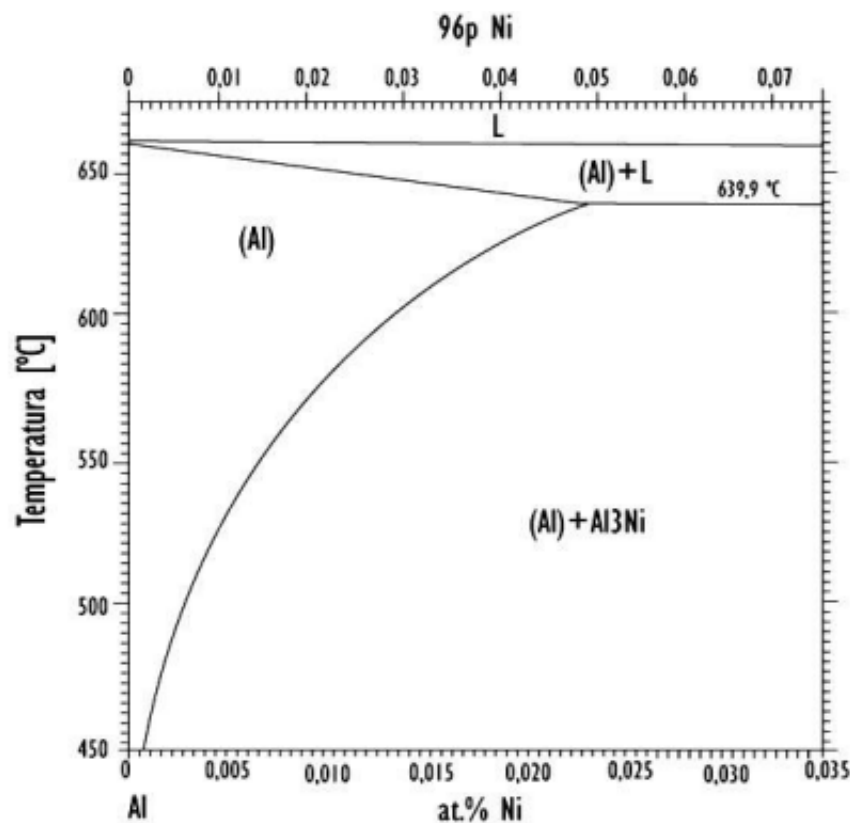


Figura 7. Diagrama binário do sistema Al-Ni. Fonte: Adaptado de Batalu, 2006.

Outro fator impactante é o calor latente, visto que, com a retirada do mesmo por condução da parte sólida o efeito do crescimento preferencial decresce, fazendo com que os embriões do sólido se desenvolvam, crescendo de forma aleatória, bloqueando a zona colunar, e assim, formando os grãos equiaxiais.

3.2. Microdureza

Os resultados do ensaio de microdureza em 10 pontos da amostra da liga Al-1%Ni, está apresentado na Tab 1.

Tabela 1. **Relação das microdurezas da liga Al-1%Ni, com os perímetros estudados.**

Perímetro	Microdureza (HV)
P1	32,4
P2	29,4
P3	30,5
P4	32,9
P5	32,6
P6	30,6
P7	32,9
P8	32,6
P9	31,8
P10	31,3
MÉDIA	31,7
DESVIO PADRÃO	0,1

Fonte. **Autor, 2022.**

Souza (2013) afirma que na adição de níquel em até 2%, resulta em um aumento da resistência da liga, contudo, reduz sua ductilidade. E de fato, os dados da tabela indicam que houve um acréscimo na dureza da liga, quando comparado com o alumínio de pureza comercial que segundo (Oliveira, 2009), possui dureza de aproximadamente 20 HV.

Observa-se que dentro da estrutura, a dureza não apresenta grandes variações, logo, o teor de níquel adicionado possui uma boa capacidade de homogeneização com a matriz do alumínio. Estes resultados são coerentes com a literatura que indica que a presença do níquel, aumenta a resistência mecânica como um todo, como (Canté, 2009) disserta, inexistindo a presença de zonas preferenciais ou mais resistentes, visto que, toda estrutura está revestida com uma matriz dendrítica dada a sua solidificação ocasionada pela troca de calor gerada de forma radial pelo molde coquilha metálica “U”.

3.3. Tensão e Condutividade Elétrica

Podem-se observar os resultados dos ensaios de condutividade e de resistência a tração, na Tab. 2.

Tabela 2 – **Ensaio de condutividade elétrica e limite de resistência a tração.**

Diâmetro (mm)	Condutividade Elétrica (%IACS)	LRT (MPa)
2,7	57,17	171,81
3,0	62,95	244,16
3,8	54,63	205,96
4,0	57,60	212,53

Fonte. **Autor, 2022.**

A Tabela 2, evidencia que o fio de 3 mm possui o melhor desempenho no ensaio de tração e no ensaio de condutividade, esta relação permite que o mesmo seja utilizado na produção de cabos de transmissão e distribuição de

energia, pois o acréscimo de 1 % de Níquel, não alterou de maneira significativa a condutividade padrão do alumínio puro que fica em torno de 62 % da condutividade do cobre em IACS.

Por meio dos dados da tabela, elaboraram-se, dois gráficos onde se observa com maior nitidez os resultados dos ensaios de tração e condutividade elétrica.

O ensaio de tração está evidenciado na Fig. 8, nele observa-se a relação dos diâmetros dos fios e os seus respectivos limites de resistência à tração. Nota-se que a diferença entre os fios de 3,8 e 4,0 mm é pequena quando comparado com os fios de 3,0 e 2,7 mm. O fio de 2,7 mm apresenta menor LRT entre os estudados, mesmo que os diâmetros sejam relativamente próximos.

A condutividade elétrica revelou resultados semelhantes aos de resistência à tração, a principal diferença está na melhoria de desempenho do fio de 2,7 mm, que conseguiu se aproximar dos fios de 3,8 e 4,0 mm. Nota-se que no gráfico de condutividade, é exibido apenas a faixa de 50-80 da escala %IACS, visando apresentar de forma mais coerente os dados.

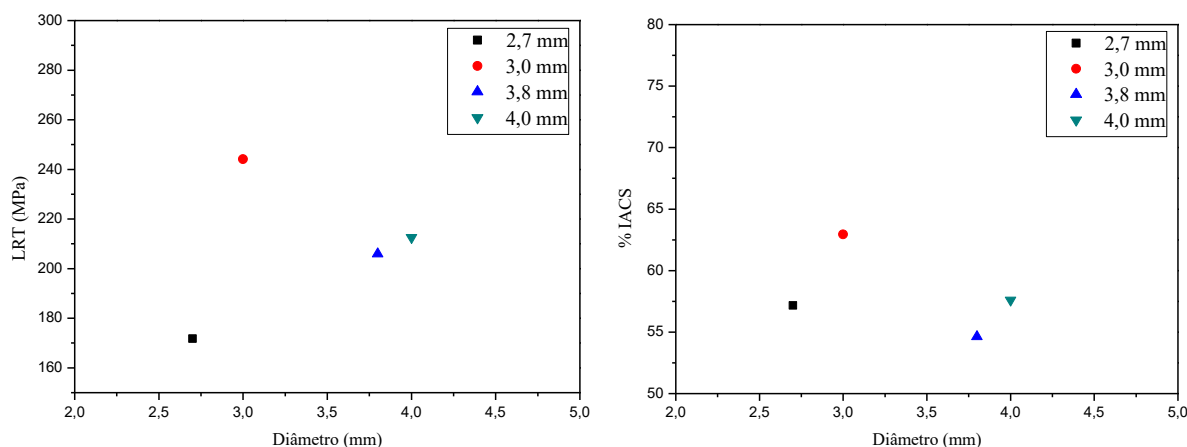


Figura 8. Gráficos dos LRT's e condutividade dos fios de Al-1%Ni. Fonte: Autor, 2022.

O gráfico evidencia de forma mais acentuada, os resultados dos ensaios de tração em todos os 4 diâmetros propostos no trabalho, com destaque para o fio de 3 mm que possui o maior LRT e maior condutividade entre os diâmetros estudados, outro fato que evidencia o potencial deste diâmetro é que ao ser comparado com o alumínio de pureza comercial, que possui LRT na faixa de 160 – 185 MPa, o mesmo se encontra em um patamar mais elevado de resistência mecânica em relação à tração, considerando a média da faixa estipulada para o alumínio de pureza comercial, nota-se um ganho de 41,54 % para o fio de 3 mm.

Tais resultados contrapõem a teoria de que a deformação plástica a frio, elevaria o LRT e tenderia a diminuir a condutividade elétrica. É provável que este comportamento esteja associado ao eficiente fenômeno da recuperação dinâmica do material (desemaranhamento e rearranjo de discordância durante a dissipação de temperaturas geradas na deformação a frio dos metais) (Lima, 2014; Freitas, 2009; Santos, 2010).

4. CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos após os ensaios realizados, o presente trabalho cumpriu seu objetivo de avaliar e correlacionar as propriedades elétricas e mecânicas da liga Al-1 %Ni, utilizando 4 diâmetros diferentes para obter maior abrangência de informações sobre a liga.

Constata-se que no final da solidificação a liga apresentou uma microestrutura onde possui uma quantidade considerável de grãos equiaxiais e de grãos colunares. Assim como, os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram um aumento na faixa de 11,7 HV na microdureza da liga, esse fato se dá pelo aumento da resistência do material devido ao composto intermetálico Al_3Ni , que é encontrado na faixa hipoeutética, estável abaixo da temperatura de 500 °C, concentrando dentro do arranjo interdendrítico, certa dureza, que proporciona reforço para a matriz dendrítica, com isso o material tende a aumentar sua resistência mecânica.

O aumento do LTR da liga, considerando o fio com melhores resultados, foi de 41,54 % em relação ao alumínio de pureza comercial, já a condutividade encontra-se na faixa de 50-80 da escala %IACS. Utilizando o fio de 3,0 mm como parâmetro, pode-se afirmar que o teor de níquel adicionado obteve êxito no aprimoramento das propriedades mecânicas do alumínio, com baixa variação na condutividade. Portanto, a liga de Al – 1 %Ni possui aplicabilidade na fabricação de cabos elétricos voltados para o setor de transmissão e distribuição de energia elétrica.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que proporcionou o investimento para a realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Abal - Associação Brasileira do Alumínio, 2007. *Fundamentos e aplicações do alumínio*. 68 p
- Alubar, 2020. Disponível em: https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Folder%20Al_1120_14-06%20ajustado.pdf
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOKS, 2010. *Metallography and microstructure*, volume 9.
- Batalu, D., Georgeta, C., Angel, A., 2006. *Critical analysis of Al-Ni phase diagrams*. Metallurgia International, v. 11, n. 8, p. 36-45.
- Canté, M. V., 2009. *Solidificação Transitória, Microestrutura e Propriedades de Ligas Al-Ni*. 204f. Tese de Doutorado – UNICAMP, Campinas, 2009.
- Dantas, P. P., 2014. *CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS HIPEREUTÉTICAS DE Al-Ni SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE*. Brasília: Universidade de Brasília.
- Freitas, E. S., 2010. *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.
- Garcia, A., 2006. *Solidificação: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Campinas: UNICAMP.
- Kauffman, J. G.; Rooy, E. L., 2004. *The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminum Castings*. In: Kauffman, J. G.; Rooy, E. L. Aluminum alloy castings: properties, processes and applications, Materials Park, ASM International. pp.: 47- 54.
- Lima, J. A., 2014. *Análise do comportamento elétrico, mecânico e termorresistente da liga Al 0,05%Cu- [0,24- 0,28] %Fe-0,7%Si modificado com teores de TieZr*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém.
- Oliveira, J. C. P. T.; Padilha, A. F., 2009. *Caracterização microestrutural dos alúminios comerciais AA1100, AA1050 e AA1070 e do alumínio superpuro AA1199*. Rem: Revista Escola de Minas, v. 62, n. 3, p. 373-378.
- Santos, R. G., 2006. *Transformação de fases em materiais metálicos*. Campinas: Unicamp.
- Santos, W. L. R., 2010. *Efeito de teores de Zr sobre as propriedades mecânicas e elétricas de ligas Al-Ec-Si aplicadas na elaboração de ligas para Tx e Dx de energia elétrica*. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém.
- Souza, P. H. L., 2013. *Análise da influência de teores de Mg e Ni sobre as propriedades térmicas, mecânicas e elétricas de uma liga Al-Cu-Fe para transmissão e distribuição de energia elétrica*. Belém: 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –79 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores, Yan Christian Silva de Araújo, Eric Elian Lima Espíndola, Luane Luiza Pereira Marques, Wellington Bruno Silva de Jesus, Deibson Silva da Costa, Emerson Rodrigues Prazeres e Amanda Lucena de Medeiros, são os únicos responsáveis pelo conteúdo do presente trabalho.

ANALYSIS OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE HYPOEUTETIC BINARY ALLOY Al – 1%Ni FOR ELECTRICAL POWER TX AND DX PURPOSES

Yan Christian Silva de Araújo, ycsaraujo@gmail.com¹
Eric Elian Lima Espíndola, eric.espindola@itec.ufpa.br²
Luane Luiza Pereira Marques, luanemarques18.lm@gmail.com¹
Wellington Bruno Silva de Jesus, wellingtonjesus.eng@gmail.com²
Emerson Rodrigues Prazeres, emerson.prazeres@itec.ufpa.br²
Amanda Lucena de Medeiros, amanda.lucena@ufpa.com.br²
Deibson Silva da Costa, deibsonsc@yahoo.com.br¹

¹Federal University of Pará, Campus Ananindeua, Cidade Nova 4, Tv. We Vinte e Seis, 02 - Coqueiro, Ananindeua - PA, 67130-660.

²Federal University of Pará, R. Augusto Corrêa, 01-Guamá, Belém-PA, 66067-110.

Abstract. In view of the growing rate of electricity consumption, the need to seek improvements in the transmission and distribution of electricity became relevant. Therefore, the present work aims to analyze the electrical and mechanical properties of the Al-1%Ni alloy, seeking the use of this alloy in transmission and distribution cables of electrical energy. The study was carried out based on commercially pure aluminum with the addition of 1% nickel, which was later solidified in a “U” metallic mold. After solidification, a sample of the material was taken for metallography, while the remaining material was subjected to a machining process to the diameter of 18.5 mm. With the machined material, the cold rolling process was carried out for the following diameters: (4.0; 3.8; 3.0; 2.7) mm. The alloy was characterized mechanically through tensile and microhardness tests, electrically through the electrical resistance test and structurally through the analysis of macrostructures. In the wires obtained after lamination, the electrical resistance test was performed on samples with a useful length of 40 cm and in the traction test, samples with a useful length of 15 cm were used. At the end of the tests, the sample that obtained the best results in the ratio - Mechanical resistance x Electrical resistance - was the 3mm sample. With the result of the electrical resistance test, it was noted that the addition of nickel did not significantly influence the passage of electric current through the wire when compared to pure aluminum. In the macro structure analysis, the presence of both columnar and equiaxed grains was observed. Based on the analysis of the tests, the results were satisfactory with the added nickel content, evidencing the feasibility of its use in electrical cables.

Keywords: Electric energy, Mechanical resistance, Electric conductivity, Al-1%Ni alloy.