

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DE UMA LIGA Al-Cu-Fe-Mg-Ti QUANTO AS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS

Eric Elian Lima Espíndola, eric.espindola@itec.ufpa.br e-mail¹

Mateus José Araújo de Souza, mateus.souza@itec.ufpa.br¹

Mateus Dias de Alencar, mateus.alencar@itec.ufpa.br¹

Gabriel Estefanio Reis de Araujo, gabriel.araujo@itec.ufpa.br¹

Emerson Rodrigues Prazeres, emerson.prazeres@itec.ufpa.br¹

Amanda Lucena de Medeiros, amanda.lucena@ufpa.com.br¹

Hendrick maxil zarate Rocha, hendrick@ufpa.br¹

¹Universidade Federal do Pará, R. Augusto Corrêa, 01-Guamá, Belém-PA, 66067-110

Resumo: Devido a elevada demanda por energia elétrica torna-se necessária a produção de cabos elétricos mais eficientes para fins de transmissão e distribuição de energia. Foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar as propriedades da base 0,05% de Cu, 0,30% de Fe, 0,6% de Mg e 0,15% de Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica de forma a possibilitar sua aplicabilidade na transmissão e distribuição de energia elétrica. A liga foi obtida por solidificação estática direta em coquilha metálica em “U”. Após a obtenção do material como fundido as amostras foram separadas, sendo uma parte utilizada para o processo de metalografia e o restante passou pelo processo de usinagem, para alcançar o diâmetro de 18,5 mm, e em seguida pelo processo de trabalho a frio até serem obtidos os fios com diâmetros de [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7] mm. Nos corpos de prova não deformados foi feita a análise estrutural por meio de suas macroestruturas e mecânica pelo ensaio de microdureza. Os corpos de prova da liga deformados tiveram suas análises feitas pela caracterização mecânica utilizando o ensaio de tração e o ensaio de microdureza, tiveram suas propriedades elétricas investigadas através do ensaio de resistividade elétrica, a liga também sofreu análise de sua termorresistividade. Como resultado do estudo, observou-se que em relação a todos os diâmetros propostos para essa pesquisa o de 3,0 mm obteve melhores resultados mecânicos e elétricos, e em comparação com a liga a comercial 6102 usada pela empresa Alubar Coppertec a liga produzida com 0,15% de Ti obteve propriedades mecânicas inferiores e propriedades elétricas a liga mostrou-se semelhante a comercial. Em relação à termorresistividade a liga teve resultados distintos para cada temperatura utilizada no teste. Diante disso, a liga pode ser aplicada em situações próximas as que foram constatados nesta pesquisa tanto em relação as propriedades mecânicas e elétricas.

Palavras-chave: Energia, Liga Al-Ti, Termorresistividade.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica faz-se presente na vida do ser humano desde os primórdios e o seu aprimoramento é buscado constantemente por intermédio de recursos científicos. No Brasil, a sua utilização é crescente no meio industrial e doméstico com aumentos significativos em relação aos anos anteriores de 4% e totalizando um consumo médio nos últimos 8 anos de 421,5 watt-hora até janeiro 2022 (Empresa de Pesquisa Energética, 2022). Desta forma, é notória a grande demanda de tecnologias mais viáveis para o consumo em pequena e grande escala de energia elétrica, que sejam mais satisfatórias do ponto de vista científico e financeiro.

Neste contexto, tem-se buscado por materiais mais eficazes para serem utilizados neste processo. A necessidade por pesquisas e experimentos que garantam e facilitem a otimização de processos e produtos na indústria se torna fundamental para qualidade dos produtos. Segundo renomados autores como Antony et al. (1988), Montgomery (2013), a execução dessa análise depende do planejamento experimental, baseado em métodos e técnicas estatísticas, que podem diminuir tempo e custo durante o processo experimental.

Com isso o alumínio é um material que pode ser utilizado como inovação tecnológica, visto que mesmo o alumínio comercial não possuindo resistência mecânica elevada, sua capacidade de poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos liga (Ventura, 2009) e assim passar a ser um material de construção mecânica. Diante disso, as ligas da série 6XXX, grupo de ligas tratáveis termicamente, torna-se bastante estudado visando melhorias na sua qualidade, seja visando modificações na composição química ou na seleção de tratamentos térmicos (Karabay, 2006; Huynh, 2019; Zidani et al., 2016; Mavlyutov et al., 2017).

Dessa forma, a adição de Ti pode ser uma alternativa visando melhorias nas propriedades das ligas de Al. O titânio é usualmente adicionado em teores compreendidos entre 0,05% e 0,2% como refinador de grão para todas as ligas de fundição em areia e molde permanente, e dispensável na fundição sob pressão, pois a microestrutura já é fina devido ao resfriamento rápido (Ferrarini, 2005).

Outro aspecto importante do Ti se dá pela interação com o alumínio para formação do intermetálico $TiAl_3$, que foi explicada pela teoria peritética desenvolvida inicialmente por Crossley e Mondolfo (1951). A liga também passou pelo processo de deformação a frio, no qual o fenômeno da recuperação ocorre, de acordo com Callister (2007), a recuperação compreende fenômenos que conduzem à restauração parcial da microestrutura do material advinda da deformação plástica.

A deformação também influencia nas propriedades mecânicas e elétricas da liga, bem como também tratamentos térmicos, assim se torna importante analisar como essas variações se comportam. Uma característica que pode nortear essa análise é a termorristência, o alumínio termorresistente consiste na adição de alguns elementos ligantes ao alumínio puro a fim de elevar a temperatura de recristalização do material (Lima, 2014). E de acordo com a ASM International (1998), estes materiais suportam maiores temperaturas de operação com menor dilatação linear, de forma a manter a maioria dos critérios de projeto originais.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo para avaliar as propriedades da liga Al-0,05% de Cu, 0,30% de Fe, 0,6% de Mg e 0,15% de Ti, que se enquadra como uma liga da série 6XXX, quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica de forma a possibilitar sua aplicabilidade na transmissão e distribuição de energia elétrica.

2. METODOLOGIA

A metodologia do estudo segue a fabricação de fios para a transmissão elétrica e os processos para a obtenção dados seguem descritos nos tópicos seguintes da seção 3.

2.1. Fundição

A fundição foi realizada em um forno do tipo Mufla à 900 graus durante 4 horas, condições suficientes para a fusão completa dos materiais adicionados (Al, Cu, Fe, Mg e Ti). É importante ressaltar que a liga metálica em estado líquido foi agitada com uma espátula para homogeneização dos elementos, além disso, a espátula foi lixada e revestida com uma solução de caulim, para que a liga não fosse contaminada.

2.2. Solidificação

Para a solidificação, foi utilizado um molde em coquilha em formato de U, o molde em coquilha consiste em duas paredes de aço juntas por parafusos, porém o molde conta com uma cavidade cilíndrica que neste caso conta com um diâmetro de 22 mm, o molde é pré-aquecido à uma temperatura de 250 graus, este procedimento tem como propósito remover a umidade interna do molde. Após o vazamento e a solidificação, a peça é retirada para as próximas etapas. A Figura 1 mostra os detalhes do vazamento no molde “U” e do lingote fabricado.

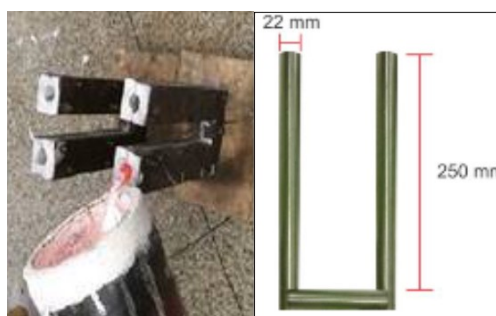


Figura 1. Vazamento no molde em “U” e dimensões do lingote. Fonte: GPEMAT, 2022.

2.3. Metalografia

A preparação para a análise estrutural das amostras não usinadas se deu da seguinte maneira, a secção retirada do lingote foi lixada e polida, após esse processo, a peça sofreu ataque químico através da imersão em solução Keller, preparada segundo técnicas-padrão em metalografia (Asm International, 2004) e lavadas com água e álcool etílico. Já a microestrutura vem das amostras resultantes dos ensaios de tração, que foram caracterizados via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que envolve o corte da região da fratura, além de cortes transversal.

2.4. Dureza

A realização do ensaio de microdureza seguiu a norma ASTM E384 – 11 e foram efetuadas em um microdurômetro modelo HV – 1000B em amostras não usinadas obtidas do molde em coquilha. Para o estudo dos valores de microdureza em função da distância da superfície ao centro da amostra, foram criados três perímetros como mostrado na Fig 2. Em cada perímetro foram realizadas 12 indentações.

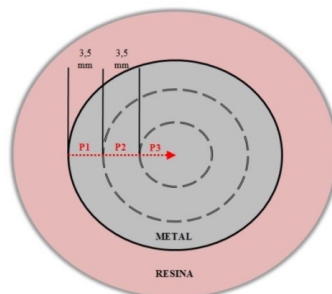


Figura 2. Ilustração dos perímetros criados na amostra para o estudo da microdureza em função da distância da superfície ao centro. Fonte: GPEMAT, 2022.

2.5. Laminação

No próximo processo as peças são usinadas de 22 mm para 18,5 mm, isto serve para melhorar a superfície das peças. A laminação foi feita à frio, em laminadores elétricos reversíveis marca MENAC (Fig. 3), os diâmetros de laminação estudados foram os de [2,7; 3,0; 3,8; 4,0] mm, os corpos deformados serviram para as caracterizações elétricas e mecânicas.



Figura 3. Laminadores utilizados na deformação plástica a frio do material. Fonte: GPEMAT, 2022.

2.6. Caracterização elétrica da liga

À cerca da caracterização elétrica da liga, foi seguida a recomendação da norma NBR 5118 de realizar o procedimento com uma temperatura ambiente acima de 10 e abaixo de 30 graus, corrigindo para 20 graus, após a coleta dos dados foi utilizada a equação da norma NBR 6814, o resultado foi convertido para condutividade elétrica em %IACS. Os testes foram feitos com um multiohmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000, Fig 4.



Figura 4. Multiohmímetro (ponte de kelvin) MEGABRÁS modelo MPK-2000. Fonte: GPEMAT, 2022.

2.7. Caracterização mecânica

Foram obtidas seis amostras com 3 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento obtidos após o processo de laminação, tais amostras foram uteis nos ensaios de tração utilizando a máquina KRATOS modelo IKCL1 – USB (Fig. 5) respeitando as normas NBR 6810 e NBR ISO 6892.



Figura 5. KRATOS, modelo IKCL1-USB. Fonte: GPEMAT, 2022.

2.8. Teste de Termorresistividade

A realização do teste de termorresistividade foi feita seguindo as especificações técnicas já citadas, a COPEL e a ASTM B941, onde a liga que foi tratada à 230 graus deveria apresentar perda inferior à 10% do seu limite de resistência à tração, enquanto a ASTM B941, além desse mesmo teste do limite de tração, deve, após o tratamento térmico realizar o teste de resistividade elétrica, onde o fio não deve exceder 0,02873 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 20 °C, ou seja, a sua condutividade elétrica deve ser igual ou maior a 60% IACS. Os dados da caracterização elétrica foram obtidos a partir de um multiohmímetro MEGABRÁS, modelo MPK-2000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Química

Por meio dos resultados adquiridos no analisador químico foi possível estabelecer uma comparação entre as composições esperadas e as composições reais, a Tab. 1, mostra esses valores e a variação relativa em relação a os valores esperados.

Tabela 1. Composição da liga. Fonte: GPEMAT, 2022.

Dados/Elementos	Elementos de Liga (em % de peso)			
	Fe	Cu	Mg	Ti
Esperado	0,26	0,05	0,6	0,15
Real	0,251	0,048	0,629	0,148
Variação relativa (%)	3,5	0,2	2,9	0,2

Os resultados mostrados na Tab. 1 mostram que a liga realmente está na faixa de composições das ligas da série 6XXX que pode ser vista na norma ABNT-NBR 6834 e também que a liga fabricada apresenta variações muito baixas entre as composições desejadas e as que a liga realmente possui, com diferenças de menos de 4% entre os valores.

3.2. Macroestrutura

Analisando a Fig 6, temos que o titânio é usualmente adicionado em teores compreendidos entre 0,05% e 0,2% como refinador de grão para todas as ligas de fundição em areia e molde permanente, e dispensável na fundição sob pressão, pois a microestrutura já é fina devido ao resfriamento rápido (Ferrarini, 2005). Tal fato, é confirmado na análise da macroestrutura, visto que a liga sendo modificada com 0,15% de Ti tem-se uma estrutura refinada devido ao potencial de refinamento causado pelo elemento titânio.

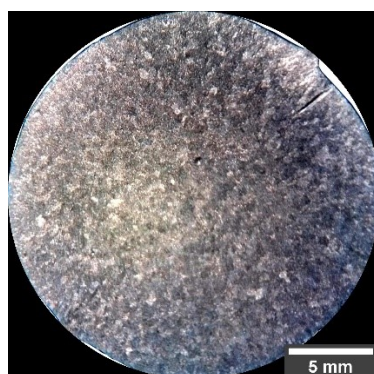


Figura 6. Macroestrutura da liga. Fonte: GPEMAT, 2022.

3.3. Microdureza

Os resultados da análise de microdureza da liga 0,15%Ti para cada perímetro está apresentada na Tab. 2.

Tabela 2. Relação das microdurezas das ligas Al-Cu-Fe-Mg com 0,15%Ti com os perímetros estudados. Fonte: GPEMAT, 2022.

Perímetro	Microdureza (HV)
P1	34,1
P2	34,0
P3	34,2
Média	34,1
Desvio Padrão	0,1

Comparados às microdurezas de ligas da série 6000, que geralmente fornecidas em blocos ou vergalhões de variados diâmetros, que oscilam na faixa de 90 HB (32 HV) segundo o site da empresa Metalthaga(metalthaga.com.br). Pode-se inferir que a maior quantidade de soluto, associado ao refinamento de grão, na liga com titânio elevou a microdureza da liga. (Mohanty e Gruzleski, 1995 apud Lima, 2014).

Nota-se que com a adição de titânio na liga base a microdureza aumenta, devido a sua alta potência de refino ao ser adicionado ao alumínio, esse fato é comprovado e apresentado com frequência tanto na literatura quanto na utilização industrial. A interação entre o titânio e o alumínio para formação do intermetálico $TiAl_3$ permite a formulação da teoria do peritético, desenvolvida inicialmente por Crossley e Mondolfo (1951), e aceita posteriormente por outros autores.

A teoria peritética propõe que a ocorrência da reação peritética entre o alumínio líquido e partículas primárias de intermetálico $TiAl_3$, provoca a formação de eficientes substratos pelorecobrimento dos cristais do intermetálico por uma camada de alumínio, via reação peritética. Em condições práticas a fase primária $TiAl_3$ pode se desintegrar parcialmente em cristais muito finos sobre os quais precipita a matriz de alumínio. O que de fato influência de forma acentuada no aumento da dureza do material.

Também é possível notar que o desvio padrão dentro dos valores de dureza nos perímetros apresentou um valor baixo. De acordo com Mohanty e Gruzleski (1995) e Lima (2014) este comportamento pode estar relacionado com a alta coerência do Ti com a matriz de alumínio.

3.4. Caracterização Elétrica

A Tabela 3 apresenta-nos os resultados dos ensaios de condutividade elétrica e para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,15%Ti.

Tabela 3. Ensaios de condutividade elétrica. Fonte: GPEMAT, 2022.

Diâmetro (mm)	Condutividade Elétrica (%IACS)
2,7	47,46
3,0	51,37
3,8	45,66
4,0	46,53
Média	47,76
Desvio padrão	2,52

Nota-se que as amostras não apresentam grande desvio entre suas condutividades, mantendo-se entre a faixa para mais e para menos de um desvio padrão, o único valor que ultrapassa essa faixa é o diâmetro de 3 mm, o que também contrapõe a teoria de que a deformação plástica a frio tenderia a diminuir a condutividade elétrica. Segundo Lima (2014), Freitas (2009) e Santos (2010) é provável que este comportamento esteja associado ao eficiente fenômeno da recuperação dinâmica do material (desemaranhamento e rearranjo de discordância durante a dissipação das temperaturas geradas na deformação a frio de metais).

Utilizando a liga comercial Al Liga 6201, que também é da série 6XXX, como parâmetro de referência retirando as informações do folder denominado “Alumínio liga 1120 para linhas de transmissão e distribuição aérea” da empresa Alubar Coppertec. Tem-se que o valor de condutividade dessa liga é de 52,5 %IACS, bem próximo do valor obtido pela liga com 15% Ti que possui 51,37 %IACS. Isso mostra que a recuperação dinâmica auxiliou na condutividade de forma a estabelecer parâmetros elétricos semelhantes a ligas utilizadas na prática.

3.5. Caracterização Mecânica

A Tabela 4 apresenta-nos os resultados dos ensaios de limite de resistência a tração (LRT) e para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,15%Ti.

Tabela 4. **Limite de resistência a tração.** Fonte: GPEMAT, 2022.

Diâmetro (mm)	LRT (MPa)
2,7	257,61
3,0	272,07
3,8	228,54
4,0	232,95
Média	247,79
Desvio padrão	20,63

A análise dos dados da tabela indica que o comportamento do LRT se mantém uniforme dentro de uma faixa média de 247,79 MPa, com variação para mais ou para menos de 20,63 MPa, essa faixa de desvio contém quase todos os diâmetros exceto o de 3,0 mm. Da mesma forma que condutividade elétrica, observa-se que apesar do maior grau de trabalho a frio na liga com 0,15%Ti, o fio com diâmetro de 3,0 mm apresenta o maior valor para o LRT;

Tal fato pode ser entendido pelo fato que a resistência mecânica de um metal durante a deformação plástica é elevada, devido o aumento da densidade de discordâncias, que são os defeitos lineares do material. Esse aumento da densidade das discordâncias se dá pela distorção de sua rede cristalina. Segundo a lei de Schmid, ao aplicarmos uma tensão acima do limite de escoamento do material, as discordâncias deslizam em seus planos cristalinos (Askerland; Phulé, 2008). Como também pelo fenômeno da recuperação dinâmica dentro da liga no momento da deformação a frio que pode ter influenciado na resistência mecânica analisada no trabalho.

Comparando com o dado de LRT da Liga Al 6201 já citado no trabalho, tem-se que os valores de limite de resistência a tração dessa liga tem valor numa faixa de 290 - 295 MPa, o que está acima do valor de 272, 07 da liga com 0,15%Ti, assim é possível notar que as características mecânica da liga tem menos impacto dentro dos parâmetros analisados em comparação as propriedades elétricas da liga, visto que está mais distante das condições utilizadas na prática.

3.6. Termorresistividade

A Tabela 5 abaixo apresenta os resultados dos ensaios de limite de resistência a tração (LRT) relacionado às perdas de LRT e condutividade elétrica para as diferentes temperaturas dos tratamentos térmicos efetuados devido a realização do teste de termorresistividade para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,15%Ti, os dados dos cabos com diâmetro de 3,0 mm foram escolhidos para essa análise, pois seus resultados em propriedade mecânica e elétrica foram os melhores.

Tabela 5. **Relação dos valores obtidos para LRT (MPa), perda de LRT (%) e condutividade elétrica (%IACS) da liga Al - 0,15%Ti sem e com teste de termorresistividade.** Fonte: GPEMAT, 2022.

Teste de Termorresistividade	LRT (MPa)	Perda de LRT	Condutividade Elétrica (%IACS)
Sem teste	272,07	-	51,37
Copel TT (230°)	249,17	8,42	52,84
ASTM B941 TT (280°)	213,93	21,37	54,57

A partir dos dados da Tab. 5 pode-se fazer um gráfico (Fig. 7) relacionando os dados de limite de resistência a tração em função de cada temperatura de tratamento térmico no qual a liga foi submetida, para a liga sem tratamento térmico foi considerado a temperatura ambiente de 25°C.

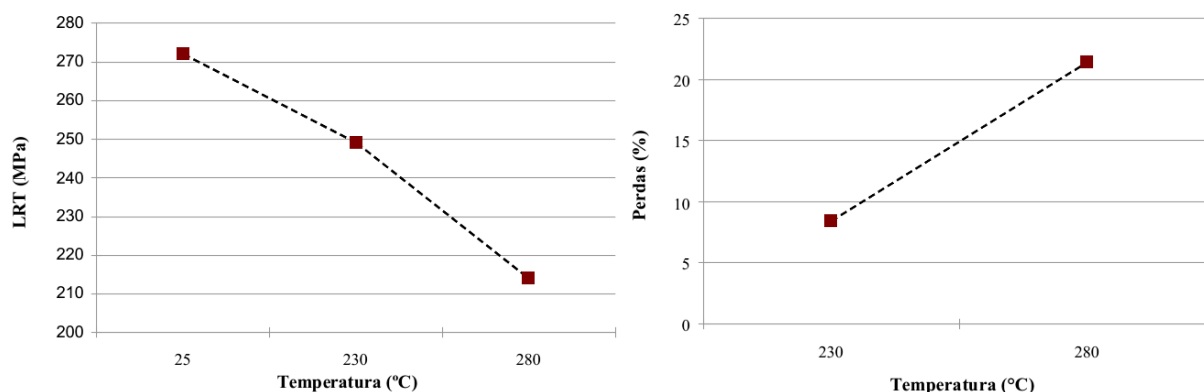


Figura 7. Relação LRT com teste de termorresistividade e suas porcentagens de perda. Fonte: GPEMAT, 2022.

Observa-se, no que se refere à liga com 0,15%Ti (Fig. 7), que em relação à caracterização mecânica o teste de termorresistividade resultou em perdas de limite de resistência a tração, entretanto, para o tratamento térmico na temperatura de 230°C as perdas de LRT foram inferiores a 10%, o que caracteriza a liga como termorresistente segundo o protocolo COPEL.

Segundo Lima (2015), para a temperatura de 230°C e fio com diâmetro de 3,0 mm foram geradas uma grande quantidade de discordâncias que impedem uma aniquilação mais efetiva dos emaranhados, contribuindo assim para a obtenção de um satisfatório LRT. Já em relação ao tratamento a temperatura de 280°C as perdas de LRT foram superiores a 10%, que estão acima do limite aceitável, o que não caracteriza a liga como termorresistente segundo a norma ASTM.

Em relação à caracterização elétrica (Fig. 8), o tratamento térmico elevou a condutividade elétrica da liga, tanto para a temperatura de 230°C como para de 280°C. Credita-se o comportamento elétrico do fio analisado à alta coerência do Ti com a matriz de alumínio (Mohanty e Gruzleski, 1995 apud Lima, 2014). Visto que, os tratamentos térmicos atuaram de forma efetiva na recuperação estrutural, diminuindo o emaranhado de discordância, melhorando, por conseguinte a condutividade elétrica (Freitas, 2010 ; Dias, 2016; Machado, 2012; Kamizono, 2012; Kamizono, 2014).

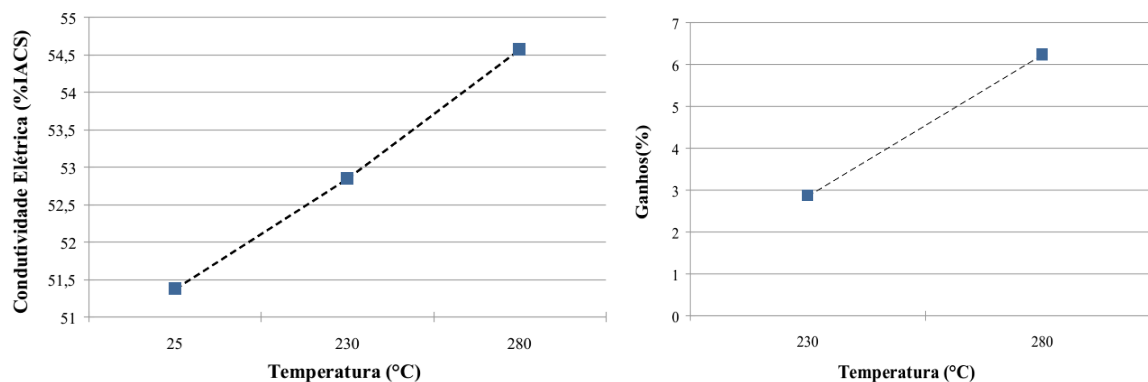


Figura 8. Relação condutividade com teste de termorresistividade e suas porcentagens de ganhos. Fonte: GPEMAT, 2022.

4. CONCLUSÃO

Por meio dos processos que produziram os resultados e discussões visto nesse trabalho, pode-se concluir que em relação a análise química, a liga realmente está na faixa de composições das ligas da série 6XXX que pode ser vista na norma ABNT-NBR 6834, e por apresentar pouca variação aos teores que se desejava conclui-se que a liga foi fabricada de forma eficaz.

A microestrutura da liga apresentou características semelhantes as comentadas na literatura em relação Al-Ti, em que consta grãos refinados, devido a propriedade refinadora do titânio quando adicionado ao alumínio. A microdureza da liga com 0,15% Ti ao ser comparado com uma liga comercial apresenta valores superiores, devido a influência do titânio no refinamento de grãos e também os valores uniformes da microdureza em toda liga por meio da alta coerência de Ti na matriz de alumínio.

A caracterização elétrica mostrou que o diâmetro de 3,0 mm apresentou o maior valor de condutividade, esse fato ocorreu provavelmente ao fenômeno da recuperação dinâmica. Notou-se que a condutividade da liga comparada a da liga comercial 6201 apresenta valor semelhante, o que é um fator positivo para sua aplicabilidade.

A análise da caracterização mecânica mostrou que a amostra de 3,0 mm foi a que apresentou o maior valor de LRT que pode ter influência tanto do aumento de resistência devido o trabalho a frio e o fenômeno de recuperação dinâmica, mas quando comparado com a liga comercial já citada mostra valor inferior. Dessa forma, as características elétricas do fio apresentam maior impacto em sua aplicabilidade.

Quanto a termorressistividade da liga para o protocolo Copel os fios de Al-0,15%Ti apresentam a características termorresistentes, já para a norma ASTM B941 os resultados não foram favoráveis para caracterizar a liga como termorresistente. Com isso, pode-se dizer que a liga apresenta propriedades elétricas interessantes se comparadas as da série 6XXX e suas propriedades mecânicas estão dentro do padrão de ligas de Al, num aspecto geral. Sua termorresistência pode ser aceita num critério nacional (Copel), porém em relação ao critério internacional (ASTM) não possui essa certificação, assim a liga pode ser aplicada em situações que estiverem dentro dos parâmetros elétricos e mecânicos apresentados nesta pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que ofereceu investimento a essa pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Alubar,2020. Alumínio liga 1120para linhas de transmissão e distribuição aérea. Disponível em: <https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Folder%20Al_1120_14-06%20ajustado.pdf>. Acesso em: 25 de fev de 2022.
- American Society For Metals (ASM International),1998. Aluminum and aluminum alloys. v. 4. American Society for Metals - ASM Handbook .
- American Society For Metals (ASM International). Metallography and microstructures. v 9, American Society for Metals, ASM Handbook, 2004.
- American Society for Testing and Materials (ASTM International E384-11) Standard Test Method For Knoop And Vickers Hardness Of Materials, 2013.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT NBR 5118). Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro, ago. 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT NBR 6810). Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT NBR 6814). Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro, mar. 1986.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT NBR ISSO 6892). Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, nov. 2002.
- Antony, J.; Kate, M.; Frangou, A, 1988. “A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques”. *The TQM magazine*, v. 10, no 3, p. 169 –176.
- Askerland, D. R.; Phulé, P. P, 1998. *Ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Cengage Learning, 2008, 594p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2010.. NBR 6834: Alumínio e suas ligas - Classificação da composição química. Rio de Janeiro.
- Callister Jr., W.d, 2017. *Fundamentals of materials science and engineering*. 7. ed. New York: John Wiley.
- Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em:12 de mar. de 2022.
- Copel - Companhia Paranaense de Energia. Teste de Termorresistividade.
- Crossley, F.a., Mondolfo, L.f J, 195. *Met.Mater. Trans.*, v. 191, p. 1143-51.
- Dias, W. S, 2016. Análise da influência do tratamento térmico na liga Al-0,05%cu- [0,35 - 0,45]%Fe modificada com dois teores de zircônio solidificada em coquilha metálica. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Belém.
- Ferrarini C. F, 2005. Microestruturas e Propriedades Mecânicas de Ligas de Al-Si Hipoeutéticas Conformadas por Spray. Tese de doutorado – Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, São Carlos.
- 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.
- GPEMAT, 2022. Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais.
- Huynh, Khanh Cong. “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, 2019.

- Kamizono, K. A, 2012. Estudo do efeito da adição de silício sobre propriedades mecânicas e elétricas de fios para transmissão e distribuição de energia elétrica da liga Al-0,05%Cu- [0,24-0,28]%Fe-0,22%(Zr,Ti). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará. Belém.
- Kamizono, K. A, 2014. Caracterização elétrica e mecânica da liga al-cu-fe-si modificada com os diferentes teores de ni para aplicação na fabricação de fios e cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará. Belém.
- Karabay, S, 2006. "Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors". *Materials & design*, 27(10), 821-832.
- 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 modificada com teores de Ti e Zr. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém.
- Machado, P. C, 2012. Análise da Influência dos Solutos Zr E Ti Sobre As Propriedades Mecânica, Elétrica e de Termorresistência de uma Liga Al-Cu-Fe-Si Destinada a Tx e a Dx de Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará. Belém.
- Mavlyutov, A. M., Orlova, T. S., Latynina, T. A., Kasatkin, I. A., Murashkin, M. Y., & Valiev, R. Z, 2017. "Influence of additional deformation on microstructure, mechanical and electrical properties of Al-Mg-Si alloy processed by high pressure torsion". *Rev. Adv. Mater. Sci*, 52, 61-69.
- Metelathaga, 2022. Alumínio e suas ligas - Classificação da composição química. Disponível em <<https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>>. Acesso em: 12 de fev de 2022.
- Mohanty, P. S.; Gruzleski, J. E, 1995. "Mechanism of grain refinement in aluminium". *Acta metall. mater. Elsevier Science Ltd*, Vol. 43, No. 5, pp. 2001-2012.
- Montgomery DC, 2013. *Design and analysis of experiments*. 8th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Santos, R. G, 2006. Transformação de fases em materiais metálicos. Campinas: Unicamp.
- Ventura, O. S. P, 2009. Avaliação das propriedades mecânicas e elétricas da liga 6201 não refinada, modificada com teores de cobre (0,05 e 0,3) % para transporte de energia elétrica .2009.76. f. dissertação (mestrado em engenharia mecânica) -programa de pós-graduação em engenharia mecânica, instituto de tecnologia, universidade federal do Pará, Belém. Disponível em:< <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5089>>. Acesso em:12 de mar. 2022.
- Zidani, M., Bessais, L., Farh, H., Hadid, M. D., Messaoudi, S., Miroud, D., & Baudin, T. ,2016. "Study of texture, mechanical and electrical properties of cold drawn AGS alloy wire". *Steel and Composite Structures*, 22(4), 745-752.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores Eric Elian Lima Espíndola, Mateus José Araújo de Souza, Mateus Dias de Alencar, Gabriel Estefanio Reis de Araujo, Emerson Rodrigues Prazeres, Amanda Lucena de Medeiros e Hendrick maxil zarate Rocha são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF THE CHARACTERIZATION OF AN AL-CU-FE-MG-TI ALLOY AS TO ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Eric Elian Lima Espindola, eric.espindola@itec.ufpa.br e-mail¹

Mateus José Araújo de Souza, mateus.souza@itec.ufpa.br¹

Mateus Dias de Alencar, mateus.alencar@itec.ufpa.br¹

Gabriel Estefanio Reis de Araujo, gabriel.araujo@itec.ufpa.br¹

Emerson Rodrigues Prazeres, emerson.prazeres@itec.ufpa.br¹

Amanda Lucena de Medeiros, amanda.lucena@ufpa.com.br¹

Hendrick maxil zarate Rocha, hendrick@ufpa.br¹

¹Federal University of Pará, R. Augusto Corrêa, 01-Guamá, Belém-PA, 66067-110

Abstract. Due to a greater demand for electrical cables, the most efficient electrical cables for the production and distribution of energy become necessary. A study was carried out with the objective of evaluating the properties of the base 0.05% of Cu, 0.30% of Fe, 0.6% of Mg and 0.15% of Ti in terms of structural, electrical and mechanical characterization in a to enable its applicability in the transmission and distribution of electric energy. The alloy was obtained by direct static solid in metallic "U" molding. After replacing the remaining material as separate samples, one part being used for the metallography process and the rest as a machining process, to reach the machining diameter of 18.5 mm, and then the cold working process obtained the wires with diameters [4.0; 3.8; 3.0 and 2.7] mm. Our undeformed specimens were subjected to structural analysis through their macrostructures and mechanics by microhardness test. The test specimens of formers also had their attempts to characterize the mechanical tensile test using the mechanical tensile test, had their electrical properties investigated through the electrical resistance test, the connection analyzed for its thermoresistivity. As a result of the study, it was observed that used in relation to all those proposed for this research, the 3.0 mm one obtained the best mechanical and electrical results, and in comparison with the commercial alloy 6102 by the company Alubar Coppertec, the alloy produced with 0.15% of Ti properties had inferior mechanical and electrical properties similar to commercial ones. Regarding the thermoresistivity, the alloy presented different results for each temperature used in the test. From this, the alloy can be applied in situations as close as research in these mechanical and electrical properties has been found.

Keywords: Electrical energy, Mechanical and electrical characterization, Al-Ti alloy.