



## **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”**

### **Structural, electrical and mechanical evaluation of the modified Al-Cu-Fe-Mg base alloy by levels of Ni and Ti casted in an "U" shaped mold**

Emerson Rodrigues Prazeres<sup>1</sup>

Carlos Alexandre Cavalcanti de Sousa<sup>2</sup>

Renan Gouvea Dias<sup>3</sup>

Mauro Quaresma Lobato<sup>4</sup>

José Maria do Vale Quaresma<sup>5</sup>

**Resumo:** Em virtude da crescente demanda por energia elétrica torna-se necessária a produção de cabos elétricos cada vez mais eficientes para fins de transmissão e distribuição de energia. Com esta finalidade foi realizado estudo com o objetivo de avaliar a modificação da liga base Al – Cu – Fe – Mg por teores de Ni e Ti. O estudo foi realizado partindo da liga base alumínio de pureza comercial com adição dos teores 0,05% Cu, 0,40% Fe e 0,6% Mg posteriormente modificada com adição de teores de 0,03% Ni e 0,15% Ti. A liga foi obtida por solidificação estática direta em coquilha metálica. Após a obtenção do material como fundido o mesmo passou pelo processo de usinagem para o diâmetro de 18,5 mm e em seguida pelo processo de trabalho a frio até serem obtidos os diâmetros de [4,0; 3,8; 3,0 e 2,7] mm. As ligas foram caracterizadas estrutural, elétrica e mecanicamente através de análise metalográfica, dos ensaios de resistividade elétrica, de tração e de microdureza, respectivamente. Como resultado do estudo, observou-se que o níquel melhorou as propriedades elétricas e o titânio foi mais eficiente em relação às características mecânicas da liga.

**Palavras-chave:** Energia Elétrica; Solidificação; Liga Al-Ni; Liga Al-Ti.

<sup>1</sup> UFPA – Universidade Federal do Pará

<sup>2</sup> UFPA – Universidade Federal do Pará

<sup>3</sup> UFPA – Universidade Federal do Pará

<sup>4</sup> UFPA – Universidade Federal do Pará

<sup>5</sup> UFPA – Universidade Federal do Pará

**Abstract:** The growing demand for electricity led to the creation of the National Interconnected System (SIN), which requires the production of more efficient electric cables due its high demand for transmission and distribution of energy. As these lines made of electrical conductor aluminum (Al EC) is proposed research on the effects of Ni and Ti elements modifying the alloy Al - Cu - Fe - Mg. The study aims to compare different alloying elements (Ni and Ti) to define the influence on the electrical and mechanical properties of cables applied for the transmission of electricity. The alloy was obtained by direct solidification on static metallic mould casting. After obtaining the material as cast, it passed through the machining process to a diameter of 18.5 mm and then the cold working process until the obtained diameters of [4,0; 3.8; 3.0 and 2.7] mm. The alloys were characterized structural, electrical and mechanically through metallographic analysis, electrical resistivity test and the tensile test and hardness, respectively. As a result of this study, it was observed that nickel improved electrical properties and titanium was most efficient with regard.

**Keywords:** Electric Energy; Solidification; Alloy Al-Ni; Alloy Al-Ti.

---

## 1. Introdução

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas no mundo e é de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade, sua utilização é tanto doméstica como industrial. No mês de dezembro de 2013 a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 126.755 MW. As principais formas de geração de energia elétrica no Brasil atualmente são a hidráulica e térmica cuja capacidade instalada é de 86.019 MW e 38.529 MW, respectivamente. Entretanto, este tipo de energia também é gerado de outras formas, como por exemplo: em usinas eólicas, solares, nucleares, entre outras. (MME, 2013).

Com o avanço da tecnologia e a globalização, a demanda por energia elétrica tem aumentado cada vez mais no mundo. Com isso é necessário o desenvolvimento de tecnologias que melhorem a transmissão desta energia para suprir tal demanda (Inter Academy Council, 2007). Neste contexto, tem-se buscado por materiais mais eficientes e menos onerosos a serem utilizados nesta aplicação.

O alumínio, por sua elevada condutibilidade elétrica e leveza, reúne as características ideais para aplicação confiável na transmissão e distribuição de energia elétrica, com menores taxas de desperdício de eletricidade ao longo das redes condutoras (ABAL, 2012). No entanto, como o Al comercialmente puro não possui resistência mecânica elevada, são adicionados alguns elementos químicos na matriz de alumínio, com o objetivo de elevar os valores de suas propriedades mecânicas e elétricas, tornando a liga adequada para a utilização em cabos de transmissão de energia elétrica.

O grupo de pesquisa e engenharia de materiais (GPEMAT) tem desenvolvido estudos com ligas de alumínio com a finalidade de utiliza-las nos cabos de transmissão e distribuição de energia elétrica. Souza (2013) sugere que ligas de alumínio com magnésio e níquel tem grande potencial para aplicação na industrial de fios e cabos elétricos devido as suas propriedades elétricas e mecânicas. Segundo Jorge (2013) o titânio contribui para a elevação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio. E de acordo com Sena (2015) teores de ferro na faixa de [0,24-0,28]% e de 0,05%Cu são os mais indicados para elevar o limite de resistência a tração do alumínio eletro condutor [Al-EC].

O objetivo deste trabalho consiste em percorrer todo o caminho que vai desde a solidificação da liga base Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,6%Mg modificada com teores de 0,03%Ni e (0,15 e 0,22)%Ti, realizando a caracterização macro e microestrutural, além das caracterizações elétricas e mecânicas das ligas solidificadas em coquilhas metálicas na forma de “U”, até as topografias das fraturas, dos corpos de prova, antes e após as operações de deformação a frio e tratamentos térmicos.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Avaliar o comportamento macroestrutural das ligas Al-0,05%Cu-[0,24-0,28]%Fe-0,6%Mg com os teores de 0,03%Ni e 0,15%Ti sem deformação.
- Avaliar a microdureza das ligas com os teores de 0,03%Ni e 0,15%Ti sem deformação.
- Após a deformação plástica avaliar o comportamento elétrico e mecânico;

## **2. Materiais e métodos**

### **2.1. Fundição e solidificação**

No processo de fundição das ligas, os elementos (Cu, Fe, Mg, Ni, Ti e Al) foram adicionados ao cadinho e levados a um forno a uma temperatura de 900°C por 4 h, como forma de garantir a fusão completa de todos os elementos.

O sistema operacional adotado para a solidificação das ligas foi o molde que consiste em duas paredes de aço que são convenientemente alinhadas e fechadas com parafusos, de modo a se obter uma cavidade em forma de “U” para se obter dois cilindros com 250 mm de comprimento e 22 mm de diâmetro. Momentos antes ao vazamento o molde é aquecido à temperatura de 250°C, procedimento visando a remoção de umidade interna e para que ocorra preenchimento total do molde pelo metal líquido. O metal líquido é vazado no molde de forma convencional e o preenchimento da cavidade se dá pela ação da gravidade. Depois que a peça solidifica o molde é aberto e a peça é retirada.

Após o desmolde do perfil solidificado são seccionadas as duas pernas do “U”, cada uma com comprimento de 250,0 mm para serem em seguida usinadas para o diâmetro de 18,5mm. A usinagem se faz necessária para melhorar o acabamento superficial das amostras, evitando o surgimento de defeitos na laminação. As caracterizações estruturais e de micro dureza foram realizadas nos perfis como fundidos e sem deformação plástica. Por outro lado as caracterizações elétrica e mecânica foram realizadas em corpos de prova deformados por laminação a frio, utilizando-se dois laminadores elétricos duo reversível. Esses laminadores possuem diferentes secções circulares em seus cilindros de laminação, sendo que neste estudo os diâmetros estudados foram os de [2,7; 3,0; 3,8; 4,0] mm.

### **2.2. Caracterização elétrica e mecânica (LRT e Microdureza)**

Os ensaios elétricos e mecânicos foram realizados em fios com os diâmetros de (2,7; 3,0; 3,8; 4,0) mm obtidos após a usinagem e laminação do corpo de prova obtido no processo de solidificação.

Na caracterização elétrica, os corpos de provas foram submetidos aos ensaios com objetivo de se avaliar a resistividade elétrica com o auxílio de um multiohmímetro (ponte de

kelvin). Os testes de resistividade elétrica foram realizados segundo as normas NBR 5118 (2007), NBR 6810 e NBR 6815 (1981b).

Após a caracterização elétrica, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio mecânico, em máquina de ensaio de tração. Os testes de tração foram realizados segundo as normas para cabos elétricos, NBR 6810, e materiais metálicos, NBR 6892, executando-os em três amostras com 20 cm para cada diâmetro.

A realização do ensaio de microdureza seguiu a norma ASTM E384 e foram efetuadas em um microdurômetro modelo HV – 1000B em amostras não usinadas obtidas do molde em coquilha. Na realização dos ensaios, a carga utilizada para o indentador marcar a superfície da amostra foi de 50g durante 15s. Para o estudo dos valores de microdureza em função da distância da superfície ao centro da amostra, foram criados três perímetros, sendo realizado em cada perímetro 12 indentações.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Análise Química

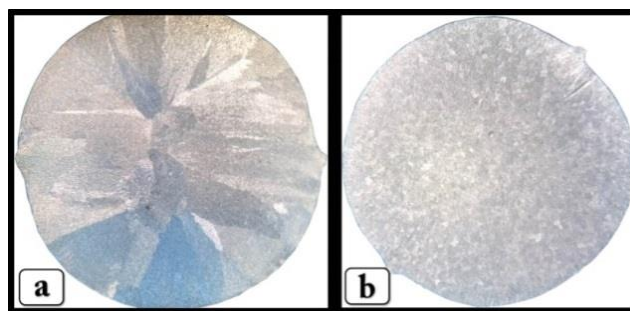
Na Tabela 1 estão relacionados todos os procedimentos de cálculo estequiométrico efetuaram-se de forma correta e as composições químicas obtidas estão de acordo com a finalidade deste trabalho. A composição química é referente às ligas Al-0,030%Ni e Al-0,15%Ti.

**Tabela 1:** Composições químicas dos lingotes fabricados.

Liga	Elementos (% em massa)				
	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti
Al-Cu-Fe-Mg-0,030%Ni	0,274	0,054	0,583	0,030	-
Al-Cu-Fe-Mg-0,15%Ti	0,251	0,048	0,629	-	0,148

#### 3.2. Macroestruturas das ligas sem deformação

A morfologia das estruturas dos grãos das ligas, sem deformação, estudadas está apresentada na Figura 1. Observa-se que, a liga com níquel (Figura 1a) apresenta grãos predominantemente colunares, enquanto que a liga com a presença de titânio (Figura 1b) apresenta grãos predominantemente equiaxiais devido à ação refinadora do elemento Ti.



**Figura 1:** Macroestruturas da ligas (a) Al-0,03%Ni; (b) Al-0,15%Ti.

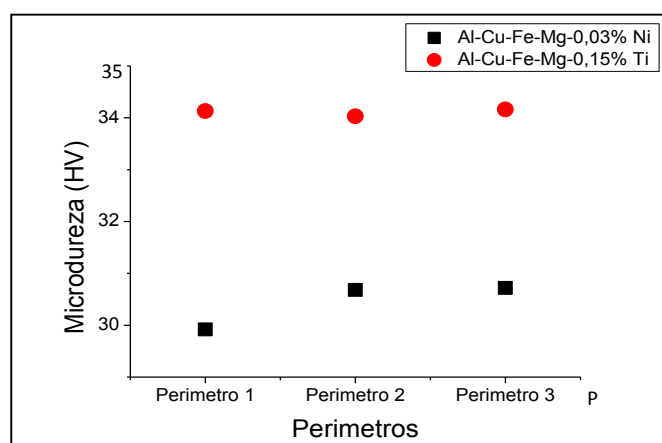
### 3.3. Comparação entre o efeito de 0,03%Ni e 0,15%Ti na microdureza da liga base

Os resultados da análise de microdureza das ligas com 0,03%Ni e 0,15%Ti para cada perímetro é apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** - Relação das microdurezas das ligas Al-Cu-Fe-Mg com (0,03%Ni e 0,15%Ti) com os perímetros estudados.

Perímetros	Microdureza (HV)	
	Al-Mg-0,03%Ni	Al-Mg-0,15%Ti
P1	29,9	34,1
P2	30,7	34,0
P3	30,7	34,2

Com base nos valores de microdureza apresentadas na Tabela 2 foi possível elaborar os gráficos de microdureza das ligas em estudo (Figura 2) em relação aos perímetros descritos na seção 2.2.



**Figura 1** – Comparação entre o efeito de 0,03%Ni; 0,15%Ti na microdureza da liga base Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg.

Na Figura 2, observa-se, que não houve mudança significativa na microdureza das duas as ligas à medida que se afastaram da superfície. A liga com Ti apresenta valores maiores e

acima de 10% em relação a liga com Ni. É possível que este comportamento esteja associado ao aspecto da macro estrutura refinada. Este comportamento pode estar relacionado com a alta coerência do Ti com a matriz de alumínio (Mohanty e Gruzleski, 1995).

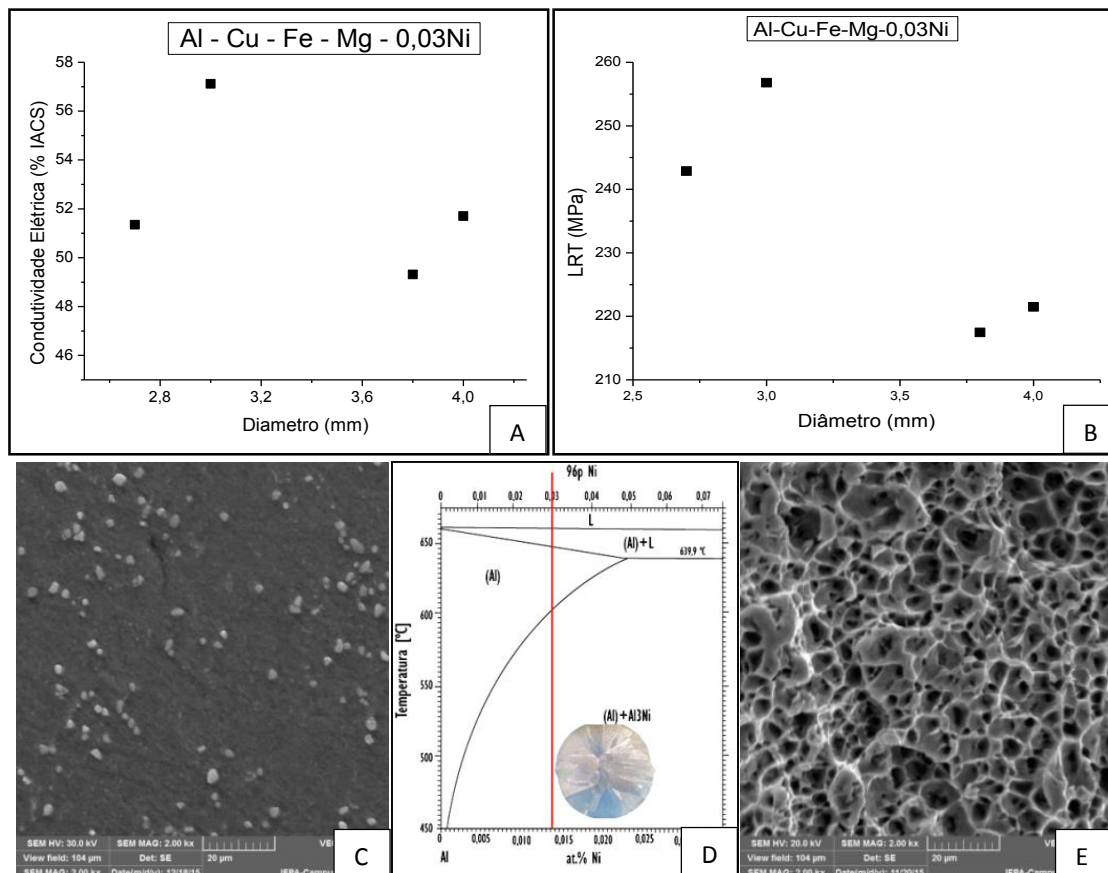
### 3.4. Caracterização elétrica e mecânica da liga base com 0,03%Ni

A Tabela 3 apresenta-nos os resultados dos ensaios de condutividade elétrica e Limite de resistência a tração (LRT) para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,03%Ni.

**Tabela 3** - Ensaio de condutividade elétrica e limite de resistência à tração.

Diâmetro (mm)	Al – Cu – Fe - Mg - 0,03%Ni	
	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (%IACS)	LRT (MPa)
2,7	51,35	242,88
3,0	57,12	256,8
3,8	49,31	217,47
4,0	51,7	221,48

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3 foi possível elaborar os gráficos de condutividade elétrica e LRT em função dos diâmetros estudados para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,03%Ni, apresentado na Figura 3.



**Figura 3** – Condutividade Elétrica e LRT em relação ao diâmetro para a liga Al – Mg - 0,03%Ni

O arranjo esquemático de gráficos e fotos das micrografias da Figura 3 são relativos à liga com 0,03%Ni. Neste arranjo é possível observar que o perfil com, maior grau de trabalho a frio, o fio com diâmetro de 3,0mm, apresenta os maiores valores para o LRT e para a condutividade elétrica. O que contrapõe a teoria de que a deformação plástica a frio ao elevar o LRT, 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 das temperaturas geradas na deformação a frio de metais) (Lima, 2014; Freitas, 2009; Santos, 2010). Também estão presentes nesta figura as imagens das partículas de segunda fase presentes no corte transversal, logo a abaixo das fraturas, e a fratura do fio de diâmetro de 3,0mm; onde pode ser notada a presença abundante de pequenas partículas de segunda fase que geraram as pequenas microcavidades geradas no ensaio de tração do fio. A forma da distribuição das pequenas partículas resultam em eficiente arranjo de ancoragem para o caminhar das discordâncias que em consequência contribuem para a formação das pequenas microcavidades. Tem-se ainda a Figura 3, que associa parte do diagrama Al-Ni, a indicação do teor de 0,03%Ni e a macro estrutura de grãos colunares grosseiros que foram deformados para dar origem aos demais componentes do arranjo da Figura 3.

### 3.5. Caracterização elétrica e mecânica da liga base com 0,15%Ti

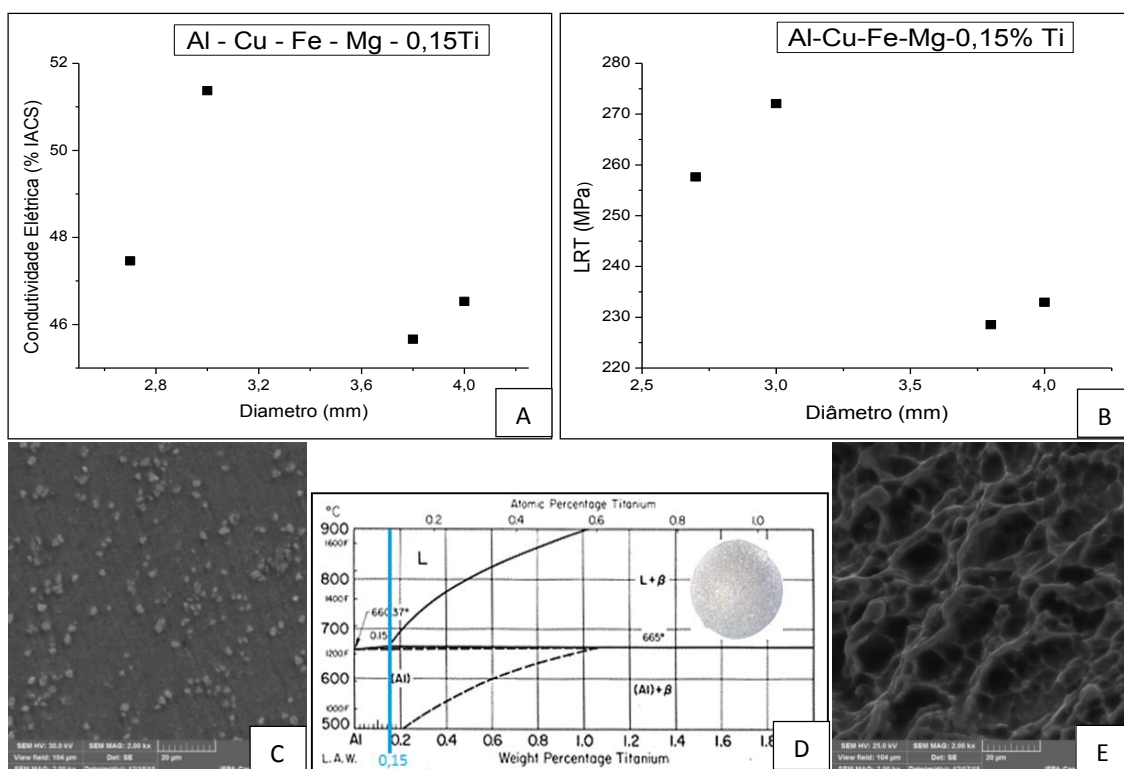
A Tabela 4 apresenta-nos os resultados dos ensaios de condutividade elétrica e Limite de resistência a tração (LRT) para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,15%Ti.

**Tabela 4** – Ensaio de condutividade elétrica e limite de resistência à tração.

Diâmetro (mm)	Al – Mg – 0,15%Ti	
	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (%IACS)	LRT (MPa)
2,7	47,46	257,61
3,0	51,37	272,07
3,8	45,66	228,54
4,0	46,53	232,95

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4 foi possível elaborar os gráficos de condutividade elétrica e LRT em função dos diâmetros estudados para a liga Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg-0,15%Ti, apresentado na Figura 4.





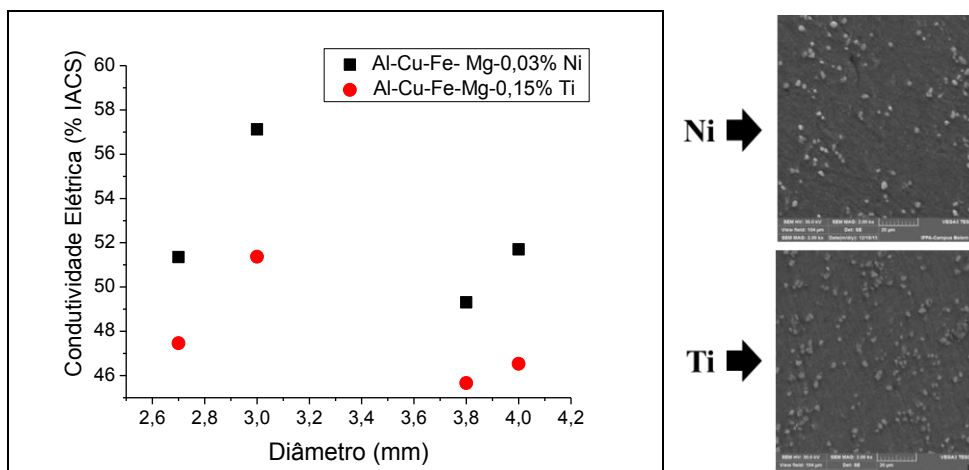
**Figura 4** – Condutividade Elétrica e LRT em relação ao diâmetro para a liga Al – Cu - Fe - Mg -0,15%Ti.

Da mesma forma que a liga com níquel, na Figura 4, 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 e para a condutividade elétrica, o que também contrapõe a teoria de que a deformação plástica a frio que ao elevar o LRT, 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).

Na Figura 4, observam-se as imagens das partículas de segunda fase presentes no corte transversal, logo a abaixo das fraturas, e o aspecto da fratura do fio de diâmetro de 3,0 mm da liga com Ti, onde se pode notar a presença de pequenas partículas de segunda fase que geraram as microcavidades no ensaio de tração do fio.

### 3.6. Comparação entre o efeito de 0,03%Ni e 0,15%Ti na condutividade elétrica da liga base

Com os resultados de condutividade elétrica das duas ligas apresentadas nas Tabelas 3 e 4, é possível comparar as ligas quanto à caracterização elétrica, como se pode ver na Figura 5.



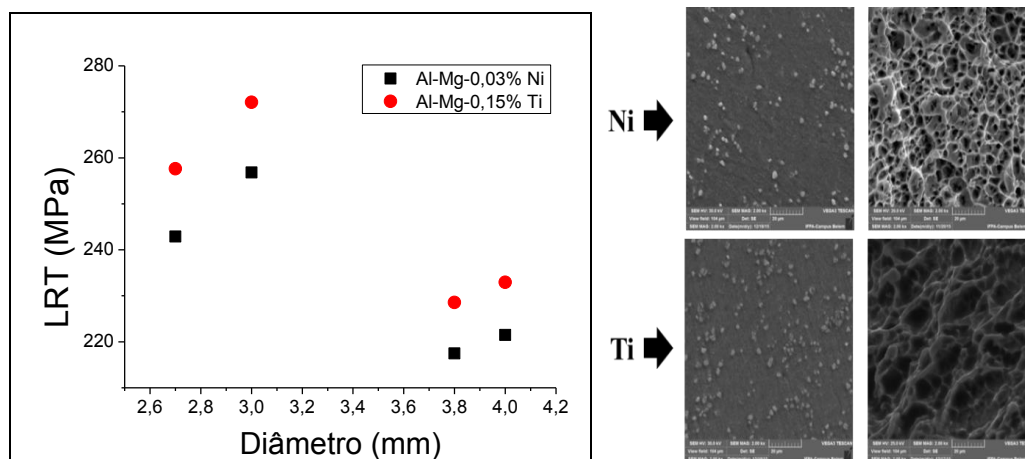
**Figura 5** – Comparação entre o efeito de 0,03%Ni e 0,15%Ti na condutividade elétrica da liga base Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg.

Pela Figura 5 observa-se que a liga com 0,03%Ni apresentou um melhor desempenho elétrico em relação à liga com 0,15%Ti. Segundo Jorge (2014), o titânio, apesar de ser um potente refinador de grão para ligas de alumínio, contribui para diminuir a capacidade de transmissão de energia elétrica destas ligas. Já segundo Yamada e Tanaka (1978) a adição de pequenos teores de Ni, até 0,1% em ligas de alumínio, tem pouco efeito sobre a condutividade elétrica. O níquel, mesmo não tendo grande influência na condutividade elétrica, consegue manter um melhor desempenho elétrico em ligas a base de alumínio em comparação com o titânio.

Com isso, pode-se constatar que na condição como fundido, o teor de 0,03%Ni, presente como solução sólida na liga, foi mais favorável à condutividade elétrica do que a solução sólida de 0,15%Ti.

### 3.7. Comparação entre o efeito de 0,03%Ni e 0,15%Ti no LRT da liga base

Com os resultados de limite de resistência a tração das duas ligas apresentados nas Tabelas 3 e 4, é possível comparar as ligas quanto à caracterização mecânica, como se pode ver na Figura 6.



**Figura 6** – Comparação entre o efeito de 0,03%Ni e 0,15%Ti no LRT da liga base Al-0,05%Cu-0,26%Fe-0,60%Mg.

Ao contrário da caracterização elétrica, a liga com 0,15%Ti apresentou um melhor desempenho mecânico, como se observa na Figura 6. Isso pode ter ocorrido, pois segundo Jorge (2014) a adição de 0,15%Ti em ligas de alumínio, contribui para o refinamento dos grãos e conseqüentemente a elevação do LRT da liga. Credita-se este comportamento devido a alta coerência do Ti com a matriz de alumínio (Mohanty e Gruzleski, 1995).

Com isso, pode-se concluir que na condição sem tratamento térmico e com deformação, o teor de 0,15%Ti, presente como solução sólida na liga, contribuiu mais na resistência mecânica da liga do que a solução sólida de 0,03%Ni.

#### 4. Conclusões

Diante da metodologia desenvolvida no presente estudo para observação da caracterização mecânica, elétrica e estrutural das ligas sem tratamento térmico, conclui-se:

Na condição sem deformação

A liga com níquel apresentou grãos predominantemente colunares, enquanto que a liga com a presença de titânio apresentou grãos predominantemente coquilhados devido ao potencial refinador do elemento Ti.

Na avaliação da microdureza, a liga com titânio apresentou um melhor desempenho em relação à liga com níquel.

Na condição com deformação:

Em relação à caracterização elétrica e mecânica, o diâmetro do fio que apresentou o melhor desempenho foi o de 3,0 mm, tanto para a liga com 0,03%Ni como para a de 0,15%Ti.

Em relação à condutividade elétrica, na condição sem tratamento térmico, o teor de 0,03%Ni, presente como solução sólida na liga, foi mais favorável do que a solução sólida de 0,15%Ti.

Em relação ao LRT, na condição sem tratamento térmico, o teor de 0,15%Ti, presente como solução sólida na liga, contribuiu mais na resistência mecânica do que a solução sólida de 0,03%Ni.

## 5. Referências

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM E 384-05a, U. S. A., 2005.

Associação Brasileira de Alumínio–ABAL. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/temperas.asp>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

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. 1981a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6810). Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, ago. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6815). Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981b.

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 de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

Inter Academy Council. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho, 1 ed., São Paulo, FAPESP, 2007, 301p.

JORGE, I.C.S. Estudo da coalescência de microcavidades na liga Al-0,05% Cu-[0,24-0,28]% Fe-0,7% Si modificada com os teores [0,05 e 0,15]% Ti para fins de transmissão [Tx] e distribuição [Dx] de energia elétrica. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

LIMA, J. A. 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 – Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2014.

MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1831421/Boletim\\_de\\_Monitoramento\\_do\\_Sistema\\_Eltrico\\_-\\_Dezembro-2013.pdf/f1bf83d8-337a-435d-8adc-661992b299b7](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1831421/Boletim_de_Monitoramento_do_Sistema_Eltrico_-_Dezembro-2013.pdf/f1bf83d8-337a-435d-8adc-661992b299b7)>. 2013. Acesso em 05 de março de 2016.

MOHANTY, P. S.; GRUZLESKI, J. E. Mechanism of grain refinement in aluminium. Acta metall. mater. Elsevier Science Ltd, Vol. 43, No. 5, pp. 2001-2012, 1995.

SANTOS, W. L. R. 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. Belém 2010.105f. Dissertação de Mestrado, Área de Concentração Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal do Pará - UFPA, 2010.

SENA, H. C. O. Avaliação do efeito do ferro em ligas de alumínio destinadas a condução de energia elétrica. Belém: 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área de

concentração materiais e processos de fabricação, ITEC, Universidade federal do Pará, Belém, 2015.

SOUZA,P. H. L. 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: 2013.112f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.