

INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES SOBRE UMA NOVA LIGA PARA FINS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA⁽¹⁾

Emerson David Cavalcante Santos⁽²⁾

Francisco Andrei Jucá Cavalcante⁽³⁾

Johnyson Pereira Feitosa⁽⁴⁾

Ulysses Rodrigues dos Prazeres⁽⁵⁾

José Maria do Vale Quaresma⁽⁶⁾

Resumo

Os cabos e fios elétricos de liga devem ser utilizados em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150 °C, sem que haja deterioração das características mecânicas como tração e alongamento, proporcionando assim, boa capacidade de transmissão de energia elétrica. Desta forma pensou-se em começar uma nova pesquisa buscando uma liga baseada no binário Al-Mg, modificada com teores de cobre (Cu), com características de termorresistividade. As ligas foram vazadas fixando o teor de Mg em 0,6% e adicionando Cu nos teores de 2,0; 1,5; 1,0; 0,6 e 0,3%. Os corpos de prova foram usinados em formas cilíndricas até o diâmetro de 11 mm e posteriormente laminadas a frio, até chegarem ao diâmetro de 3,90 mm. Os fios passaram por um tratamento térmico a 230 °C por 1h (Norma da COPEL). Segundo a norma, um fio é considerado termorresistente quando há um decréscimo de no máximo 10% no LRT, após o tratamento térmico. Foram feitos testes de tração afim de se avaliar a respostas das propriedades mecânicas e resistividades, objetivando avaliar as características de termorresistividade do material antes e depois do tratamento térmico. As análises mostraram que somente em duas composições químicas os fios responderam como termorresistentes, o fio com 0,6% Cu, que após o tratamento térmico sofreu um decréscimo de 5% no LRT e um aumento no alongamento, e o fio de 0,3% Cu, que teve o valor de LRT praticamente constante, porém sua ductilidade foi aumentada, modificando seu alongamento percentual de 2,5% para 4,6% após o tratamento.

Palavras-chave: Características mecânicas; Energia elétrica; Termorresistividade.

(1) – 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de Julho 2005, Minas Gerais.

(2) – Especialista em Tecnologia Mineral e Metalurgia Pela Universidade Federal do Pará.

(3) – Estudante do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

(4) – Estudante do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

(5) – Estudante do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

(6) – Professor Doutor do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos principais componentes da crosta terrestre e que compõe uma vasta aplicação hoje no ramo da indústria e do comércio. Na maioria das aplicações, o alumínio supera os materiais concorrentes devido suas propriedades, performances técnicas mais eficientes e satisfatórias para a obtenção de produtos com um custo mais baixo e conseqüentemente mais competitivo ao mercado. Todavia, o mesmo é misturado com outros elementos de ligas para adquirir maiores propriedades, tais como: de resistência mecânica, de conformabilidade, ductilidade, etc.

A importância dos metais na tecnologia moderna deve-se, em grande parte a facilidade com que podem ser conformados em formas úteis como tubos, barras e chapas finas. Estas formas úteis podem ser obtidas por processo de deformação plástica, por remoção metálica ou usinagem. A deformação plástica ou o conjunto da deformação plástica e fratura, são condicionantes importantes em que se apoiam à avaliação do processo de trabalhabilidade do metal [Dieter, 1976].

Com a crescente demanda na produção de Cabos utilizados na Transmissão e Distribuição de energia elétrica, associado a necessidade de aproveitamento otimizado das faixas de serviço, motivou o estudo de uma nova liga com performance elevada. Sendo assim em um mercado cada vez mais exigente, torna-se necessário um melhor aproveitamento dos Cabos utilizados na Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Neste sentido, este trabalho concentrou esforços em desenvolver uma Liga de Alumínio Termorresistente, com características bem próximas do desejado, ou seja, um cabo condutor capaz de inserir um ganho quando comparado com os tradicionais, como a liga 6101, permitindo a sua operação em altas temperaturas com ganhos de resistência a tração e redução de perdas, preservando assim as suas características mecânicas e elétricas.

MATERIAIS E MÉTODOS

A verificação da composição química da liga comercial de alumínio e das ligas com adição de 2,2%, 1,8%, 1%, 0,6% e 0,3% de Cu foram realizadas na ALUBAR utilizando espectrômetro de massa e os resultados obtidos para uma média de três análises é mostrada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química das ligas (%).

Al-2,2%Cu	Si	Fe	Cu	Ca	Mg	Zn	Ni	V	Al
	0,0563	0,2009	2,2588	0,0008	0,6615	0,0005	0,0097	0,0046	96,77
Al-1,8%Cu	Si	Fe	Cu	Ca	Mg	Zn	Ni	V	Al
	0,0580	0,2139	1,7899	0,0022	0,6020	0,0005	0,0124	0,0036	97,82
Al-1,0%Cu	Si	Fe	Cu	Ca	Mg	Zn	Ni	V	Al
	0,0561	0,1793	1,0516	0,0003	0,5854	0,0005	0,0086	0,0030	98,09
Al-0,6%Cu	Si	Fe	Cu	Ca	Mg	Zn	Ni	V	Al
	0,0571	0,1676	0,6153	0,0006	0,5841	0,0010	0,0073	0,0042	98,54
Al-0,3%Cu	Si	Fe	Cu	Ca	Mg	Zn	Ni	V	Al
	0,0675	0,2910	0,3118	0,0007	0,6254	0,0113	0,0070	0,0088	98,64

As ligas foram preparadas por fundição utilizando *alumínio comercial* em cadinhos de grafita, em um forno tipo mufla, marca EDG. As ligas foram vazadas fixando o teor de magnésio (Mg) em 0,6% e adicionando Cu nos teores de 2,2; 1,8; 1,0; 0,6 e 0,3%, em um molde com o formato de “U”, para que fosse possível retirar corpos de prova cilíndricos. Esses corpos de prova foram usinados até 11 mm de diâmetro. Após a usinagem os mesmos foram laminados a frio, em um laminador duo elétrico com canal circular, sendo feitos sucessivos passes até chegarem a fios de aproximadamente 3,90 mm de diâmetro.

Os fios deformados a frio passaram por um tratamento térmico a 230°C por 1h (de acordo com norma da COPEL para fios de ligas termorresistentes). Foram feitos testes de tração em uma máquina Kratos para fios (modelo MD 2000), antes e após o tratamento, a fim de se avaliar as respostas das propriedades mecânicas do material (limite de resistência à tração e alongamento) ante ao tratamento térmico, e se o mesmo seria ou não uma liga termorresistente. Também foram feitos testes de resistividade elétrica nos fios da liga.

As amostras a serem examinadas no MEV forem limpas com uma solução de álcool+acetona (PA) em um limpador ultra-sônico por 10 min. As amostras foram caracterizadas utilizando análises macroscópicas e microscópicas.

A análise da microestrutura da superfície das amostras após ensaios de tração foi feita em um (MEV) microscópio eletrônico de varredura LEO, modelo 1450VP, equipado com detector de elétrons retroespalhados (EBSD).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados de Condutividade Elétrica e dos Ensaios de tração

Após a laminação a frio dos corpos de prova até o diâmetro de aproximadamente 3,90 mm, fez-se testes de resistividade, a fim de se avaliar a condutividade elétrica da liga Al-Mg-Cu. A figura 1 mostra o gráfico da condutividade elétrica em função do teor de Cu na liga Al-Mg-Cu.

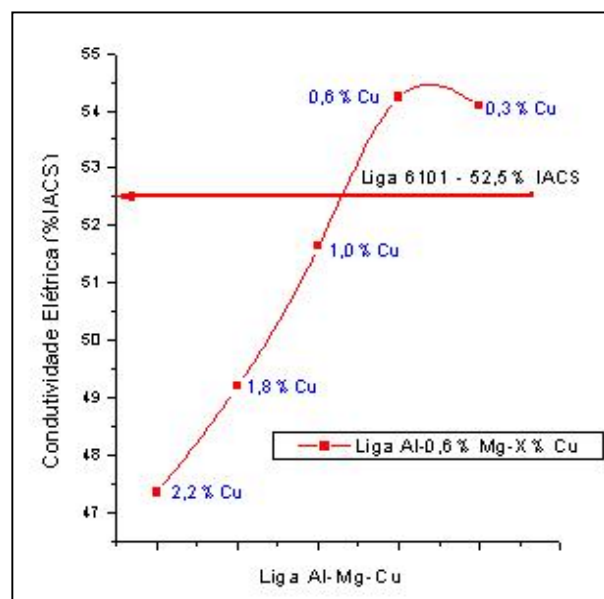


Figura 1. Gráfico da Condutividade elétrica em função do teor de Cu.

De acordo com o gráfico da figura 1, uma liga apresentou resposta próxima da liga 6101 (1,0%Cu – 51,5% IACS) e duas ligas (0,6%Cu e 0,3%Cu, 54,24 e 54,09% IACS, respectivamente) apresentaram valores acima dos estipulados pela norma NBR 5285/1985 para fios-liga 6101.

Foram feitos ensaios de tração nos fios para que se fosse possível avaliar o comportamento trativo da Al-Mg-Cu, em função da composição química e do tratamento térmico aplicado a 230°C por 1h. Neste trabalho foi aplicado um conceito de ligas termorresistentes, que diz que o LRT dos fios de liga deve permanecer praticamente constante ou sofrer uma diminuição no valor de até 10% após tratamento térmico a 230°C por 1h (norma da COPEL). A Figura 2 mostra os gráficos da Resistência à Tração e do alongamento percentual.

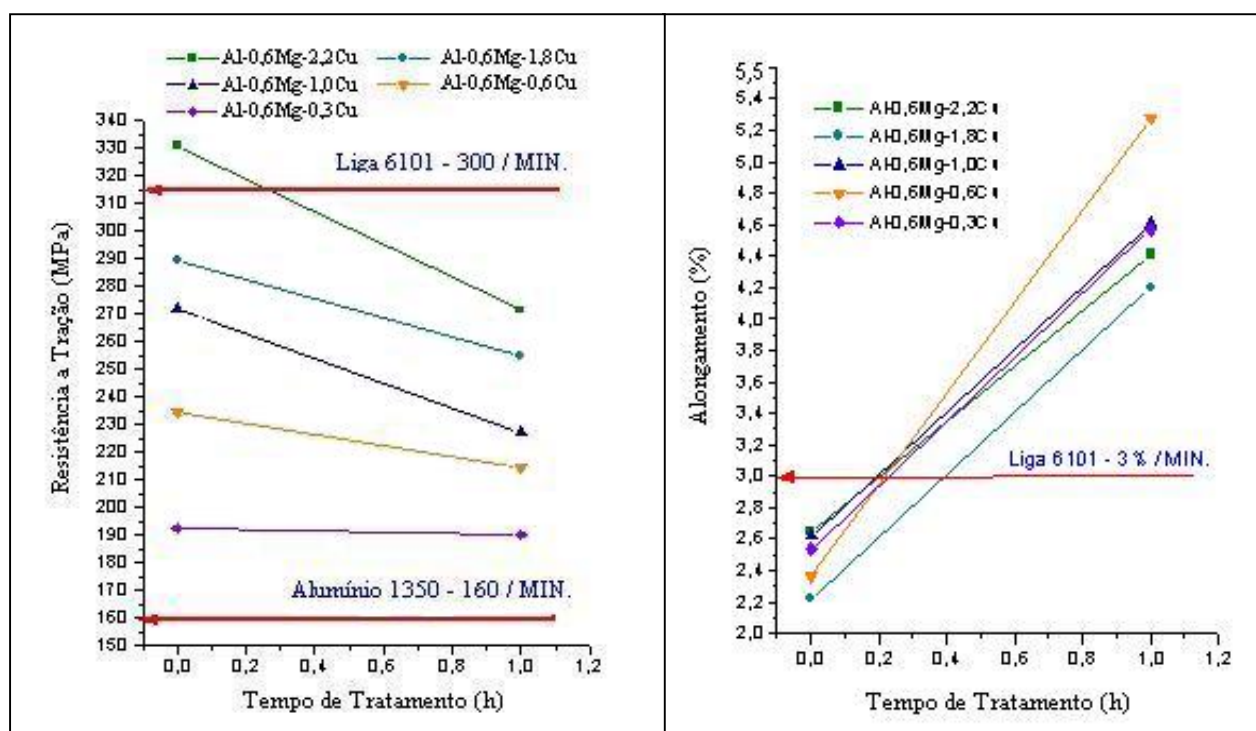


Figura 2. Resultados dos ensaios de tração antes e após tratamento térmico a 230°C por 1h. (a) Gráfico de Resistência à tração. (b) Gráfico do alongamento percentual.

O gráfico da Figura 2a mostra que o Limite de Resistência à Tração (LRT) decresce com a diminuição do teor de Cu na liga. Por exemplo, a liga Al-0,6%Mg-2,2%Cu apresentou o maior valor de LRT, porém o valor do alongamento não foi o menor dentre os demais (figura 2b). A liga com 0,3%Cu apresentou o menor valor de LRT e maior alongamento. Isso se deve ao fato de que o Cu aumenta a resistência mecânica da liga. Pode ser visto também no gráfico 2b, que o alongamento praticamente dobra após o tratamento térmico em todas as ligas. As linhas vermelhas nos gráficos indicam os valores de LRT, para o diâmetro estudado, contidos nas normas de fios de alumínio 1350 (norma NBR 5118/1985) e liga 6101 (norma NBR 5285/1985). Os valores de LRT obtidos neste trabalho estão variando entre o mínimo LRT para fios-liga 6101 e fio de alumínio 1350, com diâmetro de aproximadamente 3,90mm. Levando em consideração a termorresistência dos fios, somente em duas composições químicas os fios responderam como

termorresistentes, o fio com 0,6%Cu, que após o tratamento sofreu um decréscimo de 5% no LRT, e o fio com 0,3%Cu, que teve o valor de LRT praticamente constante (figura 2a), porém sua ductilidade foi melhorada, modificando seu alongamento percentual de 2,5% para 4,6%, após o tratamento térmico (Figura 2b).

Analisando as Figuras 1 e 2, pode-se perceber que a liga com 0,3% de Cu apresenta um valor de condutividade elétrica (54,09% IACS) que atende à norma para fios de liga, porém o seu LRT ficou abaixo do esperado para fios-liga (192 MPa) com diâmetros acima de 3,50mm (de acordo com a norma NBR 5285/1985). Com isso, sugere-se adicionar à liga Al-0,6%Mg-0,3%Cu, um percentual fixo de silício (Si) com o intuito de se aumentar a valor do LRT da liga, e assim, então, alcançar o valor de LRT proposto pela norma.

Análise Microscópica via MEV

Liga Al-0,6%Mg-2,2%Cu sem tratamento térmico

As superfícies de fratura dos corpos de prova após ensaios de tração foram analisadas via MEV. A figura 3 mostra a superfície de fratura da liga Al-0,6%Mg-2,2%Cu antes do tratamento térmico.

Analisando as micrografias da Figura 3, nota-se que a superfície de fratura apresenta comportamento frágil, por não apresentar estrição e nem deformação acentuada dos grãos da matriz da liga (Figura 3d). Isso se deve provavelmente à presença do Cu em um teor mais elevado (2,2%).

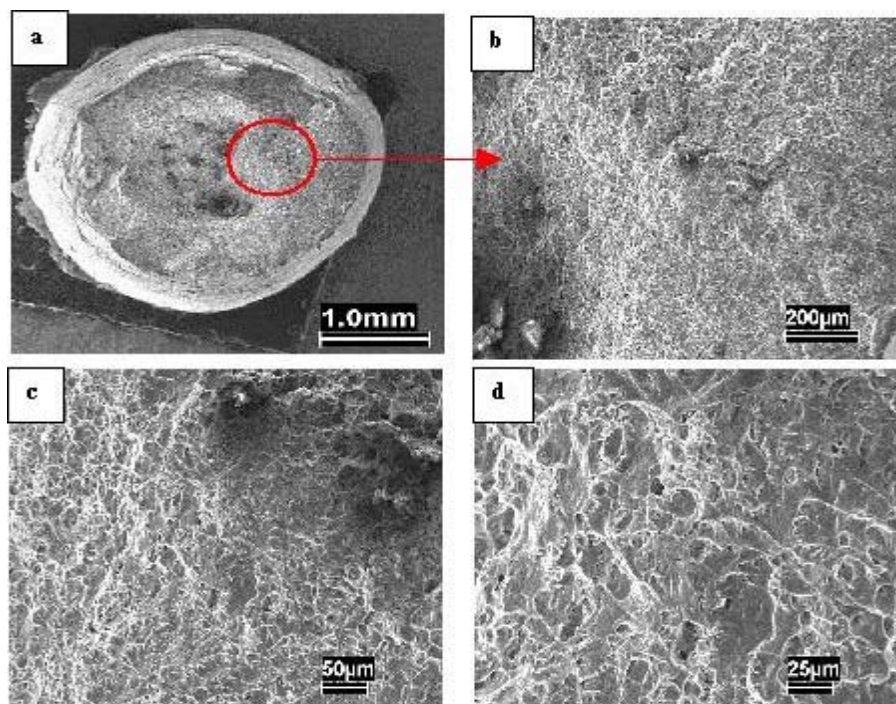


Figura 3. Micrografias de fratura no MEV. (a) ampliação de 25x; (b) ampliação de 100x do detalhe de (a); (c) 250x; (d) 500x.

Na Figura 4, pode-se visualizar a análise da composição química da superfície de fratura. Nota-se no gráfico da Figura 4b que o Cu tem uma tendência de acompanhar o Mg na superfície de fratura analisada e que o Fe apresenta

comportamento diferente dos outros elementos, chegando a atingir um pico de 3% no ponto 4 da Figura 4b.

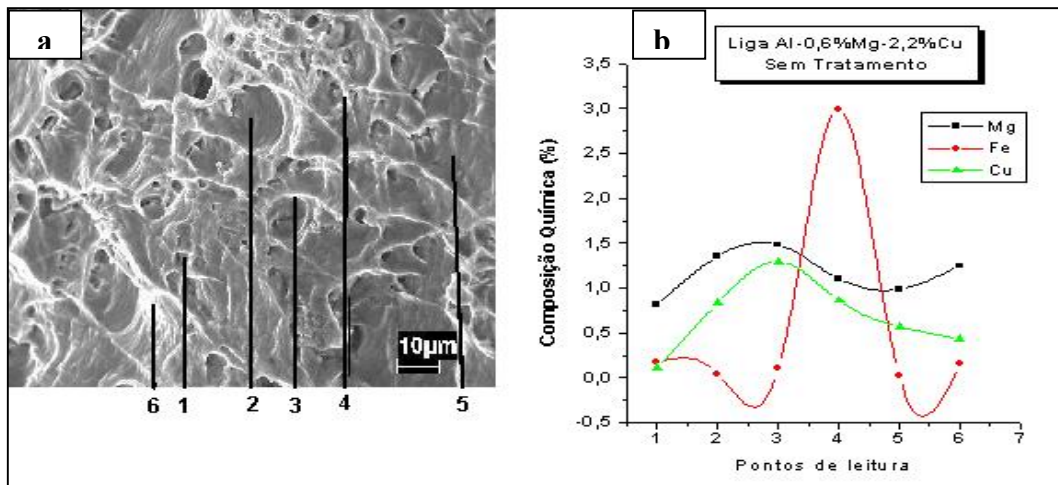


Figura 4. Análise da composição química da fratura via MEV. (a) Micrografia da fratura, indicando os pontos analisados. (b) Gráfico da análise química.

Liga Al-0,6%Mg-2,2%Cu com tratamento térmico a 230°C por 1h

A Figura 5 mostra a superfície de fratura da liga Al-0,6%Mg-2,2%Cu após o tratamento térmico.

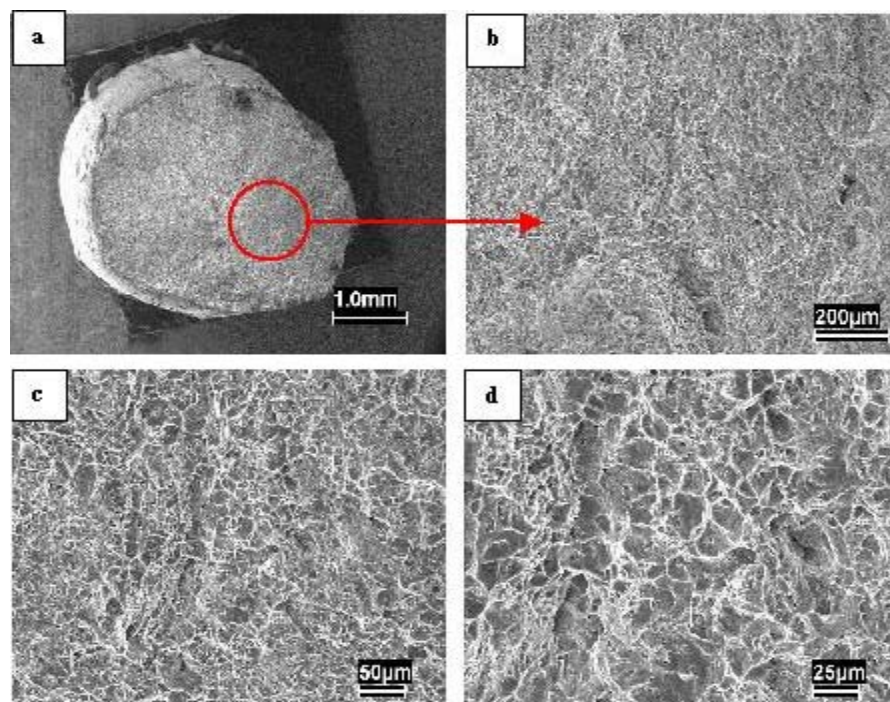


Figura 5. Micrografias de fratura no MEV. (a) ampliação de 25x; (b) ampliação de 100x do detalhe de (a); (c) 250x; (d) 500x.

Analisando as micrografias da Figura 5, nota-se que a superfície de fratura apresenta comportamento frágil, por não apresentar estrição. Porém, pode-se perceber na Figura 5d, que os grãos já começam a sofrer alguma deformação, em

comparação com a mesma liga da Figura 3d. Isso ocorreu por causa do efeito do tratamento térmico na estrutura da liga, fazendo com que a mesma ganhasse certa ductilidade.

A Figura 6 mostra a análise da composição química da superfície de fratura para a liga Al-0,6Mg-2,2Cu após o tratamento térmico.

O gráfico da Figura 6b mostra que o Cu tem uma tendência de acompanhar o Mg na superfície de fratura analisada e que o Fe apresenta comportamento diferente dos outros elementos, apresentando maior mobilidade nos contornos de grão.

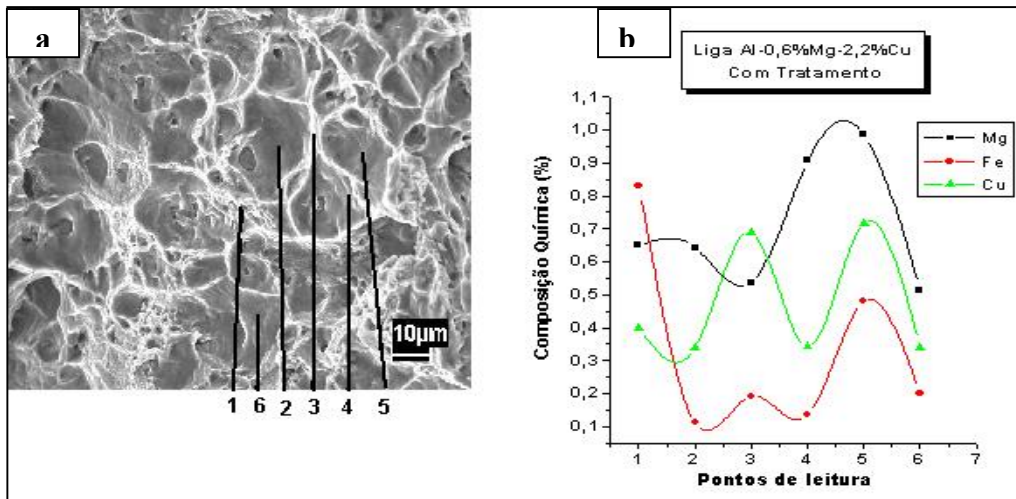


Figura 6. Análise da composição química da fratura via MEV. (a) Micrografia da fratura, indicando os pontos analisados. (b) Gráfico da análise química.

Liga Al-0,6%Mg-0,6%Cu sem tratamento térmico

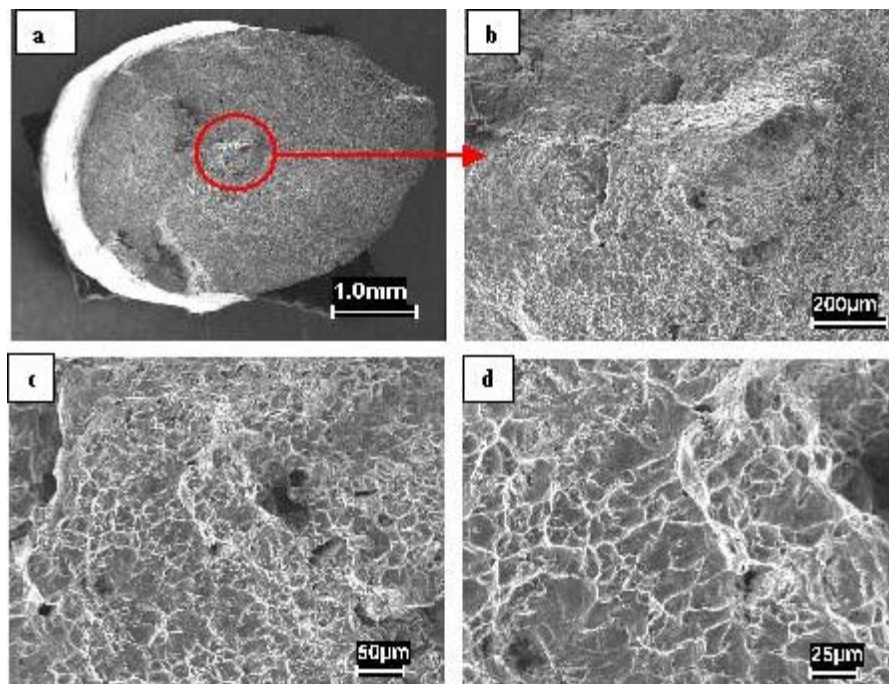


Figura 7. Micrografias de fratura no MEV. (a) ampliação de 25x; (b) ampliação de 100x do detalhe de (a); (c) 250x; (d) 500x.

Analisando as micrografias da Figura 7, nota-se que, mesmo com um teor relativamente baixo, a superfície de fratura apresenta comportamento de transição de fratura frágil para dúctil, apresentando pequena estrição e deformação dos grãos da matriz da liga (Figura 7d).

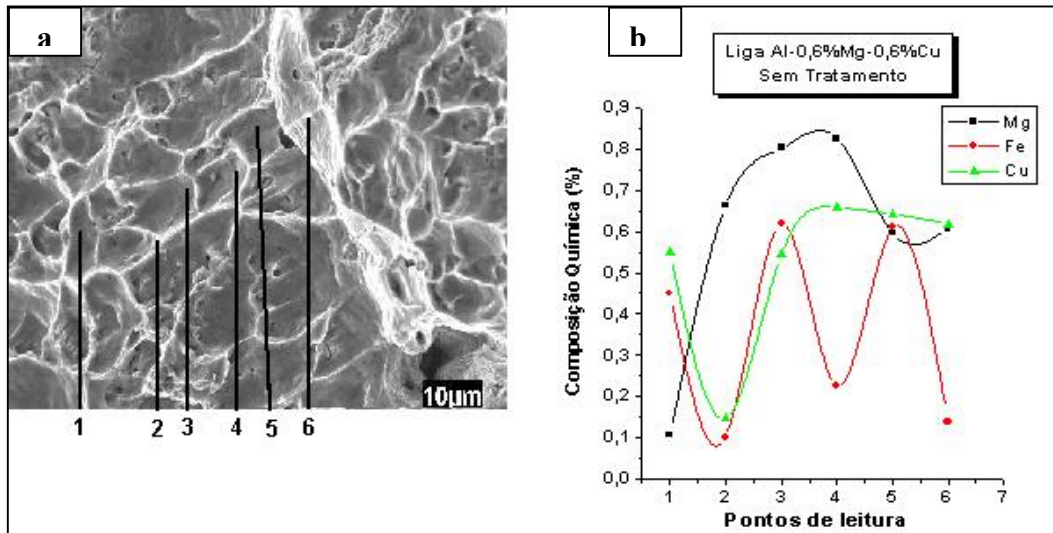


Figura 8. Análise da composição química da superfície de fratura via MEV. (a) Micrografia da fratura, indicando os pontos analisados. (b) Gráfico da análise química.

A Figura 8 mostra a análise da composição química da superfície de fratura para a liga Al-0,6%Mg-0,6%Cu sem tratamento térmico. A Figura 8 mostra que o Cu tem mais uma vez a tendência de acompanhar o Mg na superfície de fratura analisada e que o Fe apresenta comportamento diferente dos outros elementos, apresentando maior mobilidade nos contornos de grão.

Liga Al-0,6%Mg-0,6%Cu com tratamento térmico a 230°C por 1h

A Figura 9 mostra a superfície de fratura da liga Al-0,6%Mg-0,6%Cu após o tratamento térmico.

Analisando as micrografias da Figura 9, nota-se que a superfície de fratura apresenta comportamento dúctil, apresentando estrição na superfície de fratura (Figura 9a). Pode-se perceber na Figura 9d, que os grãos estão, de certa forma, deformados. Isso ocorreu por causa do efeito do tratamento térmico na estrutura da liga e do baixo teor de Cu (0,3%).

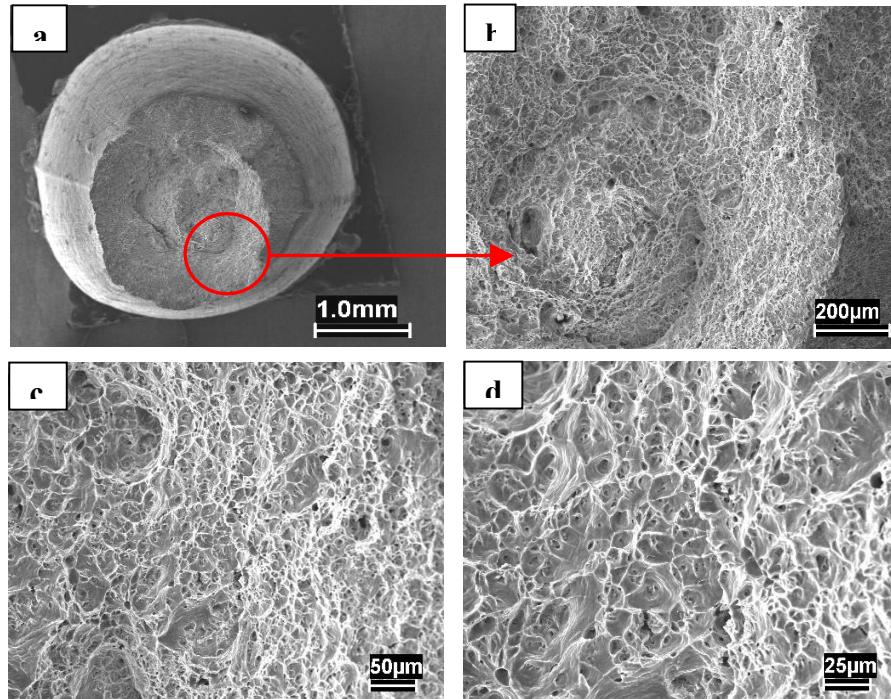


Figura 9. Micrografias de fratura no MEV. (a) ampliação de 25x; (b) ampliação de 100x do detalhe de (a); (c) 250x; (d) 500x.

A Figura 10 mostra a análise da composição química da superfície de fratura para a liga Al-0,6%Mg-0,6%Cu após o tratamento térmico.

A Figura 10 mostra que o Cu modificou seu comportamento em comparação com os gráficos anteriores. O Mg teve comportamento quase constante na superfície de fratura analisada e o Fe apresenta comportamento diferente dos outros elementos.

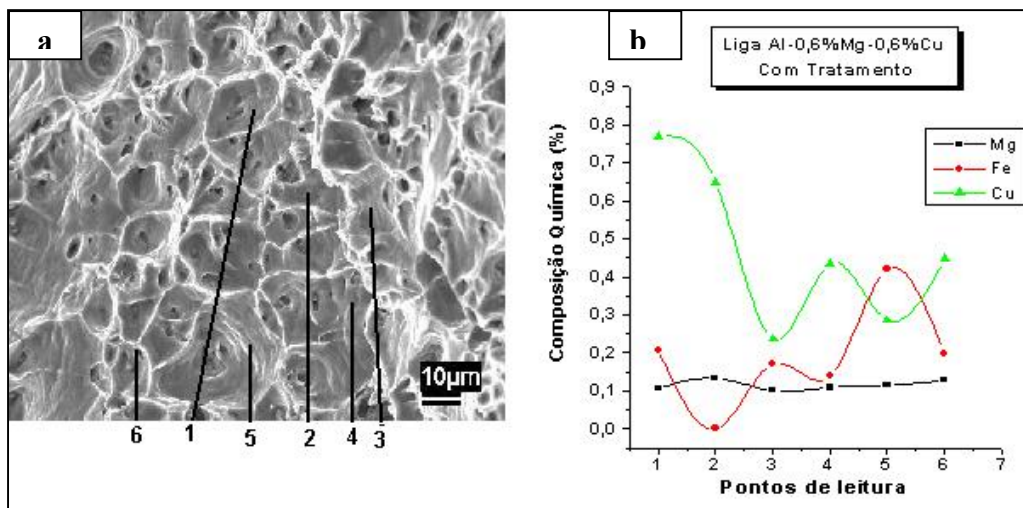


Figura 10. Análise da composição química da superfície de fratura. (a) Micrografia da fratura, indicando os pontos analisados. (b) Gráfico da análise química.

CONCLUSÃO

Em termos de Resistência à tração, a liga Al-Mg-Cu, os valores foram decrescendo com a diminuição do teor de Cu na liga. Conseqüentemente, o

alongamento aumentou à medida que diminuiu o teor de Cu e após o tratamento térmico. Então, pode-se concluir que o tratamento térmico de 230°C por 1h promoveu aos fios laminados da liga Al-Mg-Cu uma recuperação na estrutura interna do material, e, portanto maior ductilidade.

Os valores de LRT obtidos neste trabalho estão variando entre o mínimo LRT para fios-liga 6101 e fio de alumínio 1350, com diâmetro de aproximadamente 3,90mm. Levando em consideração a termorresistência dos fios, somente em duas composições químicas os fios responderam como termorresistentes, o fio com 0,6%Cu, que após o tratamento sofreu um decréscimo de 5% no LRT, e o fio com 0,3%Cu, que teve o valor de LRT praticamente constante, porém sua ductilidade foi melhorada, modificando seu alongamento percentual de 2,5% para 4,6%, após o tratamento térmico.

A liga com 0,3% de Cu apresenta um valor de condutividade elétrica (54,09% IACS) que atende à norma para fios de liga, porém o seu LRT ficou abaixo do esperado para fios-liga (192 MPa) com diâmetros acima de 3,50mm (de acordo com a norma NBR 5285/1985). Com isso, sugere-se um estudo mais detalhado para que se possa adicionar à liga Al-0,6%Mg-0,3%Cu um outro elemento com o intuito de se aumentar a valor do LRT da liga, e assim, então, alcançar o valor de LRT proposto pela norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BRESCIANI, E. F. [et al]; **“Conformação Plástica dos Metais”**, 5ª Ed., Editora da Unicamp, 1997, p. 25, 26, 211, 212, 214, 215, 217 e 218.
- 2 CALLISTER, JR W. D.; **“Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução”**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2002.
- 3 DIETER, G. E.; **“Mechanical Metallurgy”**, McGraw-Hill Kogakusche, Ltd. International Student Edition. American Society for Metals-ASM, Vol. 1, Ohio, USA, 1976, p. 774.
- 4 DUBOURG, L. PELLETIER; VAISSIERE, D.; HLAWKA, F.; CORNET, A.; **“Mechanical Characterisation of Laser Surface Alloyed Aluminium-Coppers Systems”**; volume 253, 2002, p. 1077-1085.
- 5 GAVGALI, M; AKSAKAL, B.; **“Effects of various homogenisation treatments on the hot workability of ingot aluminium alloy AA2014”**. Materials Science and Engineering A254, 1998, p. 189–199.
- 6 Norma NBR 5118/1985 para fios de alumínio 1350; Norma NBR 5285/1985 para liga 6101 e Norma da COPEL para Fios e Cabos de alumínio.
- 7 TAHA NAHED, A.; MOHAMED, A. EL-MAHALLAWY; RAWIA, M. HAMOUDA; **“Relationship Between Formability and Cast Structures in chilled Directionally Solidified Al-Cu Alloys”**, Materials and Design, volume 23, 2002, p. 195-200.

THE INVESTIGATION ABOUT NEW ALLOY TO DRAWING WIRES AND CABLES FOR ELECTRIC ENERGY TRANSMISSION ⁽¹⁾

Emerson David Cavalcante Santos⁽²⁾

Francisco Andrei Jucá Cavalcante⁽³⁾

Johnyson Pereira Feitosa⁽⁴⁾

Ulysses Rodrigues dos Prazeres⁽⁵⁾

José Maria do Vale Quaresma⁽⁶⁾

Abstract

The electric wires and cables manufactured with alloy are inevitably used like a continue system of work subjected at heat to 150°C, without to be submitted to deterioration of mechanical characterization like a strength and stress, providing good transmission capacity of electric energy. Thus, it is thought in starting a new investigation to looking for a new alloy based by Al-Mg binary alloy, modified with cooper (Cu) content amount, with heat-resistant characteristics. Alloys was casting to keeping amount 0.6Mg wt% chemical content and adding amount 0.2, 1.5, 1.0, 0.6 and 3.0 Cu wt% content. The test specimen was machined cylindrical form until the diameter of 11 mm and after, cold rolled, even keeps of diameter of 3.90 mm. The wires were heat treated at 1h for 230 °C (COPEL Norm). In agreement with norm, the wire is heat-resistant when tensile strength at the most decreases 10%, after heat treatment. Were accomplished tension test to evaluate mechanical properties and electric resistivity properties, with the objective to evaluate heat-resistant characteristics of alloy both before and after of heat treatment. The analyses showed that only two chemical content the wires was heat resistant, the wire with chemical content 0.6Cu (wt%), after heat treatment, tensile strength decreased 5% and the prolongation increased these wire, and the wire with 0.3 Cu wt%, obtained the largest value practically constant, however, the ductility these wire was increased, modifying the percentual prolongation after heat treatment of 2.5% to 4.5%.

Key-words: Mechanical characteristic; Electric energy; Heat-resistant.

(1) 60th Annual Congress ABM, July 25th to 28th, 2005, Minas Gerais.

(2) – Specialist in Mineral Technology and Metallurgy for the Para Federal University.

(3) – Mechanical Engineering Graduation Student for the Para Federal University.

(4) – Mechanical Engineering Master's Degree Student for the Para Federal University.

(5) – Mechanical Engineering Graduation Student for the Para Federal University.

(6) – Mechanical Engineering Teacher Doctor for the Para Federal University