

ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DO TEOR DE Cu NA TRABALHABILIDADE DA LIGA Al-Mg-Cu¹

Washington Luis Reis Santos²
Johnyson Pereira Feitosa³
Emerson David Cavalcante Santos²
Emmanuelle Sá Freitas²
José Maria do Vale Quaresma⁴

Resumo

A presente pesquisa tem como objetivo analisar o efeito de diferentes teores de Cobre na trabalhabilidade da liga Al-Mg-Cu submetida a um processo de laminação a frio, bem como, fazer uma comparação com a liga Al-Mg-Si (6101), comumente utilizada na indústria para a fabricação de cabos condutores de energia elétrica. Foram feitas ligas bases de alumínio com 0,6% Mg e posteriormente modificou-se com Cu nos teores de 2,2; 1,8; 1,0; 0,6 e 0,3%, em um molde com formato de "U". Após a usinagem os corpos de prova foram laminados a frio, em um laminador com canal circular, sendo feitos sucessivos passes até chegarem a fios de aproximadamente 3,90 mm de diâmetro. Os fios passaram por um rápido tratamento térmico a 230°C por 1h. As amostras foram submetidas a um ensaio de tração, antes e após o tratamento, a fim de se avaliar as respostas das propriedades mecânicas do material perante o tratamento térmico. Também foram feitos testes de condutividade elétrica nos fios da liga. A partir dos resultados obtidos foi possível observar que a liga Al-Mg-Cu possui boa trabalhabilidade, em todos os percentuais de Cobre, a liga com 0,3% de Cu apresentou condutividade elétrica que atende à norma para fios de liga 6101, porém o seu Limite de Resistência à Tração (LRT) ficou abaixo do esperado para fios de liga 6101, com diâmetros acima de 3,50 mm.

Palavras-chave: Trabalhabilidade; Laminação a frio; Tratamento térmico.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE VARIATION IN CONTENT OF Cu ON WORKABILITY OF THE Al-Mg-Cu ALLOY

Abstract

This research aims to analyze the effect of different levels of copper in the workability of the alloy Al-Mg-Cu subjected to a process of cold rolling, and make a comparison with the Al-Mg-Si (6101) alloy, commonly used in industry for the manufacture of cable conductors of electricity. Bases were made of aluminum alloy with 0.6% Mg and was later modified with the Cu content of 2.2, 1.8, 1.0, 0.6 and 0.3%, in a mold with format " U ". After the machinability, the specimens were cold rolled until arrive in wires with 3.90mm of diameter. The wires passed for a heat treatment at 230°C for 1 h. Traction tests were made, before and after treatment in order to evaluate the responses of the mechanical properties of the material before the heat treatment. Tests were also made in the electrical conductivity of the alloy wire. From the results it was possible to observe that the Al-Mg-Cu alloy has good workability, in all of Cu contents. The 0.3%Cu alloy presented good electrical conductibility that answers to 6101 alloy wire standards, but the tensile strength was below of the waited for 6101 alloy wires, with diameters greater than 3.90 mm.

Key words: Workability; Cold rolled; Heat treatment.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Mestrando em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará.

³ Mestre em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará.

⁴ Pós-doutor em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará.

1 INTRODUÇÃO

O mercado de cabos para transporte e distribuição de energia elétrica tem crescido bastante nos últimos anos, principalmente o de cabos de ligas de alumínio, graças à boa propriedade mecânica aliada a alta condutividade e peso reduzido desses cabos.

Na processo de obtenção de ligas de alumínio mais eficientes para fins de condução elétrica é necessário uma investigação prévia dos elementos químicos que devem compor o sistema. Prazeres⁽¹⁾ diz que um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Mas para isso, é preciso conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento para fazer a melhor seleção.

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos já presentes no material e com a sua interação com os demais. Existem elementos que conferem à liga as suas características principais (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes etc.) e elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

O principal aspecto que é abordado neste estudo é a influência do cobre na trabalhabilidade da liga. Quaresma⁽²⁾ descreve que: “do ponto de vista tecnológico, a estrutura do material é de suma importância, tendo em vista que a mesma esta correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas do material da peça” e segundo Dieter:⁽³⁾ “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”. Outros autores como Gavgali e Aksakal⁽⁴⁾ afirmam que Melhorar a trabalhabilidade significa melhorar a capacidade de processar os materiais Então a partir destas afirmações foi proposta a avaliação desta característica nas ligas que compõem este estudo.

De maneira geral Os cabos condutores devem ter boas características de limite resistência a tração associadas a uma baixa resistência elétrica, assim como ter boa trabalhabilidade, pois esta característica lhe permite ser processado sem que ocorra falha ou trinca no material. Deste modo a pesquisa por uma liga de alumínio que acumule esses vários aspectos é a base de investigação do grupo GPEMAT. Neste estudo priorizamos avaliar o efeito da variação teor de Cobre na trabalhabilidade da liga Al-Mg-Cu deformada a frio, bem como fazer uma comparação com a liga Al-Mg-Si (6101), utilizada industrialmente para a fabricação de cabos condutores de energia elétrica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas foram obtidas por fundição direta utilizando alumínio comercial em cadinhos de grafita, em um forno tipo mufla. Foi fixado o teor de magnésio (Mg) em 0,6% e adicionado 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. Aparato utilizado é mostrado conforme a Figura 1 Para a verificação da composição química das ligas foi utilizado um espectrômetro óptico Spectro, de propriedade da

empresa parceira nas pesquisas. Foram feitas três análises a fim de se obter uma média, a tabela com os resultados alcançados é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das ligas (%)

Al-2,2%Cu	Si 0,0563	Fe 0,2009	Cu 2,2588	Ca 0,0008	Mg 0,6615	Al 96,77
Al-1,8%Cu	Si 0,0580	Fe 0,2139	Cu 1,7899	Ca 0,0022	Mg 0,6020	Al 97,82
Al-1,0%Cu	Si 0,0561	Fe 0,1793	Cu 1,0516	Ca 0,0003	Mg 0,5854	Al 98,09
Al-0,6%Cu	Si 0,0571	Fe 0,1676	Cu 0,6153	Ca 0,0006	Mg 0,5841	Al 98,54
Al-0,3%Cu	Si 0,0675	Fe 0,2910	Cu 0,3118	Ca 0,0007	Mg 0,6254	Al 98,64

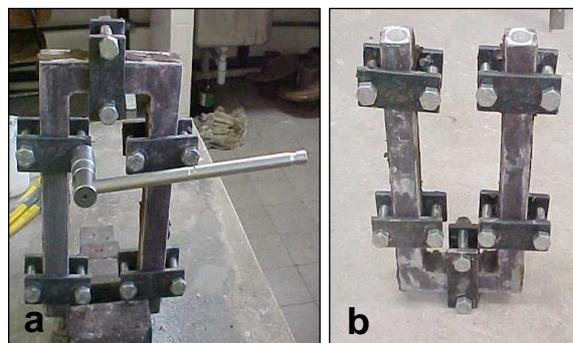


Figura 1 - Molde bi-partido em forma de “U” : (a) montagem das presilhas de fixação e calafetado com argamassa refratária;(b) montado aguardando vazamento.⁽¹⁾

Os corpos de prova obtidos através da solidificação foram usinados até 11 mm de diâmetro. Após a usinagem os mesmos foram laminados a frio, em um laminador elétrico com canal circular como mostrado na Figura 2. Foram feitos sucessivos passes até chegarem a fios de aproximadamente 3,90 mm de diâmetro para atender a norma para cabos e fios.

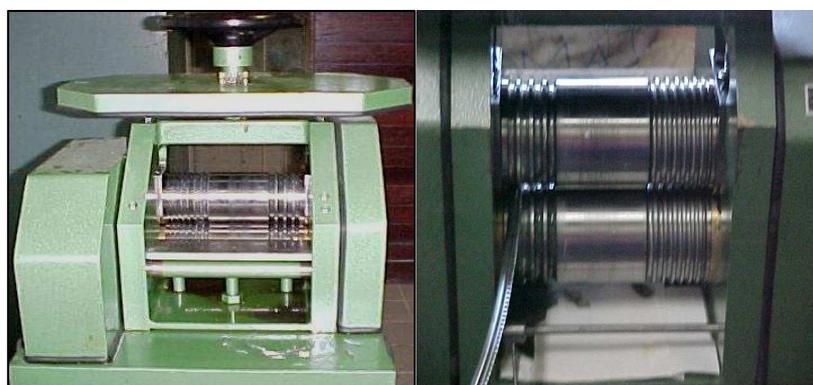


Figura 2 - Laminador elétrico utilizado no trabalho.⁽⁵⁾

Os fios obtidos por deformação a frio foram submetidos a um tratamento térmico, em uma temperatura de 230°C por 1h (caracterizado como uma exigência

da COPEL, para fios de ligas termoresistentes, que determina a variação máxima de até 10%, nos valores das propriedades resultantes dos ensaios de tração após este tratamento térmico). Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Kratos para fios (modelo MD 2000), antes e após o tratamento térmico, a fim de se avaliar as respostas das propriedades mecânicas do material (LRT e alongamento) ante a ação de temperatura elevada para a verificação da termoresistividade do material. Os testes de resistividade elétrica dos fios das ligas obedeceram à norma NBR 5285/1985.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS

Foram realizados ensaios de tração nos fios como forma de se efetuar a caracterização mecânica da liga 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 sofrer uma variação no valor de até 10%, após tratamento térmico (exigência para cabos com características termoresistente proposto pela Copel). A Figura 3 mostra o gráfico da Resistência à Tração versus Tempo de tratamento térmico.

O Gráfico da Figura 3(a) 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 e menor alongamento (Figura 4b), enquanto que a liga com 0,3%Cu apresentou o menor valor de LRT, conseqüentemente, maior alongamento. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que o Cu aumenta a resistência mecânica da liga. Pode ser visto também na Figura 4(b), 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)⁽⁷⁾ e liga 6101 (norma NBR 5285/1985).⁽⁶⁾ 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 3,90 mm. 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 3a), porém sua ductilidade foi melhorada, modificando seu alongamento percentual de 2,5% para 4,6%, após o tratamento térmico (Figura 3b).

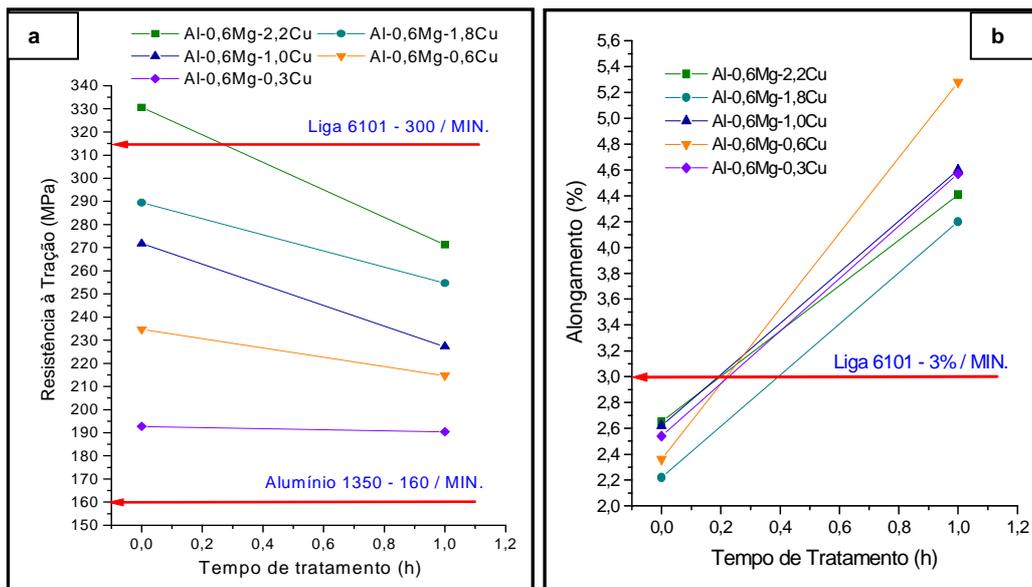


Figura 3 - Resultados dos ensaios de tração antes e após tratamento térmico a 230°C por 1h. (a) Gráfico de Resistência à tração. (b) Gráfico do alongamento percentual.⁽⁵⁾

3.1 Resultados de Condutividade Elétrica e dos Ensaio de tração

A Figura 4 mostra o gráfico da condutividade elétrica em função do teor de Cu na liga Al-Mg-Cu.

De acordo com o gráfico abaixo, uma liga apresentou resposta próxima da liga 6101 (1,0%Cu – 51,5% IACS, ponto 3) e duas ligas (0,6%Cu e 0,3%Cu, 54,24 e 54,09% IACS, respectivamente nos pontos 4 e 5) apresentaram valores acima do estipulado pela norma NBR 5285/1985⁽⁶⁾ para fios-liga 6101, que é de 52,5 %IACS.

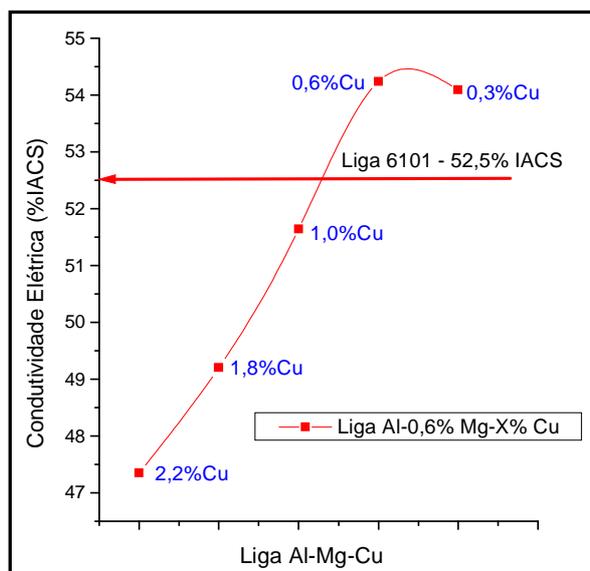


Figura 4 - Gráfico da Condutividade elétrica em função do teor de Cu na liga Al-0,6%Mg-X%Cu.⁽⁵⁾

4 DISCUSSÕES

As ligas com diversos teores de Cu apresentaram boa trabalhabilidade, deformando sem apresentarem trincas. 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, visto que a liga foi proposta com o objetivo de utilizá-la para a fabricação de cabos condutores elétricos.

Através da Análise das Figuras 3 e 4, 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).⁽⁶⁾ Estes resultados sugerem uma investigação modificando a liga Al-0,6%Mg-0,3%Cu, com teores variados 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.

5 CONCLUSÃO

A liga base Al-[0,6%] de Mg modificada com diferentes teores de cobre apresentou boa trabalhabilidade em todos os teores, esta constatação pode ser explicada devido aos corpos de prova se deformaram plasticamente sem sofrerem nenhuma (trincas) ou dano superficial. Em termos de Resistência à tração, a liga Al-Mg X%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.

Através da análise dos resultados obtidos no tratamento térmico de 230°C por 1h foi possível observar que os fios laminados da liga Al-Mg-Cu sofreram uma recuperação na estrutura interna do material, e, portanto apresentaram uma 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 (figura 4a), porém sua ductilidade foi melhorada, modificando seu alongamento percentual de 2,5% para 4,6%, após o tratamento térmico (Figura 4b). analisando as Figuras 3 e 4, 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 3,50 mm (de acordo com a norma NBR 5285/1985).⁽⁶⁾ Sugere-se a modificação da liga Al-0,6%Mg-0,3%Cu, com percentuais variados 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.

REFERÊNCIAS

- 1 PRAZERES, U.R. Avaliação do Efeito do Ferro na Formação da Macroestrutura, Propriedades Mecânicas e Elétricas do Alumínio Eletrocondutor Belém/Pa Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Pará Faculdade de Engenharia Mecânica 2007 p.31
- 2 QUARESMA, J.M.V. Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica, Campinas/SP. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. 1999.

- 3 DIETER, G. E., "Mechanical Metallurgy", McGraw- Hill Kogakusche, Ltd International Student Edition 1976 American Society for Metals-ASM, Vol. 1, Ohio, USA, p. 774
- 4 GAVGALI, M., AKSAKAL, B., Effects of Various Homogenization Treatments on the Hot workability of Ingot Aluminum Alloys; AA2014. Materials Science and Engineering. A 254, pp 189-199, 1998.
- 5 SANTOS, E. D. CAVALCANTE; FEITOSA, J. PEREIRA. Avaliação da trabalhabilidade da liga Al-Mg-Cu em função da variação do teor de cu após laminação a frio. Monografia de Especialização, Universidade Federal do Pará, 2004.
- 6 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 5285. "Fios de alumínio-liga, nus, de seção circular, para fins elétricos", Rio de Janeiro, Nov. 1985,
- 7 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 5118. "Fios de alumínio nus de seção circular para fins elétricos", Rio de Janeiro, Nov. 1985,