

# INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO Cu NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DE UMA LIGA DA SÉRIE 6000<sup>1</sup>

Paulo Cordeiro Machado<sup>2</sup>  
Ferdinando Hironory<sup>2</sup>  
Diego Eygo<sup>2</sup>  
Elvyo Barbosa<sup>2</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o ternário Al - 0,8 %Si - 0,6 %Mg - 0,25 %Fe, com variação nas concentrações de Cobre na faixa de [0,1; 0,2] %Cu, através das suas propriedades mecânicas e elétricas. Para a determinação destas características foram produzidos corpos de provas a partir do vazamento do metal fundido em um molde em "U", do qual foram retirados pequenos corpos de prova para a caracterização metalográfica (macrográfica e micrográfica). O restante do material foi submetido aos processos de usinagem, laminação e trefilação, para a caracterização elétrica mecânica através dos ensaios de condutividade elétrica e de tração respectivamente. Espera-se que com o aumento da concentração do Cu ocorra o aumento do LRT (Limite de Resistência a Tração), acarretando um decréscimo quanto a sua ductilidade, gerando fraturas com tendências frágeis, e em relação a condutividade elétrica (%IACS), presume-se que se terá um ligeiro aumento com o decréscimo do teor de Cu.

**Palavras-chave:** Propriedade mecânica; Propriedade elétrica.

## INFLUENCE OF VARIATION IN Cu ON MECHANICAL PROPERTIES AND ELECTRICAL OF 6XXX ALUMINUM SERIES ALLOYS

### Abstract

This study aims to analyze a alloy Al - Si 0.8% - 0.6% Mg - 0.25% Fe, with variations in the concentrations of copper in the range of [0.1, 0.2]% Cu, through its electrical and mechanical properties. In determining these features were produced bodies of evidence from the casting of molten copper in a cast in "U", which were withdrawn small bodies of evidence for the characterization metallography (macrograph and micrography). The rest of the material was subjected to the processes of machining, rolled and drawing, for the electrical characterization mechanics through the testing of electrical conductivity and traction respectively. It is expected that with increasing concentration of Cu occurs increasing the limit of the tensile strength, causing a decrease as its ductilidade, generating fractures with trends fragile, and for electrical conductivity (% IACS), presumed that will be a slight increase with the decrease in the level of Cu.

**Key words:** Properties Mechanical, Electrical Property

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.*

<sup>3</sup> *Dr. em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará.*

# 1 INTRODUÇÃO

O consumo de alumínio no mercado mundial tem crescido constantemente por suas boas características mecânicas e elétricas, que atendem às necessidades das redes de transmissão, com uma das menores taxas de desperdício ao longo de sua extensão, podendo distribuir energia à longa distância. O alumínio e suas ligas podem ser submetidos ao processo de laminação e trefilação, resultando em fios e cabos de diversas bitolas para diferentes utilizações, devido sua excelente trabalhabilidade.

Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas, as ligas da série 6.000 vêm sendo consideradas como uma das mais promissoras em relação ao uso industrial, por aliar boa trabalhabilidade com resistência mecânica. Uma vantagem adicional no uso dessas ligas é a diminuição considerável do peso pela baixa massa específica do alumínio. Dentre as ligas da série 6.000, as ligas 6.101 e 6.201 têm aplicabilidade muito intensa na fabricação de fios e cabos elétricos.

Este trabalho propôs analisar a influência da variação do teor de Cobre nas propriedades mecânicas e elétricas de duas ligas da série 6xxx, Al – 0,6 %Mg – 0,8 %Si – [0,1 e 0,2] %Cu, semelhante a estudo desenvolvido no GPEMAT<sup>(1)</sup> no qual foi avaliado o comportamento elétrico e mecânico de ligas 6101 com variação de cobre como ilustrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição Química.

LIGAS	Si	Fe	Mg	Cu	Ti	B
Al-0,6%Mg-0,4%Si-0,1%Cu	0,489	0,1574	0,5934	0,1061	0,0012	0,0015
Al-0,6%Mg-0,4%Si-0,2%Cu	0,4412	0,1915	0,5544	0,2251	0,0025	0,0005

Estas ligas quando submetidas aos testes de caracterização mecânica e elétrica em função do diâmetro do fio apresentaram resultados indicando que maiores teores de Cobre no sistema Al-Mg-Si podem contribuir para maiores LRT, quando avaliado em função dos diâmetros dos fios e que, o LRT tende a ser maior para diâmetros menores. No que diz respeito a Condutividade Elétrica os resultados apresentaram comportamento diametralmente oposto; menores teores de Cobre contribuem para melhorar a capacidade de conduzir eletricidade dos fios. E, segundo os autores este comportamento pode estar indicando que, proporcionalmente ao teor de Cobre, as ligas reagem bem à taxa de deformação empregada. Em estudos com ligas Al-0,6%Mg modificadas com cinco diferentes de Cobre<sup>(2)</sup> os autores constataram, para os teores de Cobre estudados, que o sistema Al-Mg-Cu assim constituído apresentou boa trabalhabilidade, visto que em todos os teores de Cu, os corpos de prova deformaram plasticamente sem sofrerem nenhuma alteração (trincas) nas suas estruturas apesar de sempre apresentarem, na fratura, aspecto frágil com exceção das ligas com teores de 0,6% e 0,3% de Cu que além de apresentarem bons resultados nos ensaios de tração e de condutividade elétrica se configuraram como promissoras no que diz respeito a termo resistividade, com uma ligeira tendência para a liga com 0,6%Cu, Por outro lado é sabido que a ductilidade é reconhecidamente sensível ao tamanho de grãos, das partículas de silício, do teor de magnésio e das condições de envelhecimento.<sup>(3)</sup> Devido às tensões envolvidas no processo que variam de ponto a ponto durante a deformação, a mutabilidade da estrutura que ocorre, afeta a “trabalhabilidade” e apresenta-se como um complicado fenômeno de engenharia e como tal precisa ser estudado.<sup>(4)</sup> Em

estudos recentes<sup>(5,6)</sup> foram observados o comportamento de grãos com estrutura colunar a equiaxial e, essas estruturas são determinantes com relação ao grau de homogeneização química, a tensão e a anisotropia e esta irá afetar a deformabilidade. O entendimento da deformabilidade é importante para o mensuramento e para a previsão do limite de deformação, antes de ocorrer à fratura.<sup>(7)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, para a determinação das características desejadas foram produzidos corpos de prova, a partir do vazamento do metal fundido em um molde em forma de “U” (Figura 1), do qual a base do perfil solidificado foi submetida à caracterização metalográfica (macrográfica e micrográfica). O restante do perfil foi usinado até o diâmetro  $[\phi]$  de 9,8mm para em seguida ser laminado a frio, em um laminador duo elétrico com canal circular, sendo feitos sucessivos passes até chegar-se a fios de  $\phi = 3,98\text{mm}$  que posteriormente foram trefilados até o  $\phi = 3,02\text{mm}$ , para a caracterização elétrica e mecânica através dos ensaios de condutividade elétrica e de tração respectivamente.



**Figura 1.** Molde em U, o arranjo seqüencial do processo deformativo ao qual o material foi submetido até o diâmetro final e o laminador com canais circulares.

Na Tabela 2 encontram-se listadas as composições químicas das ligas utilizadas neste trabalho. A análise química foi feita nas dependências das Industrias ALUBAR em um espectrômetro óptico de massa.

As ligas foram preparadas por fundição utilizando alumínio comercial em cadinhos de Carbetto de Silício, em um forno tipo mufla. As ligas foram vazadas fixando o teor de Silício (Si) em 0,8%, Magnésio (Mg) 0,6% e variando o teor de Cobre (Cu) em [0,1 e 0,2] (quadro 2), em um molde com o formato de “U”, para que fosse possível retirar corpos de prova cilíndricos para facilidade de usinagem.

**Tabela 2.** Composição química das ligas (%).

<b>Al-0,6%Mg-0,8%Si-0,1%Cu</b>	Si 0,8758	Fe 0,2709	Cu 0,1128	Mg 0,6207	Ti 0,0021	B 0,0011
<b>Al-0,6%Mg-0,8%Si-0,2%Cu</b>	Si 0,835	Fe 0,2477	Cu 0,2260	Mg 0,6037	Ti 0,0024	B 0,0011

Após estes processos de deformação os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de Resistividade elétrica e Tração, segundo a norma NBR-5384 e NBR-6207, nos aparelhos Multiohmímetro e KRATOS respectivamente (Figura 2). No entanto, foi separada uma amostra de cada liga antes do processo de deformação (laminação), para ser feito o ensaio de tração, obtendo resultados do material não conformado.

As amostras foram caracterizadas utilizando análises macroscópicas, e as micrografias do fundo do molde “U” foram analisados em um microscópio óptico modelo LEICA. E um microscópio óptico de varredura (MEV) foi utilizado para analisar as fraturas obtidas após o ensaio de tração. Para a contagem do tamanho da micro cavidade (dimple) foi utilizado o software MOTIC Images plus 2.0, o qual permite ajustar a escala da ampliação obtida no MEV com a imagem a ser trabalhada, este dimensionamento se deu pela média de quatro análises, os quais cada uma tem a média de três medições de diâmetro, feitas por imagem.



Figura 2. Equipamentos para a Caracterização Mecânica [KRATOS] e Elétrica [Multiohmímetro].

### 3 RESULTADOS

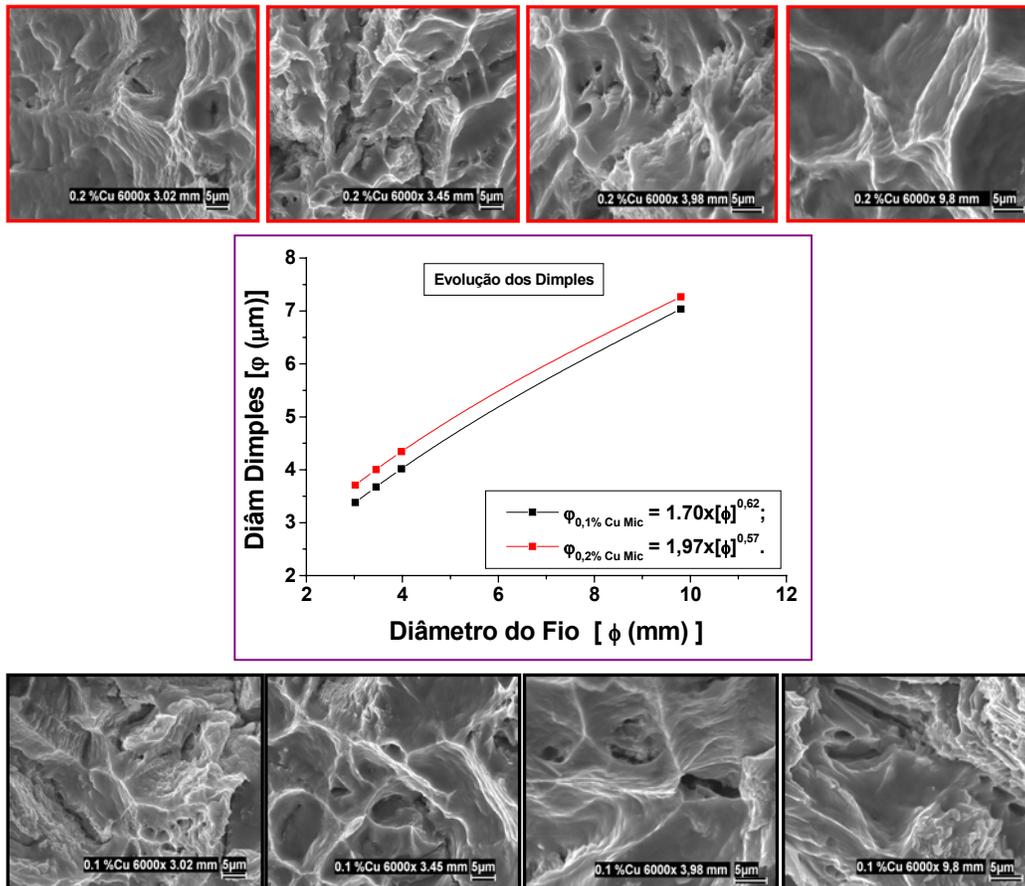
A Tabela 3 representa os resultados mecânicos e elétricos obtidos.

Tabela 3. Resultados Mecânicos e Elétrico.

	Usinado (9,8 mm)		Laminado (3,98 mm)		Trefilado (3,45 mm)		Trefilado (3,02 mm)	
<b>Ligas</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,1%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,2%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,1%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,2%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,1%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,2%Cu</b>	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; 0,1%Cu	Al; 0,6%Mg; 0,8%Si; <b>0,2%Cu</b>
LRT (Mpa)	139,73	91,85	272,2	233,5	297,93	254,45	288	328
Alongamento (%)	14,05	8,75	6,2	5,9	2,48	3,28	2,34	1,68
Tenacidade (Mpa)	16,42	7,42	18,23	13,9	6,09	10,38	****	****
Cond. Elét. (IACS%)	****	****	49,59	51,31	50,19	51,77	50,84	52,15

### 3.1 Caracterização Metalográfica

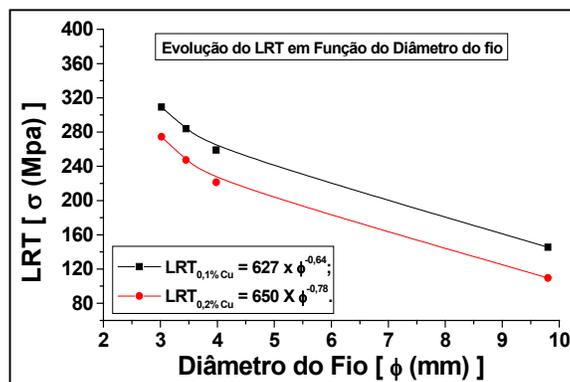
A Figura 3 está constituída das fotos das micrografias obtidas via MEV e do gráfico contendo as curvas da evolução dos diâmetros das micro cavidades em função dos diâmetros dos perfis ensaiados. Ressalte-se que as fotos micrografias apresenta, cercadura compatível com a cor da cruva no gráfico da figura.



**Figura 3.** Demonstrativo da evolução das micro cavidades correlacionada com o diâmetro do fio e com o teor de Cobre.

### 3.2 Ensaio de Tração

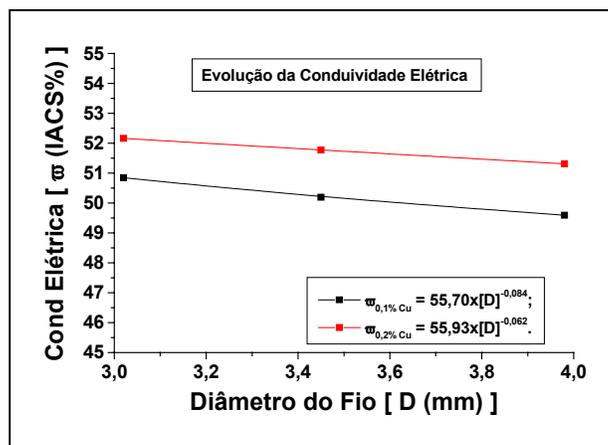
Os resultados dos ensaios de tração encontram-se representados na Figura 4, e estão relacionados em função dos diâmetros dos perfis estudados. Estes resultados sugerem que as ligas reagem da mesma forma e inversamente proporcional ao teor de Cobre.



**Figura 4.** Resultados dos Ensaio de Tração em função dos diâmetros dos fios para os teores de Cobre avaliados.

### 3.3 Condutividade Elétrica

Os resultados dos ensaios de eletricidade encontram-se representados na Figura 5, e estão relacionados em função dos diâmetros dos perfis estudados. Estes resultados sugerem que as ligas reagem da mesma forma e diretamente proporcional ao teor de Cobre.



**Figura 5.** Condutividade Elétrica (%IACS).

## 4 DISCUSSÕES

Da análise da Figura 3 tem-se que, para igual diâmetro de fios, o diâmetro dos Dimples se apresentam maiores para a liga com maior teor de Cobre. É possível que a cinética da mutação dos grãos, conseqüente da deformação plástica à frio a que foram submetidos os perfis, fique prejudicada pelo acréscimo de Cobre na liga.

Sob o aspecto das características mecânicas, cujos resultados encontram-se plotados na Figura 4, pode ser emitido juízo de valor no sentido de que fios com iguais diâmetros

apresentam maior LRT para a liga com menor teor de Cobre. Este comportamento encontra-se melhor avaliado nas curvas da Figura 6, a seguir. Na qual tem-se relacionado os valores dos LRT para as duas ligas e em função das dimensões das micro cavidades.

No que diz respeito à caracterização elétrica, os resultados que podem ser vistos na Figura 5, apontam para o entendimento de que esta propriedade atua de forma inversamente proporcional ao diâmetro do fio e diretamente proporcional ao teor de Cobre presente na liga.

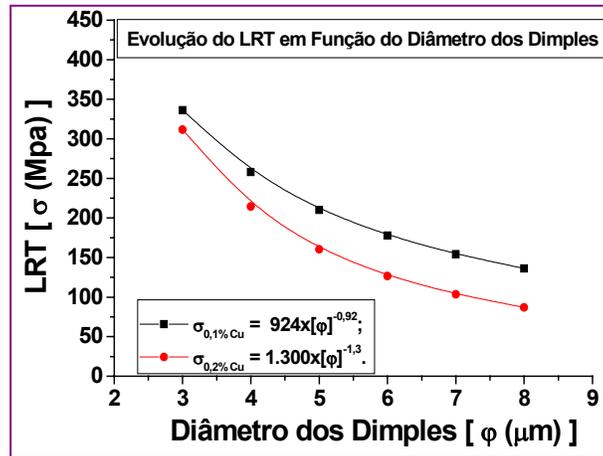


Figura 6. Evolução do LRT em função dos diâmetros das Micro cavidades.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem os seguintes comentários a título de conclusões:

Da caracterização metalográfica tem-se que, nas ligas 6201, nas quais o teor de Si é maior que o teor de Mg, a presença de Cobre crescente nos níveis propostos tendeu a inibir a cinética da mutação dos grãos, conseqüente da deformação plástica à frio a que foram submetidos os perfis, minimizando conseqüentemente o encruamento;

Da caracterização mecânica tem-se que iguais diâmetros de fios apresentam a liga com menor teor de Cobre com diâmetros de micro cavidades menores e conseqüentemente apresentado maiores LRT. O surgimento de menores micro cavidades para as ligas com menor teor de Cobre pode estar relacionado com maior fragmentação estrutural.

Da caracterização elétrica tem-se que os resultados apontam para um desempenho diametralmente oposto ao apresentado para a caracterização mecânica. Sugerindo que as maiores micro cavidades apresentam baixa capacidade mecânica e elevada capacidade elétrica quando o teor de Cobre cresce.

## Agradecimentos

Os Autores agradecem o apoio do Prof. Dr. Quaresma pelo incentivo e motivação para o desenvolvimento desta tarefa, aos integrantes do grupo GPEMAT e ALUBAR METAIS S/A e a UFPA; CNPq; PROPESP e PIBIC.

## REFERÊNCIAS

- 1 Feitosa, Johnyson Pereira; Caracterização da Liga 6101 Refinada com a Adição de Diferentes Teores de Cobre e Solidificadas em Moldes Unidirecional Horizontal e em Molde “U”; 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Pará, 2007.
- 2 Santos, E., D., Feitosa, J., P.; C.; Neto, J., T., M; Santos, W., L., R.; Quaresma, J., M., V.; *Avaliação da Trabalhabilidade da Liga Al-Mg-Cu em Função da Variação do Teor de Cu Após a Laminação a Frio*; p. 24; II Congresso Internacional do Alumínio – Expoalumínio – 23 a 25 de Agosto de 2005 – São Paulo – SP.
- 3 Cáceres, C.H. Davidson, C.J. Griffiths, J.R The Deformation and Fracture Behaviour of an Al-Si-Mg Casting Alloy July 1995 Materials Science and Engineering A197
- 4 Gavgali, M. Aksakal, B: Efects of Various Homogenisation Treatments on the Hot Workability of Ingot Aluminium Alloy AA2014. Materials Science and Engineering A 254.
- 5 Gandin, A. Ch; Experimental Study of the Transition from Constrained to Unconstrained Growth during Directional Solidification. ISIJ International, Vol.40 (2000), No. 10,pp 971-979.
- 6 Mohamed, A.Taha Nahed, A. El-Mahallawy, Rawia M. Hamouda, “Relationship Between Formability and Cast Structures in End-child Directionally Solidified Al-Cu Alloys”, Materials and Design 23 (2002) 195-200.
- 7 Zu, Z, Xu, Y. B, Hu, Z. Q., “Evolution of Dislocation Struture Induced by Cyclic Deformation in a Directionally Solidified Cobalt Base Superalloy”, Materials Science Tech., 1999, Vol. 15, pp. 165-168.