

# CORRELAÇÃO ENTRE A TRABALHABILIDADE E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DE UMA LIGA DA SERIE 6000 MODIFICADA COM DIFERENTES TEORES DE MG <sup>1</sup>

Washington Luis Reis Santos <sup>2</sup>

Paulo Cordeiro Machado <sup>2</sup>

Antônio Maria Alves Thomas <sup>3</sup>

José Maria do Vale Quaresma <sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo do presente estudo é avaliar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas e elétricas da liga 6101, quando modificado o seu teor de Mg, através das correlações obtidas na sua conformação mecânica, ensaios de tração e condutividade elétrica. Para a determinação destas características foram produzidos corpos de provas em um molde em forma de “U” e logo após foram submetidas aos processos de laminação e trefilação, analisando se a sua taxa de deformação para diferentes diâmetros obtendo-se, no final fios de aproximadamente 3,45 mm de diâmetro, sendo realizados testes de condutividade elétrica e de tração para a obtenção de parâmetros que possam correlacionar as propriedades mecânicas e elétricas com as taxas de deformação. As fraturas obtidas pelo ensaio de tração serão analisadas via MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) com a finalidade de verificar a influência das diferentes concentrações de Mg no aspecto da fratura. Observou-se que o aumento do teor do Mg além de contribuir para melhor distribuir as linhas de ferro na estrutura da liga provoca aumento da resistência a deformação a frio diminuindo a plasticidade assim como um acréscimo na resistência elétrica das ligas estudadas. Ao examinar o aspecto da fratura observa-se um crescimento das microcavidades a medida que é adicionado uma quantidade maior de Mg nas ligas .

**Palavras-chave:** Deformação a frio; Condutividade IACS; Fratura; Ligas 6000; Linhas de ferro.

## CORRELATION BETWEEN WORKABILITY AND THE MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES ON A 6000 SERIES ALLOY MODIFIED BY MG SEVERAL CONTENTS

### Abstract

The objective of this paper is evaluating the workability and the mechanical and electrical properties on 6101 alloy, when added Mg contents, by the correlations obtained on mechanical deformation, tension test and power conductivity. To determination of these characteristics were done specimens into a U shape mold and after, it were rolled and drawn, analyzing if the deformation rate to different diameters it obtaining, wires on diameter 3,45 mm, being realized conductivity tests and tension test to obtain the parameter to do correlation between the properties with deformation rate. The fractures were analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM) to verifying the influence of Mg different contents on appearance of fracture. It observed that the Mg content increases contributes to make better the distribution of iron lines on alloy structure and increases the cold deformation resistance, decreasing the plasticity and increases the electrical resistance on alloys researched. To examine the fracture appearance it observes a growing of micro cavities when the Mg content increases on alloys.

**Key words:** Cold deformation; IACS power conductivity; Fracture; 6000 Series alloys; Iron lines.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.*

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

<sup>3</sup> *Mestrando em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará.*

<sup>4</sup> *Prof. Dr. IT/FEM - Universidade Federal do Pará.*

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de alumínio no mercado mundial tem crescido constantemente por suas características de condutibilidade e leveza, 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; fazem a ligação entre subestações e centros de carga para suprir as necessidades agrícolas, nas zonas rurais e nas cidades, setores onde o país demanda grandes investimentos. Com estas características diversos segmentos são atendidos, utilizando soluções adequadas a cada aplicação, onde é utilizado tradicionalmente em linhas de transmissão de grande porte e subestação, cabo isolado ou nu em condutores para distribuição aérea ou subterrânea e instalações elétricas prediais e industriais, em prédios e edifícios comerciais e industriais, podendo ser encontrado na forma de vergalhões e arames. O alumínio é submetido ao processo de laminação e trefilação, resultando em fios e cabos de diversas bitolas para diferentes utilizações.

Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas, as ligas da série 6000 vêm sendo consideradas como uma das mais promissoras em relação ao uso industrial, por aliar boa conformabilidade com resistência mecânica. Uma vantagem adicional no uso dessas ligas é a diminuição considerável do peso que o alumínio oferece.<sup>[1]</sup>

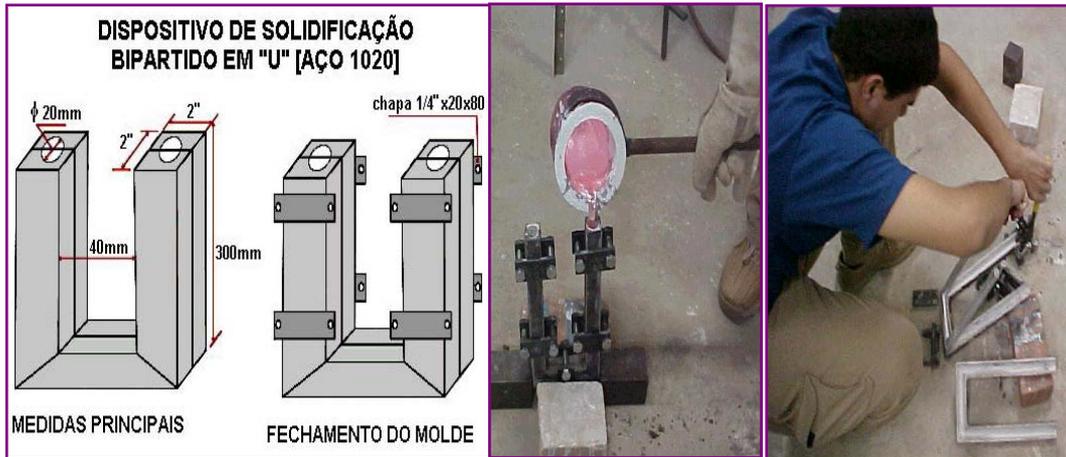
A conquista de um espaço cada vez maior na indústria de condutores elétricos pela liga Al-Mg-Si é alavancado pelas significativas vantagens no uso de cabos de liga no lugar dos tradicionais cabos de alumínio com alma de aço para o transporte e distribuição de energia. As ligas do sistema 6000 têm sido utilizadas como matéria-prima na fabricação de vergalhões e fios para produção de cabos para transporte de energia elétrica realizada pela Alubar Metais e Cabos. Este fato torna a liga Al-Mg-Si um material de elevado valor econômico, esta grande importância industrial por parte da liga Al-Mg-Si tem motivado a pesquisa deste material com relação as suas propriedades mecânicas e elétricas. Baseado nestes fatos, este trabalho propôs-se em analisar Correlação entre a Trabalhabilidade e as Propriedades Mecânicas e Elétricas de uma Liga da Serie 6000 Modificada com Diferentes Teores de Mg.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas foram preparadas por fundição utilizando *alumínio comercial* em cadinhos de grafita, em um forno tipo mufla, marca Brasimet. As ligas foram vazadas fixando o teor de Silício (Si) em 0,6% e adicionando Mg nos teores de 0,5; 0,7; 0,9, 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 e posteriormente foram trefilados até o diâmetro de 3,45 mm.

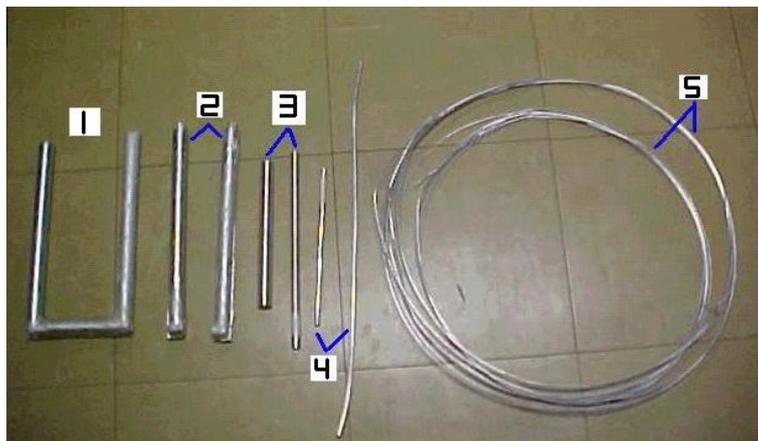
A Figura 1 apresenta uma seqüência na qual estão ilustrados os projetos do molde, o ato do Vazamento e do desmoldar para a retirada do perfil obtido.

Os perfis “U” obtidos como mostrado na Figura 1, depois de desmoldados passam por uma seqüência de operações de mudança de forma até o fio com o diâmetro final desejado, como mostra a Figura 2:



**Figura 1** - Seqüência de montagem e desmoldagem do molde em "U".

Após este processo de deformação os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de Resistividade elétrica e Tração segundo a norma NBR-5384 e NBR-6207 respectivamente.



**Figura 2** – Seqüência alto explicativa das etapas operacionais até a obtenção do diâmetro de 3,45mm desejado.

A análise das macrografias das fraturas após ensaios de tração foi feita em um (MEV) microscópio eletrônico de varredura LEO, modelo 1450VP, Figura 3. As amostras a serem examinadas no MEV foram limpas com uma solução de álcool+acetona (PA) em um limpador ultra-sônico por 10 min.



Figura 3 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitos ensaios de tração nos fios com a finalidade de se avaliar o comportamento trativo da liga Al-Mg-Si, em função da composição química e do diâmetro, variável através da qual se tem idéia da boa deformabilidade apresentada pelo material. Na Figura 4, são apresentados os valores de LRT (Limite de Resistência a Tração) em função do diâmetro e relativas às composições químicas estudadas. As curvas constituintes do gráfico indicam que o LRT cresce quanto maior o teor de Mg e quanto menor o diâmetro do fio. No caso da diminuição do diâmetro este crescimento deve-se a deformação provocada no material, que inibe a capacidade de movimento das estruturas internas pela eliminação de espaço, como pode ser observado pela modificação existente nos dois conjuntos de fotos obtidas via MEV com aumentos de 500X. No conjunto de imagens referente ao diâmetro  $\phi=3,98\text{mm}$  pode ser visualizada as micro cavidades que já não podem ser vistas no conjunto relativo ao  $\phi=3,45\text{mm}$ , no qual podem ser vistas apenas fendas ou aberturas muito delgadas. Referência a pequena ou a nenhuma possibilidade de deformação. Quando se avalia a evolução do teor de Mg, são dois os caminhos para tal: I- As micro cavidades apresentadas crescem à medida que cresce o teor de Mg assim como II- Cresce o LRT. Parece existir uma correlação entre o tamanho da micro cavidade e a capacidade de resistir a esforços de tração apresentada pelas ligas após serem deformadas. A Tabela 1 a seguir apresenta os ganhos nos LRT para cada liga considerando os diâmetros extremos para cada caso.

O valor do encruamento, como ganho no LRT associado ao menor diâmetro em cada liga, pode estar relacionado à grandeza das micro cavidades e, permiti emitir juízo de valor no qual maiores teores de Mg, maiores micro cavidades e podem associar-se a menores índices de encruamento como relacionado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Relaciona os teores de Mg, os diâmetro dos fios, o LRT e o Encruamento.

	$\phi= 3,98 \text{ mm}$	$\phi= 2,45 \text{ mm}$	Encr
LIGA	LRT	LRT	
0,5% Mg	253,86	273,86	1,08
0,7% Mg	254,60	287,49	1,13
0,9% Mg	283,34	300,06	1,06

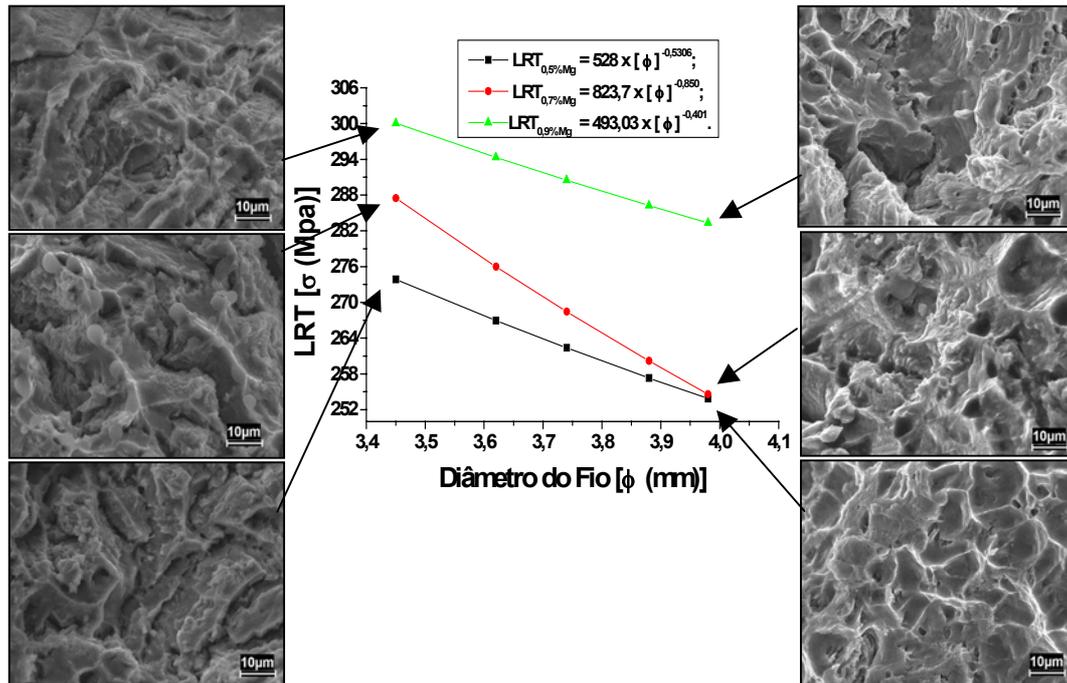


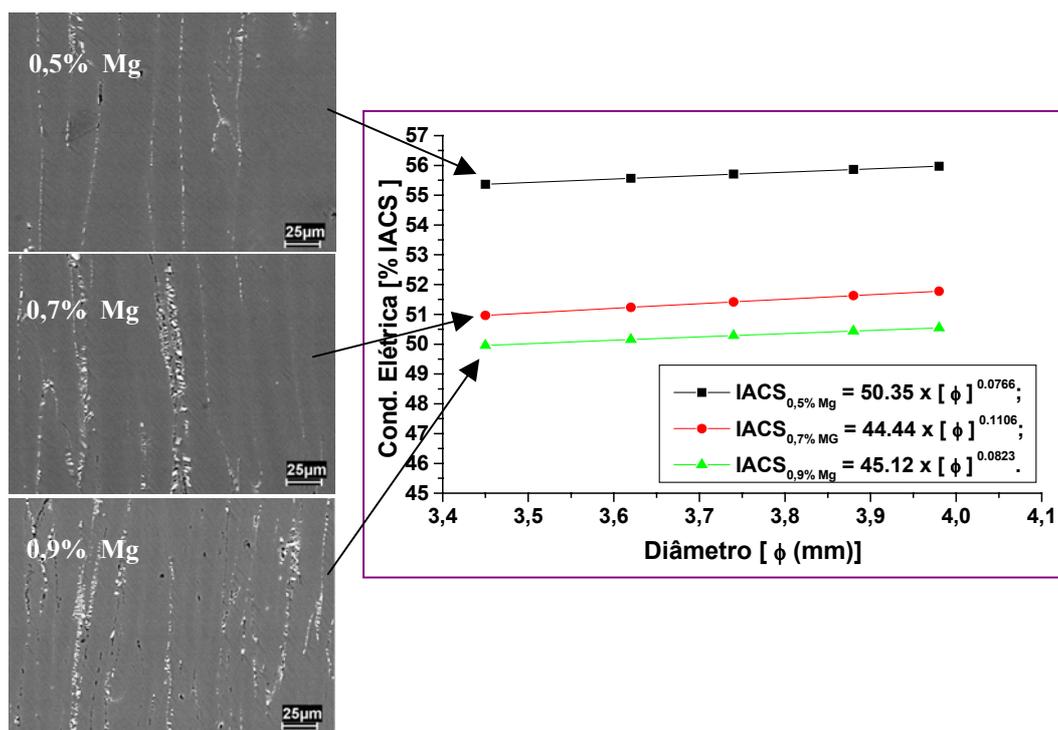
Figura 4 - Correlação entre o LRT e o Diâmetro dos Fios estudados.

O encruamento pode ainda estar relacionado, após a etapa de eliminação das micro cavidades, com as discordâncias e suas interações com obstáculos, como solutos, contornos de grão etc., que impedem a livre movimentação das discordâncias. É preciso uma energia cada vez maior para que ocorra essa movimentação, e, conseqüentemente deformação plástica, até o limite onde a fratura tem início.<sup>[2]</sup>

### 3.1 Resultado de Condutividade IACS

Pelos resultados de condutividade elétrica (Figura 5), das ligas Al-0,6%Si - (0,5; 0,7; 0,9)% Mg, observa-se que com a adição do soluto na liga, apresentam-se valores menores de condutividade devido a uma maior resistência da passagem dos elétrons ocasionada não apenas pelo acréscimo de soluto, mas também pela possível formação do composto intermetálico  $Mg_2Si$ , que melhora as propriedades mecânicas da liga, porém dificulta a passagem da corrente elétrica. Acredita-se que a presença de algumas impurezas e vazios presentes no material, podem afetar as propriedades mecânicas e físicas (condutividade elétrica) dos componentes produzidos pelos processos de fundição.<sup>[3]</sup>

Pode também ser observado através das figuras obtidas via MEV com sistema de identificação de padrões de difração de elétrons retroespalhados (EBSD), linhas de tom esbranquiçado que teve sua composição química analisada, e identificada como ferro, como pode ser visto na Figura 5. Essa linha de ferro alongada foi gerada pelo processo de conformação mecânica que as ligas foram submetidas, tendo uma relação direta com o Magnésio, pois como pode ser visto na figura a intensidade das linhas de ferro tende a aumentar com o acréscimo de teor de Mg, sabendo-se que o teor de ferro é fixado para todas as ligas em 0,32%.



**Figura 5** – Realce das Linhas de Ferro como função do teor de Mg nas ligas 6000.

Uma outra observação que pode ser tirada da Figura 5 é quanto a possibilidade da maior concentração das linhas de ferro estar associada à diminuição da capacidade de transmitir e distribuir energia elétrica, pela elevação do teor de Mg nestas ligas.

#### 4 CONCLUSÃO

Pode-se observar a partir dos dados obtidos através do LRT (Limite de Resistência a Tração) que à medida que é adicionado um maior teor de Mg há um ganho das propriedades mecânicas, que cresce mais ainda quando a liga é submetida a um processo de conformação mecânica, no caso laminação e trefilação, devido ao encruamento. Analisando suas fraturas em diferentes diâmetros podemos observar que as microcavidades (Dimples) apresentam-se maiores quanto maior for o teor de Mg e como consequência parece ocorrer uma menor capacidade de encruamento do material como pode ser avaliado na Tabela 1.

A adição de Mg nos teores estudados, ao provocar um aumento na resistência elétrica, provavelmente devido ao aumento de soluto na liga que facilita a formação de  $Mg_2Si$ , associa a este fato a elevação no LRT que por sua vez pode estar associada a maior concentração e definição das linhas de ferro.

#### Agradecimentos

Sinceros agradecimentos a Universidade Federal do Pará, a Alubar Metais e a Fadesp por permitirem que o GPEMAT trabalhe pesquisando permanentemente doando sua contribuição ao progresso da ciência.

## REFERÊNCIAS

- 1 Mattos, P.R.O. Desenvolvimento de Composição de Ligas Diluídas em Al-Mg-Si com Variação do Magnésio para Determinação Trabalhabilidade, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém. 2004.
- 2 Garcia, A., Ensaio dos Materiais, Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC, 2000.
- 3 Dasgupta, R, Comparação das Propriedades das Ligas de Alumínio Produzidas por Diferentes Processos de Fundição; n.113, 2002;