

# A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE SILÍCIO NA LIGA DA SÉRIE 6000<sup>1</sup>

*Darci Augusto Moreira<sup>2</sup>  
Raimunda Figueiredo da Silva Maia<sup>2</sup>  
Aline Emanuelle Albuquerque Moreira<sup>3</sup>  
Carlos Edilson de Almeida Maneschy<sup>4</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma análise sobre o comportamento do silício nas ligas da série 6000, em particular as ligas 6101 e 6201 utilizadas para transmissão de energia elétrica. Para esse fim, utilizou-se da fundição direta em condições transitórias de calor, fazendo-se uso de um dispositivo em forma de “U” e ligas Al-0.6% Mg - (0.4; 0.8; 1.2) % Si. Os dados experimentais foram coletados do ensaio de tração e o aspecto metalográfico foi utilizado para confirmação dos resultados do ensaio de tração. Esses dados apontaram para o decréscimo das propriedades mecânicas (tração e alongamento) na proporção em que o teor de silício é acrescido na liga. Conclui-se que é ineficaz adicionar silício acima dos limites das ligas, na busca do equilíbrio entre excelentes propriedades mecânicas e elétricas, que possibilitem enquadrar a liga aos parâmetros exigidos para cabos condutores de transmissão elétrica.

**Palavras-chave:** Condução elétrica; Ligas de alumínio e silício; Propriedades mecânicas.

## **THE INFLUENCE OF THE SILICON CONTENT VARIATION IN 6000 SÉRIES ALLOY**

### **Abstract**

The objective of this work is to develop analysis about the behavior of the silicon in the series 6000 alloy, in matter the 6101 and 6201 alloys used for electric power transmission. For this, was used of the direct foundry in transitory conditions of heat, being made use of a device in the shape of “U” and casting of Al-0.6%Mg – (0.4; 0.8; 1.2) % Si. The experimental dates were collected of strength tests and failure aspect was used for confirmation of the results of the strength tests. Those dates shows a decrease of the mechanical properties (strength and stretch) in the proportion in that the silicon content is added into alloy. It reason that is ineffective to add silicon above the limits of the series 6000 alloys, with the results also indicating that there are possibilities excellent mechanical properties, that it makes possible to frame the alloy to the parameters demanded for conductive cables of electric transmission.

**Key words:** Power transmission; Aluminum and silicon binary alloy; Mechanical properties.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *Mestre em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará*

<sup>3</sup> *Graduanda em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Pará*

<sup>4</sup> *Prof.Dr. Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Pará*

## INTRODUÇÃO

A produção de ligas de alta resistência baseadas em Al, ou outro elemento para aplicações em temperaturas elevadas (até 427°C), é uma tarefa desafiadora da metalurgia moderna. Para tanto, se faz necessário o estudo cuidadoso das possíveis modificações que podem ser efetuadas, em particular no Al. O projeto de ligas com base no Al, contendo elementos que possam produzir partículas muito pequenas de segunda fase e que são estáveis a elevadas temperaturas, pode ser um dos modos para resolver este problema que se põem, atualmente, como o maior desafio da metalurgia, pois estas partículas podem contribuir para elevar a resistência mecânica mesmo que por força da dispersão ou precipitação. Desta forma, devem ser buscadas composições e novos métodos produtivos. Os aditivos necessários para que a liga de Al tenha um bom desempenho em temperaturas elevadas, precisa, minimamente, satisfazer algumas exigências: capacidade para formar fases intermetálicas com Al; máxima solubilidade sólida, de equilíbrio pequeno, até 427°C; baixa difusividade na matriz.

Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas, as ligas da série 6000 podem apresentar comportamento promissor, se devidamente modificadas, em relação ao uso industrial, pois alia boa conformabilidade, resistência mecânica e considerável condutividade elétrica. Uma vantagem adicional no uso dessas ligas é a diminuição considerável do peso que o alumínio oferece.<sup>(1)</sup>

Dentre as ligas da série 6000, as ligas 6101 e 6201 têm uma aplicabilidade muito intensa na fabricação de cabos e fios elétricos.<sup>(2-3)</sup> A composição das ligas (Tabela 1) possui uma formulação que possibilita tolerância de variação ampla para produção e uso relativo de suas propriedades, que poderão ser potencializadas quando modificadas com o correto agente aditivador.

Podendo vir, indústrias automobilística, aeronáutica, naval, bélica e de construção civil a serem as principais responsáveis pelo consumo destas ligas em grande escala. São também representativos, os setores de eletrônica e comunicações, cujo consumo desta liga, apesar de quantitativamente inferior, tem importância capital para a economia contemporânea.<sup>(4)</sup>

**Tabela 1.** Composição química das ligas 6101 e 6201.

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	B
6101	0,3 a 0,7	0,5	0,1	0,03	0,33 a 0,8	0,03	0,1	0,06
6201	0,5 a 0,95	0,5	0,1	0,03	0,6 a 0,9	0,03	0,1	0,06

Fonte: ASM HANDBOOK<sup>(5)</sup>

Contrariamente a sua extensiva aplicação, há um número de controvérsias em relação ao efeito da composição na propriedade mecânica,<sup>(6)</sup> que associa o acréscimo da fragilidade com o acréscimo do teor de silício.

O acréscimo da ductilidade é importante, porque influencia no decurso da deformação plástica afetando a produtividade.<sup>(7)</sup>

O efeito da adição do silício no alumínio foi primeiramente investigado por St. Claire Deville em 1856.<sup>(8)</sup> Em seu estudo, foi constatado que adições de silício no alumínio produzem na liga propriedades mecânicas que dependem da sua distribuição, forma e conteúdo das partículas. Ligas apresentando pequenas partículas de silício, esféricas e igualmente distribuídas apresentam alta ductilidade. Por outro lado ligas com partículas de silício facetadas apresentam ductilidade reduzida.<sup>(9)</sup>

Outro fator que influencia a propriedade mecânica do material, segundo Briant<sup>(10)</sup> é o contorno do grão. O contorno do grão bloqueia o movimento das deslocamentos afetando a propagação da força de tensão e conseqüentemente inibindo a deformação plástica, favorecendo o caminho da fratura no material.

A fratura relata a propriedade mecânica do material, juntamente com sua microestrutura.<sup>(11)</sup> Esta colabora para a ocorrência de fratura transgranular e intergranular dependendo da microestrutura formada.<sup>(12)</sup>

Nesse sentido, este trabalho é mais uma contribuição investigativa, sobre a ação do silício (Si) nas ligas da série 6000, em particular as ligas 6101 e 6201 utilizadas em transmissão de energia elétrica. Para este fim, foi realizada a solidificação em condições transitórias de extração de calor, utilizando um dispositivo em forma de "U" e ligas Al – 0,6%Mg modificadas com (0,4; 0,8; 1,2) %Si.

As propriedades mecânicas foram avaliadas pelo ensaio de tração (limite de resistência à tração e alongamento). O aspecto fractográfico da fratura foi utilizado para certificar os resultados do ensaio de tração.

Posteriormente serão avaliados outros elementos como prováveis aditivos eficientes, que favoreçam as propriedades das ligas desta série.

## PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O experimento consistiu na fundição de três ligas ternárias de alumínio com 0,6% Mg e (0,4; 0,8 e 1,2) % Si em peso. As composições químicas das ligas foram obtidas em um espectrômetro de massa, massa espectro.

As ligas foram elaboradas em um forno tipo mufla. Utilizou-se um cadinho de carvão de silício, revestido internamente por uma pintura protetora de caulim.

Todas as ligas foram fundidas pelo método direto à temperatura de 800°C. Cada liga foi submetida a quatro vazamentos por gravidade, nas mesmas condições térmicas, em coquilha de aço carbono na forma de "U".

Os vazamentos receberam injeção de argônio com vazão de 0,2 l/s, realizado a 40 mm do fundo do cadinho<sup>(13)</sup> para promover o arrastamento mecânico dos gases, formando na superfície um filme de óxido que foi removido manualmente do metal.

Destes vazamentos obteve-se 24 amostras fundidas, das quais foram retirados 48 corpos de prova na forma cilíndrica, medindo 22 mm de diâmetro e 230 mm de comprimento.

Dos 48 corpos de prova, 26 foram usinados para alcançarem o diâmetro de 11mm, e submetidos à laminação sucessiva, realizada através do canal circular do laminador, até que atingissem o diâmetro de 3,98mm. Os 12 corpos de prova restantes foram usinados segundo as dimensões prescritas na norma ASTM E-8M, para ensaios de tração.

Os resultados dos ensaios a que foram submetidos os corpos de prova laminado e usinado, foram quantificados usando uma máquina de tração Kratos IKCL1-USB, com velocidade de 100mm/min, temperatura de 25°C, uma pré-carga 220N e umidade relativa 70,00%. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR-6810-1991 (corpo de prova laminado) e ASTM E 8M-97 (corpo de prova usinado).

Após o ensaio de tração, as amostras fraturadas foram limpas com uma solução de álcool e acetona (PA), em um limpador ultra-sônico por 20 min, e caracterizadas macroscopicamente e microscopicamente.

O estudo da fractografia foi desenvolvido através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) LEO, modelo 1450VP, equipado com sistema de obtenção e identificação de padrões de difração de elétrons retroespalhados (EBSD).

## 2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 2.1 Resultados da Análise Química

As análises químicas foram realizadas em amostras obtidas das três ligas preparadas. A Tabela 2 mostra os principais elementos químicos encontrados nos materiais analisados.

**Tabela 2.** Resultado da composição química nominal das ligas (porcentagem em peso (%)).

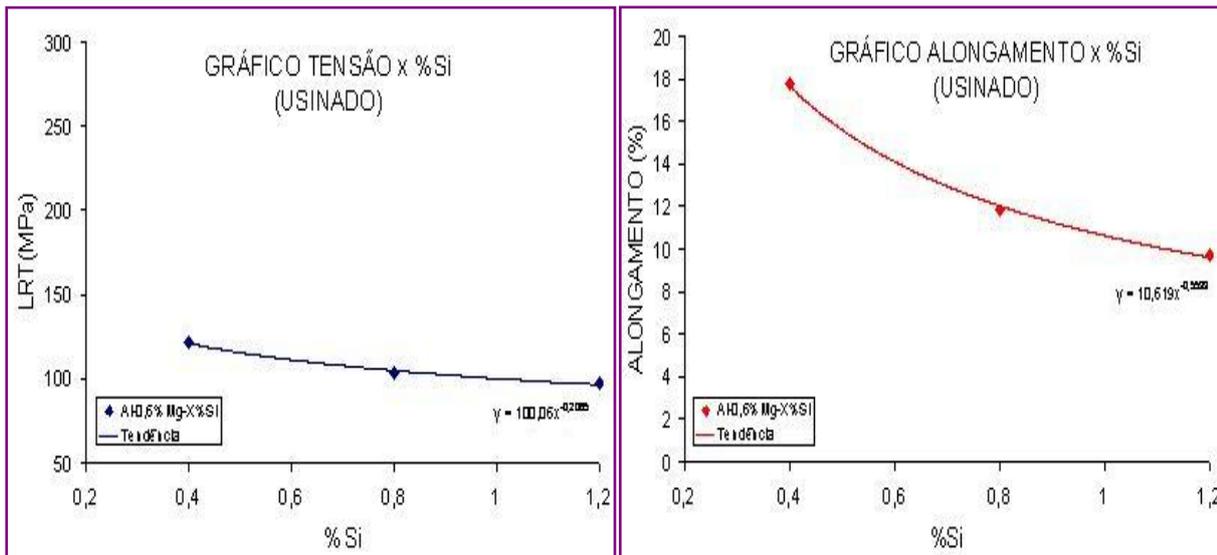
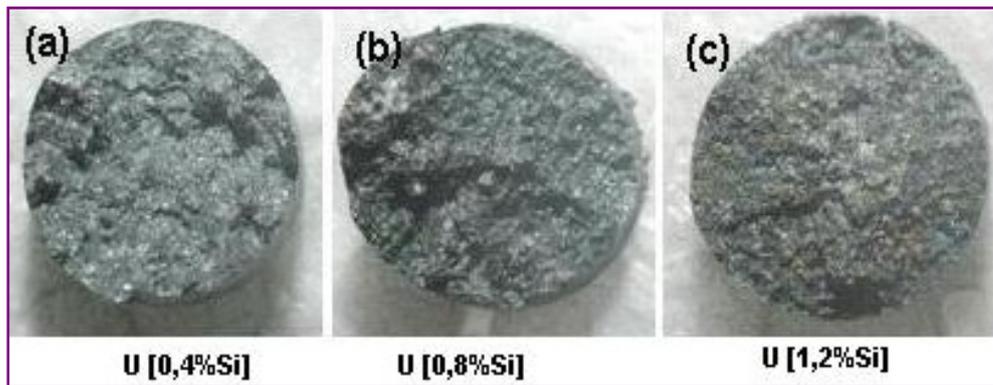
Liga	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Pb,Ca,Sr,Sn,Sb,Zn,Ni,Cr,Ti,B
A	0,409	0,001	0,606	0,193	0,030	<0,001
B	0,801	0,003	0,602	0,253	0,008	<0,001
C	1,198	0,001	0,587	0,198	0,002	<0,001

### 2.2 Resultados do Ensaio de Tração

Nos ensaios de tração foram observados os valores de alongamento e tensão de ruptura, uma vez que a perda de resistência mecânica é mais um item balizador importante na caracterização do material.

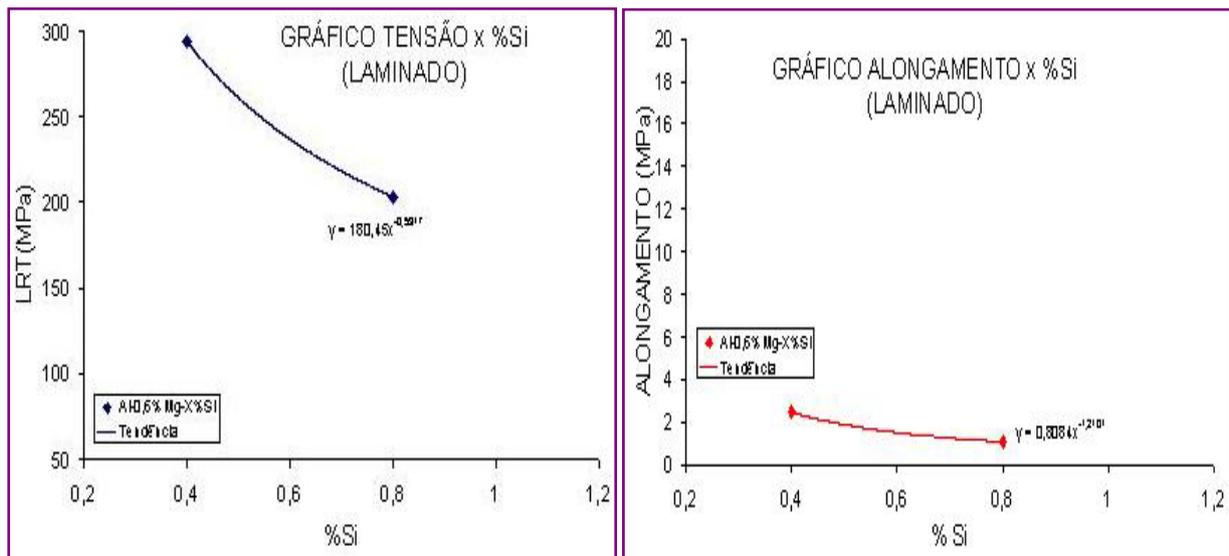
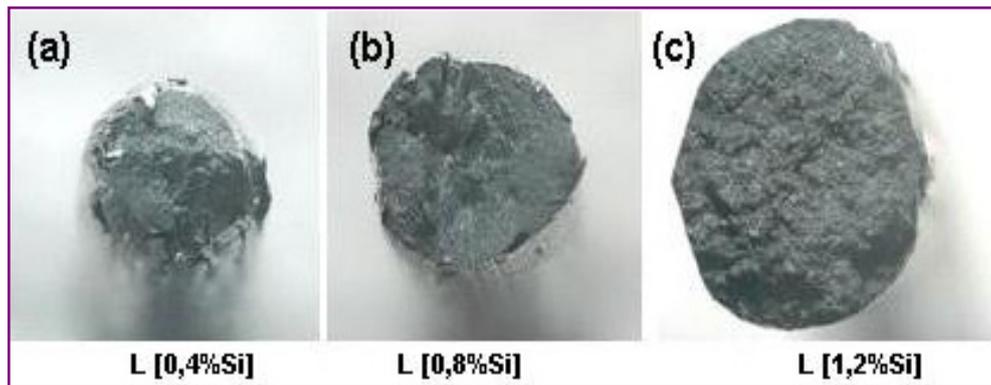
A caracterização dos ternários diluídos foi realizada sob dois aspectos: i - Em primeiro lugar foram realizados ensaios de tração, tanto nos corpos de prova usinados como nos laminados. ii) - Em seguida, as fraturas resultantes, foram avaliadas via Microscopia Eletrônica de Varredura. As duas situações em que se encontravam os corpos de prova – usinados e laminados – objetivaram estudar a ação do Si quanto a trabalhabilidade das ligas 6101 e 6201.

Os resultados de ensaios de tração para os corpos de prova usinados, encontram-se ilustrados na Figura 2, abaixo. Nela, pode ser visualizado que a topografia da fratura apresenta aspecto que denuncia elevada fragilidade, apesar de ter sido lido durante a avaliação feita, que o mesmo apresentou níveis de ductilidade, que variou entorno de 80% do menor teor Si (0,4%) para o maior teor (1,2%), apesar dos valores para o LRT não variarem consideravelmente.



**Figura 2.** Aspecto da fratura para corpos de prova na condição usinado associado ao LRT e Alongamento para os diferentes teores de Si em estudo.

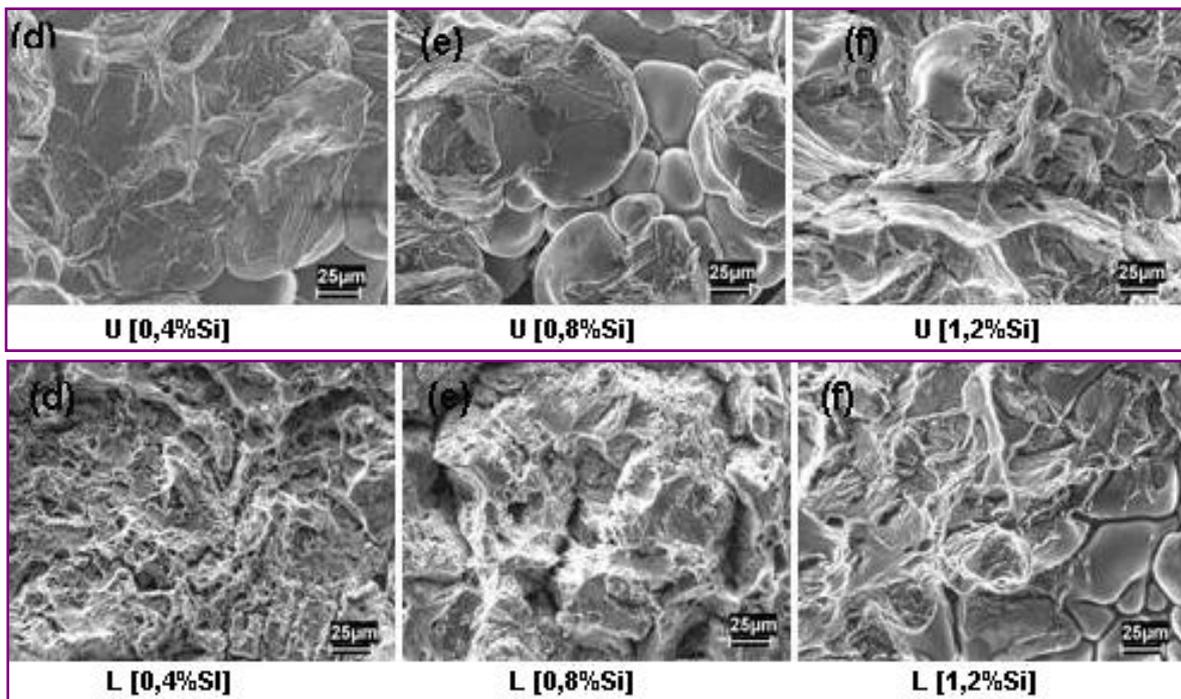
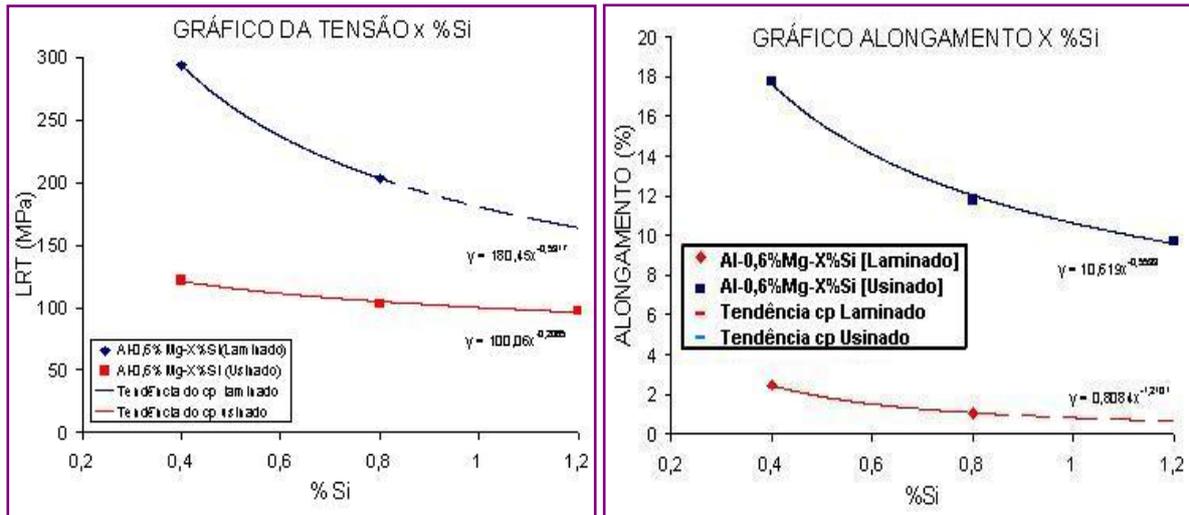
Os resultados para os ensaios de tração para os corpos de prova ensaiados, como laminados, encontram-se ilustrados na Figura 3 abaixo. Nela pode ser visualizado que a topografia da fratura apresenta aspecto no qual pode ser constatado que as ligas com os menores teores de Si (0,4% e 0,8%) apresentaram boa conformabilidade/trabalhabilidade, diferente dos corpos de prova produzidos com a liga com 1,2%Si que não conseguiu ser deformado, denunciando elevada fragilidade para esta liga. Os valores baixos para o alongamento registrados para os corpos de prova com os teores de Si (0,4% e 0,8%) foram após a etapa de encruamento.



**Figura 3.** Aspecto da fratura para corpo de prova na condição laminado associado ao LRT e Alongamento para os diferentes teores de Si em estudo.

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração comparando os valores dos LRT e alongamento dos ternários Al-0,6%Mg-(0,4; 0,8; 1,2)%Si para os corpos de prova usinado e laminado. Vê-se que para as condições propostas, os corpos de prova, na proporção em que se acrescenta o percentual de Si, apresentam menores valores para as propriedades mecânicas (LRT e alongamento). Esta constatação é compatível com a coerência teórica de que adições de silício em ligas binárias Al-Mg reduz sua ductilidade<sup>(9)</sup> sendo necessário observar-se limites rígidos se quiser manter um nível razoável da trabalhabilidade destas ligas na condição como fundidas.<sup>(16)</sup>

Baseado nos gráficos apresentados na Figura 4 observa-se que as ligas laminadas apresentam o LRT em torno de 60% maior que os corpos de prova usinados. Entretanto, o alongamento dos corpos de prova usinados é consideravelmente superior aos corpos de prova laminados, estes apresentaram um comportamento quase linear. Resultado já esperado devido à condição de deformado a frio (encruado) que naturalmente inibe a ductilidade/trabalhabilidade nos metais de um modo geral.



**Figura 4.** Resultados dos ensaios de tração associando os gráficos do LRT e Alongamento com imagens obtidas via MEV de regiões da fratura para os corpos de prova usinados e laminados em função do teor de Si.

Ressalta-se que o corpo de prova com o percentual de 1,2%Si fraturou no processo de laminação, não permitindo sua avaliação sob tração. Este comportamento não era o esperado mesmo se tendo informações dos estudos de Wang<sup>(9)</sup> e Maia,<sup>(14)</sup> pois o esperado é que o refinamento do grão gerado pela intensa movimentação do líquido interdendrítico pela diferença de densidade provocada pelo acúmulo de soluto nestas regiões possa gerar intensa fragmentação de partículas quanto maior for o teor de Si.<sup>(17)</sup>

### 3 CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos das propriedades mecânicas (resistência à tração e alongamento) e pela análise macrográfica e micrográfica da superfície fraturada. Observa-se que para as ligas utilizadas neste estudo para transmissão e distribuição de energia elétrica, adições de silício decrescem a propriedade mecânica mesmo em variações mínimas de composição, indicando a ineficácia em adicionar silício acima dos limites das faixas admissíveis para as ligas 6101 e 6201.

O percentual de 0,4% de silício mostrou ser o valor que melhor corresponde às expectativas de propriedades mecânicas satisfatórias para ligas de condução de energia, por ter apresentado valores elevados de resistência à tração e valor de alongamento superior em relação aos outros percentuais estudados e por ter sido a que melhor suportou a laminação.

### Agradecimentos

O grupo GPEMAT entende ser importante demonstrar o sincero agradecimento à Universidade Federal do Pará pela disponibilidade de espaço físico, ao GRUPO ALUBAR pela parceria e incentivo ao desenvolvimento de estudos, a ELETRONORTE pelo apoio financeiro a projetos de pesquisa a FADESP e FUNPEA que gerenciam essas parcerias entre os grupos.

### REFERÊNCIAS

- 1 MATOS, Mauro. S.V.et al. **Influência da variação de Mg na trabalhabilidade de ligas Al-Mg diluídas**. In: 59º Congresso anual da ABM, 2004. São Paulo: ABM, p46-52. 2004.
- 2 FERNANDES, D.S.et al. **Avaliação do comportamento do Mg na liga Al-Mg-Si (6101) dentro de uma faixa admissível para a fabricação de fios e cabos elétricos**. In: Congresso Anual da ABM, 58º, 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, Tec Art Editora LTda, 2003.p. 54-63.
- 3 KISHI, André. Oliveira et al. **Análise do comportamento físico e estrutural da liga Al-Mg-Si (6101) trefilada até o diâmetro de 2,50mm**. In: Wire & Cable International Symposium, 2003. **Anais...**São Paulo, 2003. p. 85-91.
- 4 POMPEI, Márcia. **Alumínio**. 2000. Disponível em: <<http://www.jóia-e-arte.com.br/index.htm>> Acesso em: 5 outubro 2003.
- 5 ASM SPECIALITY HANDBOOK. **Aluminum and aluminum Alloys**. Ed. United States of América: ASM International, 1998.p.68-69,688-689.
- 6 DORWARD, R. C.; BOUVIER, C. **A rationalization of factors affecting strength, ductility and toughness of AA 6061-type Al-Mg-Si-(Cu) alloys**. Materials Science & Engineering A. v.A254, p.33-34, may, 1998.
- 7 GAVGALI, M.; AKSAKAL, B. **Effects of various homogenisation treatments on the hot workability of ingot aluminium alloy AA 2014**. Materials Science & Engineering A. V 254, p. 189-199, may. 1998.
- 8 DEVILLE, S.C., 1856 apud WANG, L.; MAKLOUF, M; APELIAN, D. **Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships**. International Materials Reviews. v.40, n.6, p.221-237, 1995.

- 9 WANG, L.; MAKLOUF, M; APELIAN, D. **Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships.** International Materials Reviews. v.40, n.6, p.221-237, 1995.
- 10 BRIANT, C. L. **Grain boundary structure, chemistry, and failure.** Materials Science and Technology. v.17, p.1317-1323, nov. 2001.
- 11 DIGHE, Manish D.; GOKHALE, Arun M. **Relationship between microstructural extremum and fracture path in a cast Al-Si-Mg alloy.** Scripta Materialia. V.37, n.9, p.1435-1440, jul.1997.
- 12 URRETA, S.E.; LOUCHET, F.; GHILARDDUCCI, A. **Fracture behaviour of an Al-Mg-Si industrial alloy.** Materials Science & Engineering. v. A 302, p.300-307, aug.2000.
- 13 GOMES, Rennó Mario. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos.** Associação Brasileira de Metais ABM. São Paulo, 1976. 206p.
- 14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6810 - Fios e cabos elétricos tração à ruptura em componentes metálicos. – Especificação.** São Paulo, 1981
- 15 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 8M-97 - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric),** Philadelphia, 1997.
- 16 MAIA, Raimunda Figueiredo da Silva. **Avaliação da trabalhabilidade e da macroestrutura em ligas diluídas Al-Mg-Si laminadas a frio.** 2005. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém.
- 17 SPINELLI, José Eduardo. FERREIRA, I. L. Garcia, Amauri. **Influence of melt convection on the columnar to equiaxed transition and microstructure of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys.** Journal of Alloys and Compounds 384, p. 217-226, Apr. 2004.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5285 - Fios de alumínio, nus, de seção circular para fins elétricos. – Especificação.** Rio de Janeiro, 1985.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5118 - Fios de alumínio nus de seção circular para fins elétricos. – Especificação.** São Paulo, 1985.