

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO E MECÂNICO DE UMA LIGA DA SERIE 6000 SUBMETIDA À SOLUBILIZAÇÃO EM DUAS TEMPERATURAS E DEFORMADAS A FRIO¹

Washington Luis Reis Santos²
Emmanuelle Freitas de Sá²
Paulo Cordeiro Machado²
Luciana Bezerra Farias²
Jose Maria do Vale Quaresma²

Resumo

As ligas de Al-Mg-Si são muito utilizadas para um segmento da indústria voltada para a fabricação de fios e cabos para o transporte de energia elétrica. Esta liga é considerada como endurecível por precipitação, segundo alguns autores, devido a presença do composto intermetálico Mg₂Si, então propôs-se uma seqüência de tratamentos térmicos de solubilização para se avaliar melhor a capacidade de endurecimento pós – solubilização seguida de deformação a frio seguido de várias taxas de deformação. As temperaturas utilizadas neste tratamento térmico foram de 490 e 530 °C por 2h. As amostras foram submetidas aos processos de laminação e trefilação, desde o diâmetro de 9,5 mm até o 2,50 mm; obtendo-se dados sobre os variados aspectos da deformação. Após esta etapa são realizados os ensaios de resistividade elétrica e tração que tem o objetivo de correlacionar às propriedades mecânicas e elétricas em função das variações das diferentes temperaturas de solubilização com as estruturas obtidas.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Tratamento térmico; Solubilização.

STUDY OF ELECTRICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR IN AN ALLOY OF 6000 SERIES SUBMITTED TO SOLUBILIZATION IN TWO TEMPERATURES AND COLD-DEFORMED

Abstract

Al-Mg-Si alloys are widely used for industry segment turned for manufacturing of wires and cables to the electrical energy transport. This alloy is considered hardenable by precipitation (according to some authors) due presence of Mg₂Si intermetallic compound. A sequence of solubilization heat treatment was proposed to better alleviate the post solubilization hardening capacity followed by cold forming followed by several rates of deformation. The temperatures utilized on this heat treatment were 490 and 530 for 2h. The specimens were submitted to rolling and drawing processes, from 9,5 mm up to 2,5 mm diameter, obtaining datas about varied deformation aspects. After this step were realized electrical and tension resistivity tests which has the objective correlate the mechanical and electrical properties in function of variations of different solubilization temperatures with the obtained structures.

Key words: Mechanical properties; Heat treatment; Solubilization.

¹ Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Universidade Federal do Pará, Guamá Rua Augusto Corrêa 01 CEP 66075-110, , quaresma@fem.unicamp.br

1 INTRODUÇÃO

Neste estudo foi priorizada a avaliação da influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas e elétricas de duas ligas da serie 6000 a partir da solubilização. A solubilização consiste no aquecimento e permanência do material em região monofásica do diagrama de equilíbrio, no geral em temperaturas compreendidas entre as temperaturas eutéticas e solvus da liga, e em seguida rapidamente resfriados para que se obtenha então, uma solução sólida supersaturada.⁽¹⁾

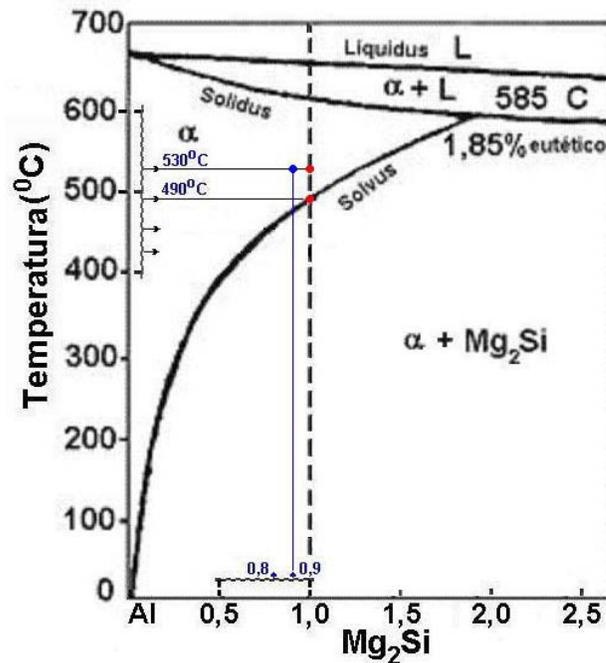


Figura 1 – Diagrama pseudo-binário Al-Mg₂Si.⁽²⁾

Na Figura 1 observamos parte do diagrama de equilíbrio pseudo-binário das ligas Al-Mg₂Si que mostra o campo monofásico alfa [α], evidenciando que acima da linha solvus, determinada por uma combinação de temperatura e de teor de Mg₂Si, o magnésio e o silício encontram-se dissolvidos na matriz de alumínio. Quando é feito um resfriamento rápido em água, mantém-se à temperatura ambiente a solução sólida supersaturada.

Com base nestes conceitos e trabalhos anteriores desenvolvidos pelo GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais), foram definidas as temperaturas de 490°C e 530°C e o tempo de 2 horas para os tratamentos térmicos, uma vez que autores em seus estudos sugerem que uma elevada resistência é obtida depois de 60 minutos de solubilização, indicando que a solução sólida é saturada em Mg e Si.⁽³⁾

2 MATERIAIS E METODOS

O material utilizado para o estudo foram perfis cilíndricos da liga com diâmetro de 9,5 mm, obtidos a partir de lingotes oriundos de experiências em laboratório, tendo suas composições químicas, confirmadas através de espectrômetro óptico e

comparadas com a faixa de composição química admissível da liga, como relacionadas na tabela abaixo.

Tabela 1 - Faixa de composição química admissível para a liga 6101

LIGA	Si	Fe (Máx.)	Cu (Máx.)	Mn (Máx.)	Mg	Zn (Máx.)	B (Máx.)
6101	0,3 – 0,7	0,5	0,1	0,03	0,35 – 0,8	0,1	0,06
6201	0,5 – 0,95	0,5	0,1	0,03	0,6 – 0,9	0,1	0,06
Liga em Estudo	0,6482	0,2634	0,0024	0,0018	0,6333	0,0008	0,0026

As amostras da liga foram separadas em três lotes. Dois deles foram submetidos à solubilização a 490 °C e a 530 °C por 2h, em um forno tipo mufla e a terceira amostra, foi caracterizado sem nenhum tipo de modificação térmica. Após os tratamentos térmicos foram realizados os processos de deformação por laminação e trefilação, consecutivamente até o diâmetro de 2,50 mm em todas as amostras. As Figuras 2 e 3 mostram os equipamentos utilizados para conformação das amostras.



Figura 2- Laminador elétrico utilizado.

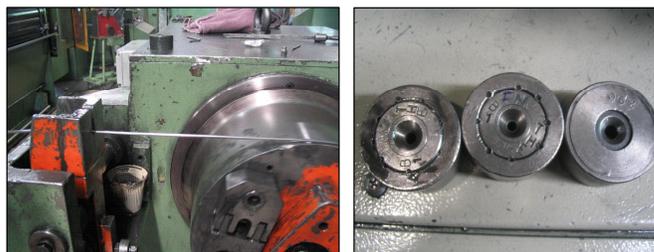


Figura 3 - Trefiladora, fierras de diamante.

A caracterização elétrica foi executada através do ensaio de resistividade elétrica, com o auxílio de um Multiohmímetro MEGABRÁS (ponte de Kelvin) modelo MPK-2000 (Figura 4^a). A resistência elétrica dos fios foi medida a uma temperatura não inferior a 10°C, nem superior a 30°C, e foi corrigida para uma resistividade (ρ), a temperatura de 20°C com a utilização da norma NBR 5285, logo após a padronização, os dados são convertidos para IACS (*International Annealed Copper Standard*), padrão internacional de condutividade correspondente a apresentada por um fio de cobre com 1m de comprimento e 1mm² de seção transversal, a 20°C.

A caracterização mecânica foi feita em uma máquina de tração KRATOS modelo IKCL1-USB (Figura 4 b), acoplada a um microcomputador com sistema de aquisição de dados, os ensaios foram realizados segundo as normas NBR 6810, já na forma de fios com os diâmetros desejados e após a etapa de caracterização elétrica.

A caracterização das amostras após o ensaio de tração foi efetuada via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Figura 4c, utilizando-se de aumentos de 3.000x ($5\ \mu\text{m}$).



Figura 4 – a) Microhomímetro utilizado para o ensaio de condutividade; b) máquina de testes de tração KRATOS; c) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3 RESULTADOS

3.1 Propriedades Mecânicas

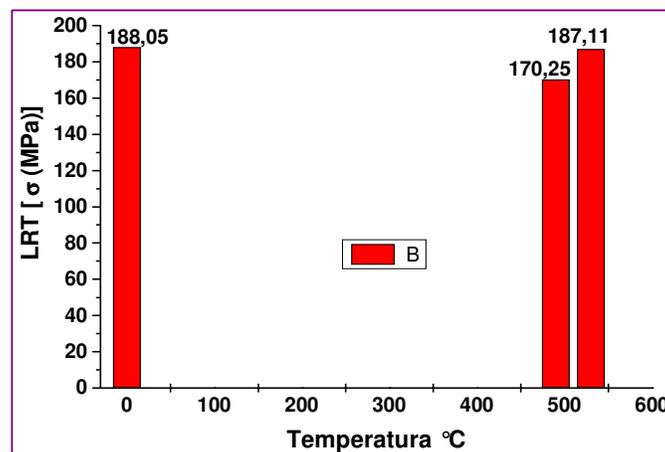


Figura 5 – Comparação de LRT feita entre o vergalhão natural e o solubilizado em diferentes temperaturas.

A Figura 5 apresenta comparação quanto aos LRT, desta feita entre amostras dos perfis produzidos com e sem solubilização. Nesta comparação, as amostras estão como solidificada e solubilizadas a $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ por duas horas. Os resultados permitem refletir sob dois aspectos: I. Com e sem solubilização, as amostras parecem não reagir ao tratamento de solubilização, em particular, com a menor temperatura; II. Com solubilização, com vantagem para as amostras solubilizadas a $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ por duas horas, da ordem 10%.

No desenvolvimento dos estudos procurou-se associar os resultados obtidos como forma de facilitar as análises.

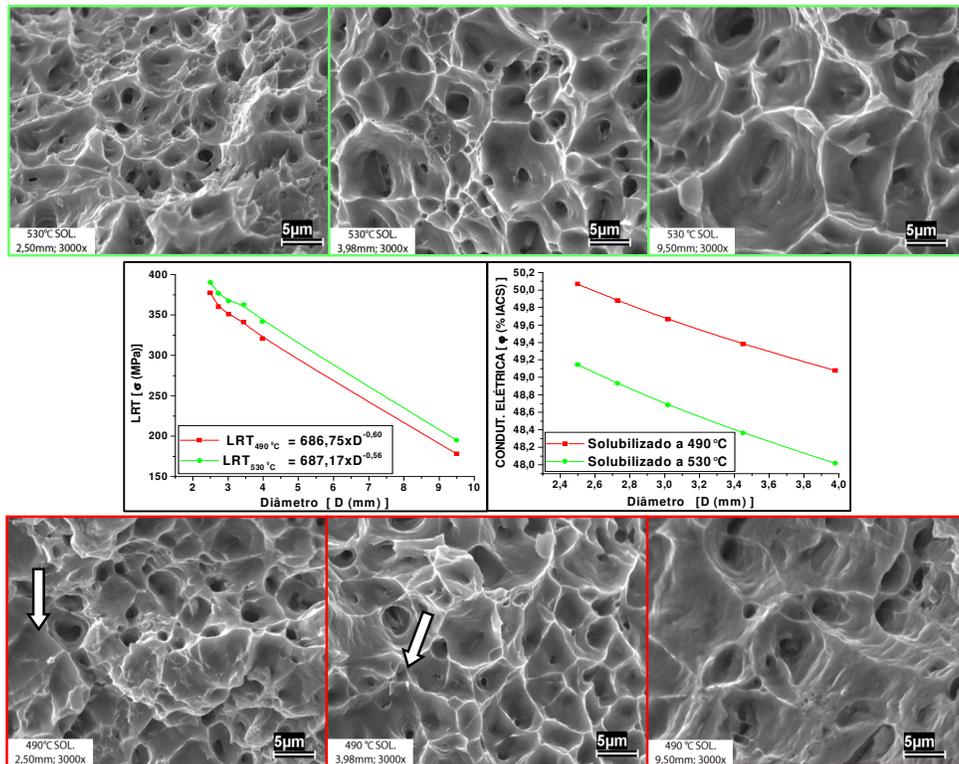


Figura 6 – Comparação entre LRT e IACS em função do diâmetro para as ligas solubilizadas a 490°C e a 530°C e temperadas.

Os valores dos testes de tração que estão plotados na Figura 6 comparam o desempenho das amostras que foram submetidas à solubilização a 490°C e a 530°C e temperadas. Os resultados apontam como melhor desempenho para os obtidos em maior temperatura de solubilização. No caso da evolução do comportamento mecânico associado à micro cavidades, tem-se que os maiores LRT estão associados às menores, mais fechadas, e mais profundas, isto é, sem a presença de indícios de coalescência de grão ou de micro cavidades, como indicado pelas setas nas fractografias das amostras tratadas à 490°C.

Entretanto, quando se trata dos valores obtidos nos testes de condutividade elétrica, o desempenho das amostras produzidas e que foram submetida à solubilização e temperadas, aquelas que foram tratadas a 490°C apresentaram melhores resultados. No caso da condução elétrica associada à micro cavidade tem-se que os maiores valores estão associados as maiores, mais abertas, e menos profundas, como pode ser visto na Figura 6.

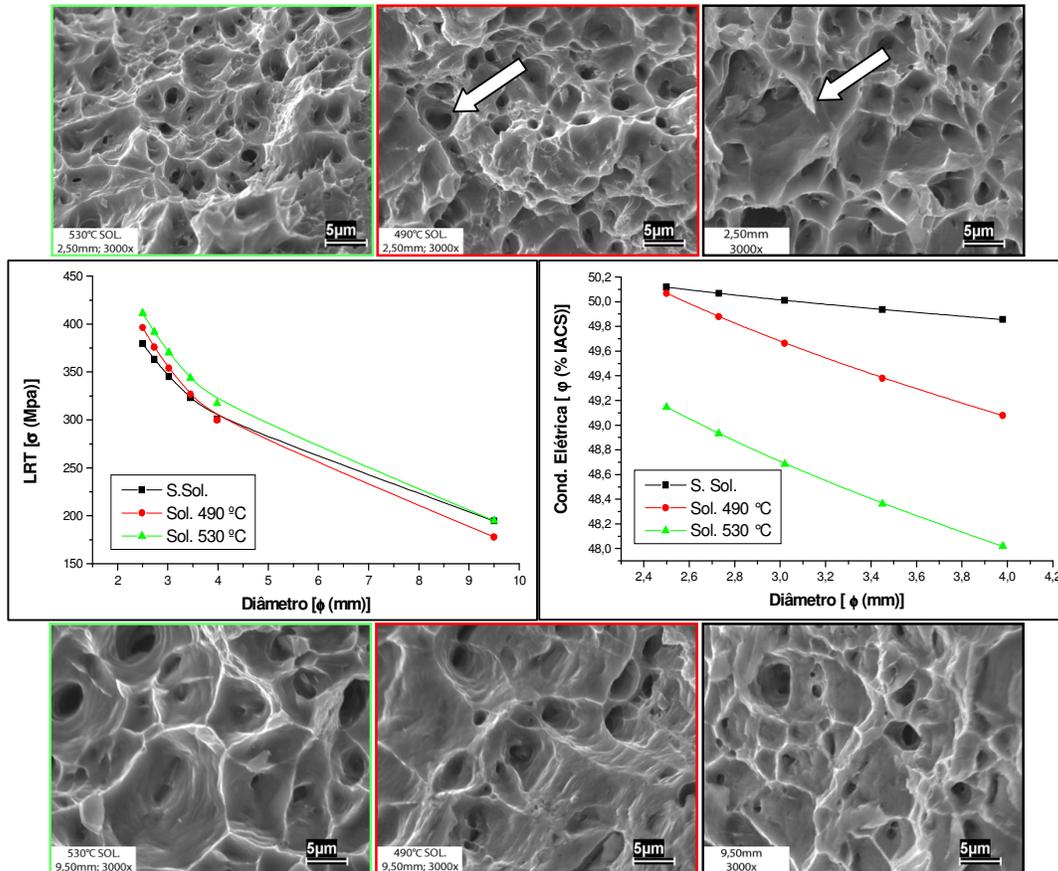


Figura 6 – Compara a correlação entre o LRT, %IACS e os diâmetros das amostras das ligas com ênfase para os $\phi = 2,50\text{mm}$; $\phi = 9,50\text{mm}$ e os vários aspectos de Tratamentos Térmicos a que foram submetidas as amostras.

A Figura 6 apresenta a comparação de resultados que envolvem, além das amostras tratadas termicamente, uma terceira amostra sem solubilização. O conjunto esta formado pelas fractografias de dois diâmetros: $\phi = 2,50\text{mm}$ na parte superior; $\phi = 9,50\text{mm}$ parte inferior, além dos gráficos dos ensaios mecânicos e elétricos. Este arranjo nos permite tecer os seguintes comentários: I. A primeira vista, as microcavidades apresentadas nos menores diâmetros apresentaram fortes indícios de coalescimento das mesmas. E, este aspecto fica mais evidente nas fractografias resultantes das amostras com menor temperatura de solubilização e não solubilizada, como indicam as setas na Figura 6; II. A liga sem solubilização é a que apresenta o menor desempenho mecânico uma vez que reage às taxas de deformação aplicadas no processo mais lentamente. As comparações entre os resultados obtidos dos ensaios de tração sugerem que as ligas apesar da forte tendência ao coalescimento apresentam boa reação às grandes taxas de deformação.

Os resultados dos ensaios de caracterização elétrica parecem estar associados às dimensões das microcavidades e quanto maiores e menos profundas possibilitam melhores condições de condução e distribuição de energia elétrica.

4 DISCUSSÕES

A partir da análise dos valores obtidos nos ensaios de tração, para os fios deformados e para os diferentes tempos de tratamento térmico, observamos que há um aumento no LRT para maiores temperaturas de solubilização, e quando comparadas a amostra sem tratamento térmico a resistência mecânica se torna maior. Este fato reside no coalescimento dos grãos provocado pela solubilização, e também pelo endurecimento que foi causada pelos diferentes passes dos processos de deformação, tais dados corroboram com os estudos que sugerem uma elevação na resistência depois de 60 minutos de solubilização.

5 CONCLUSÃO

Análise dos resultados até aqui apresentados parecem indicar que:

As ligas apresentaram forte tendência ao coalescimento e, portanto, ao crescimento de grão e, como conseqüência, reagiram mais lentamente ao encruamento quando submetidas às taxa de deformação escolhidas à medida que se elimina a solubilização e, nestes casos, a forte tendência ao coalescimento ao produzir micro cavidades abertas e pouco profundas contribui positivamente para elevar a capacidade de conduzir e distribuir energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V., "Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas", Ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003, pp 224;
- 2 USTA M., GLICKSMAN M.E., And WRIGHT R.N. "The Effect of Heat Treatment on Mg₂Si Coarsening in Aluminum 6105 Alloy"; Metallurgical and Materials Transactions A; vol. 35A, pp. 435-438, 2; Feb 2004. Wilson Applied Science & Technology Abstracts, pg. 435;
- 3 PEDERSEN L., ARNBERG L., "The Effect of Solution Heat Treatment and Quenching Rates on Mechanical properties and Microstructures in AlSiMg Foundry Alloys"; Metallurgical and Materials Transactions A; vol. 32,; pp. 525-532; 3; Mar 2001. Academic Research Library Abstracts, pp. 525.