

AÇÃO DO Si E DO Mg NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 6101 (Al-Mg-Si) SOLUBILIZADA E ENVELHECIDA ARTIFICIALMENTE ⁽¹⁾

Emerson David Cavalcante Santos ⁽²⁾

André Oliveira Kishi ⁽³⁾

Mauro Sérgio Vieira Matos ⁽⁴⁾

Kleber Agustín Sabat da Cruz ⁽⁵⁾

José Maria do Vale Quaresma ⁽⁶⁾

O principal objetivo deste trabalho é analisar o efeito da variação dos teores de silício e magnésio nas propriedades mecânicas da liga 6101, através das respostas dos ensaios de tração.

Para tanto, fez-se a variação dos percentuais dos teores de Silício (0,3; 0,5 e 0,7%) e de Magnésio (0,4; 0,6 e 0,8%). Os vazamentos foram feitos em uma câmara de solidificação unidirecional, em molde de aço com espessura de 63 mm. Retirou-se dos lingotes obtidos, corpos de prova para ensaios de tração, que foram solubilizados por 6 horas a 540°C e envelhecidos artificialmente por 6 horas a 150°C. Os ensaios de tração foram feitos em uma máquina Kratos MD2000, em posições previamente definidas no lingote.

Observou-se que os valores do Limite de Resistência à Tração (LRT) aumentam e o alongamento ($\delta\%$) diminui com o aumento dos teores de silício e magnésio na liga, tanto para amostras solubilizadas, quanto para amostras envelhecidas.

Palavras-chave: Liga 6101, Solubilização, Envelhecimento artificial, Propriedades mecânicas.

V Seminário de Fundição – 2004, 17 a 19 de maio, Salvador-BA.

⁽¹⁾ – Trabalho a ser apresentado no V Seminário de Fundição 2004.

⁽²⁾ – Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

⁽³⁾ – Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

⁽⁴⁾ – Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

⁽⁵⁾ – Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

⁽⁶⁾ – Prof. Dr., DEM – CT – Universidade Federal do Pará.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de alumínio e suas ligas no mercado mundial tem crescido consistentemente por suas características de condutibilidade e leveza, que atendem às necessidades das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, com uma das menores taxas de desperdício ao longo de sua extensão.

As ligas de Al-Mg-Si (série 6xxx) são endurecíveis por precipitação e podem ser tratadas termicamente na condição “T6” (tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera e envelhecimento artificial) e na condição “T4” (tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera e envelhecimento natural) para adquirirem adequada resistência mecânica. O endurecimento dessas ligas, durante o envelhecimento, é provocado pela precipitação de Mg e Si, que caminham para sua forma mais estável Mg_2Si . No envelhecimento artificial (T6) as mudanças de propriedades mecânicas ocorrem de forma mais acelerada tornando possível a análise do comportamento da liga 6101 frente às variações de composição química, para ligas envelhecidas.

Os tratamentos térmicos feitos na liga de Al-6082 com 0,6%Mg, 0,9% Si, 0,5%Mn e 0,2%Fe (MARIOARA, et al, 2001), podem elevar a um aumento considerável a dureza da liga. Este aumento é devido à presença de várias fases metaestáveis (em particular β''). Já a fase pré- β'' , tem aparência de agulha, como tem esta fase β'' . As posições de Mg nesta liga e as de Si são ocupadas parcialmente por átomos de Al. A composição, portanto, é menos rica em Mg do que β'' (Mg_5Si_6). O conteúdo do Al na estrutura dos precipitados aumenta com o grau de formação da matriz de Al.

Em seus estudos Ringer et al (RINGER e HONO, 2000) mostra que a natureza e a cinética do processo de endurecimento por precipitação depende das interações soluto/soluto por produzirem agrupamentos que precedem a formação de zonas GP.

Siddiqui et al, (SIDDIQUI et al, 2000) investigou que o aumento inicial na resistência à tração, tensão de escoamento, dureza e fadiga é causado pelas vacâncias provenientes do mecanismo de difusão e formação de uma alta fração de volume das zonas GP. Seus resultados mostraram que a combinação de tempo e temperatura de envelhecimento artificial, que dá o máximo de resistência à tração, tensão de escoamento e dureza para a liga 6063, está entre 8 e 10h a uma temperatura de 175°C, acima disso, essas propriedades começam a perder rendimento.

Gupta e Lloyd (GUPTA e LLOYD, 2001) em seus estudos sobre ligas da série 6000 com excesso de Si, considerando que este é um conceito recente, constataram que o excesso de Si melhora a cinética de precipitação e aumenta a resistência mecânica, tanto para o tratamento T4, quanto para o tratamento T6.

2. OBJETIVO

Analisar o efeito da variação dos teores de Silício e Magnésio nas propriedades mecânicas da liga 6101, através das respostas dos ensaios de tração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

- Liga 6101 (Al-Mg-Si);
- Composição constante de Mg: Al-0,6% Mg. Primeiramente, fez-se a variação do Si nos teores de 0,3; 0,5 e 0,7% para a obtenção de uma liga ternária.
- Para obtenção de outra liga ternária manteve-se o teor constante de Si em 0,5% e variou-se o Mg em 0,4; 0,6 e 0,8%;

- É importante ressaltar que, as faixas de composições químicas estudadas estão dentro da faixa admissível da liga 6101 (Tabela 1).

Composição química nominal da liga 6101 (%)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	B	Outros	Al
0,30 a 0,70	0,50 máx.	0,10 máx.	0,03 máx.	0,35 a 0,80	0,03 máx.	0,10 máx.	0,06 máx.	0,10 máx.	97,58 mín.

Tabela 1 – Composições químicas admissíveis para a liga 6101 (ASM METALS HANDBOOK).

Amostras (Al-0,6%Mg-X%Si)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	B	Al
0,496	0,138	0,0023	0,0057	0,398	0,0030	0,0052	0,0021	0,0010	~ 98,74
0,537	0,136	0,0018	0,0058	0,633	0,0025	0,0042	0,0079	0,0060	~ 98,66
0,546	0,146	0,0023	0,0060	0,824	0,0026	0,0047	0,0032	0,0024	~ 98,46
Amostras (Al-0,5%Si-X%Mg)									
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ni	Ti	B	Al
0,331	0,159	0,0158	0,0113	0,603	0,0159	0,0035	0,0082	0,0028	~ 98,84
0,537	0,136	0,0018	0,0058	0,633	0,0025	0,0042	0,0079	0,0060	~ 98,66
0,714	0,120	0,0021	0,0054	0,614	0,0042	0,0040	0,0034	0,0020	~ 98,53

Tabela 2 – Médias das composições químicas das ligas ternárias utilizadas neste estudo. Todas as ligas estão dentro da faixa admissível para a 6101.

- As ligas foram vazadas em uma câmara de solidificação unidirecional, em molde de aço com espessura de 63 mm;
- Abaixo temos a foto do lingote obtido após solidificação unidirecional (Figura 1a) e a ilustração esquemática do processo (Figura 1b). O fluxo de calor (representado pela seta acima) é contrário à direção da frente de solidificação, neste processo de solidificação. Também é mostrada na Figura 1b a direção do crescimento dendrítico e de onde são retirados os corpos de prova para ensaios de tração.

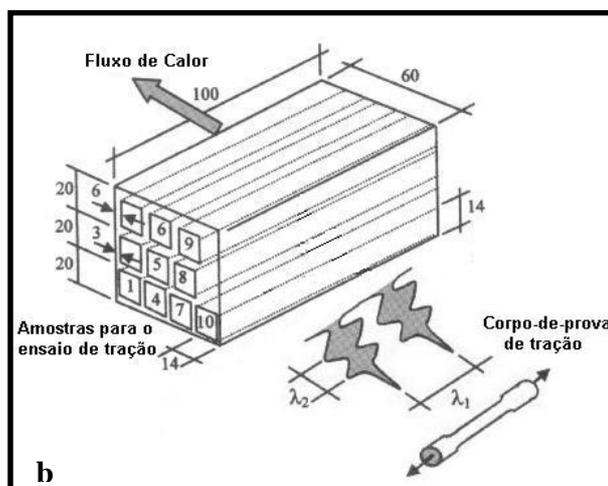
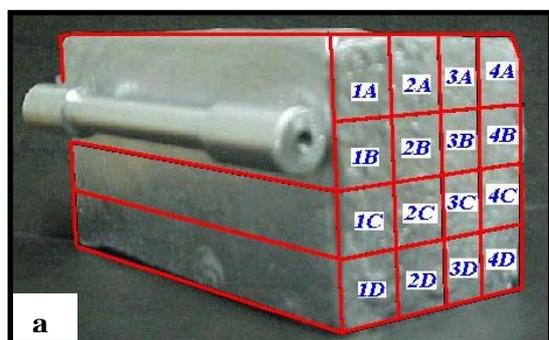


Figura 1 – Em (a): Lingote mostrando os detalhes dos corpos-de-prova retirados para o ensaio de tração com suas determinadas posições. Em (b): Ilustração de um lingote mostrando a direção do fluxo de calor, o crescimento dendrítico e corpos de prova para o ensaio de tração.

- Retirou-se dos lingotes obtidos, corpos de prova para ensaios de tração, que foram solubilizados por 6 horas a 540°C e envelhecidos artificialmente por 6 horas a 150°C;
- Os ensaios de tração foram feitos em uma máquina Kratos MD2000; Os corpos de prova para os ensaios de tração (Figura 1a) foram confeccionados com base na norma ABNT NBR 7549 (outubro/1982).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Análise das propriedades mecânicas após a Solubilização

Este tópico diz respeito à análise das propriedades mecânicas da liga, resistência à tração e alongamento, após solubilização à 540°C por 6 horas. A Figura abaixo mostra o comportamento dessas propriedades, em função dos teores de Silício e de Magnésio.

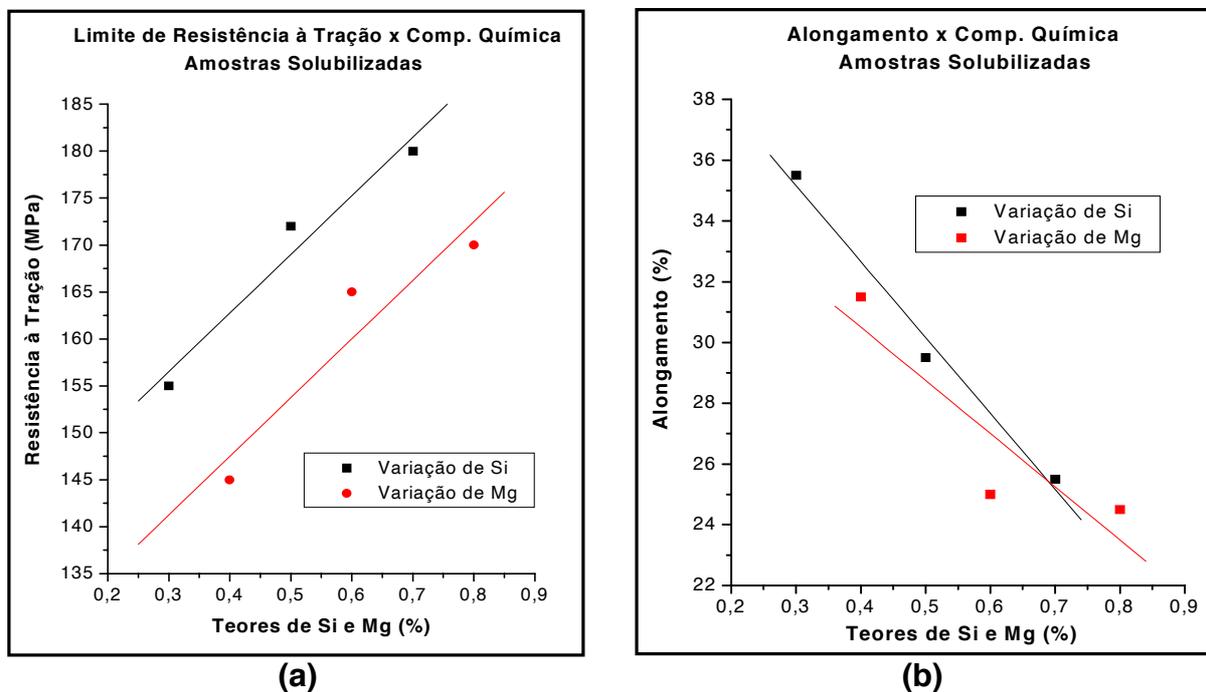


Figura 3 – Propriedades mecânicas da liga 6101, após solubilização a 540°C por 6h. Em (a): Gráfico Tração x Composição química. Em (b): Gráfico Alongamento x Composição química.

A Figura 3a mostra que a evolução dos teores de silício e de magnésio eleva o Limite de Resistência à Tração (LRT) da liga, quando submetida ao tratamento térmico de solubilização seguida de resfriamento rápido (têmpera). Conforme esperado, o Silício conferiu à liga maiores valores de LRT do que o Magnésio, na etapa de solubilização.

No que se refere ao alongamento (Figura 3b), verifica-se que a evolução dos teores de silício e de magnésio, após a têmpera, confere à liga um decréscimo na ductilidade que está diretamente relacionado ao crescimento do LRT, sendo mais intenso para o Silício.

4.2 - Análise das propriedades mecânicas após Envelhecimento Artificial

Nesta etapa serão discutidas as propriedades mecânicas da liga, resistência à tração e alongamento, após envelhecimento artificial à 150°C por 6 horas. A Figura abaixo mostra o comportamento dessas propriedades, em função dos teores de Silício e de Magnésio.

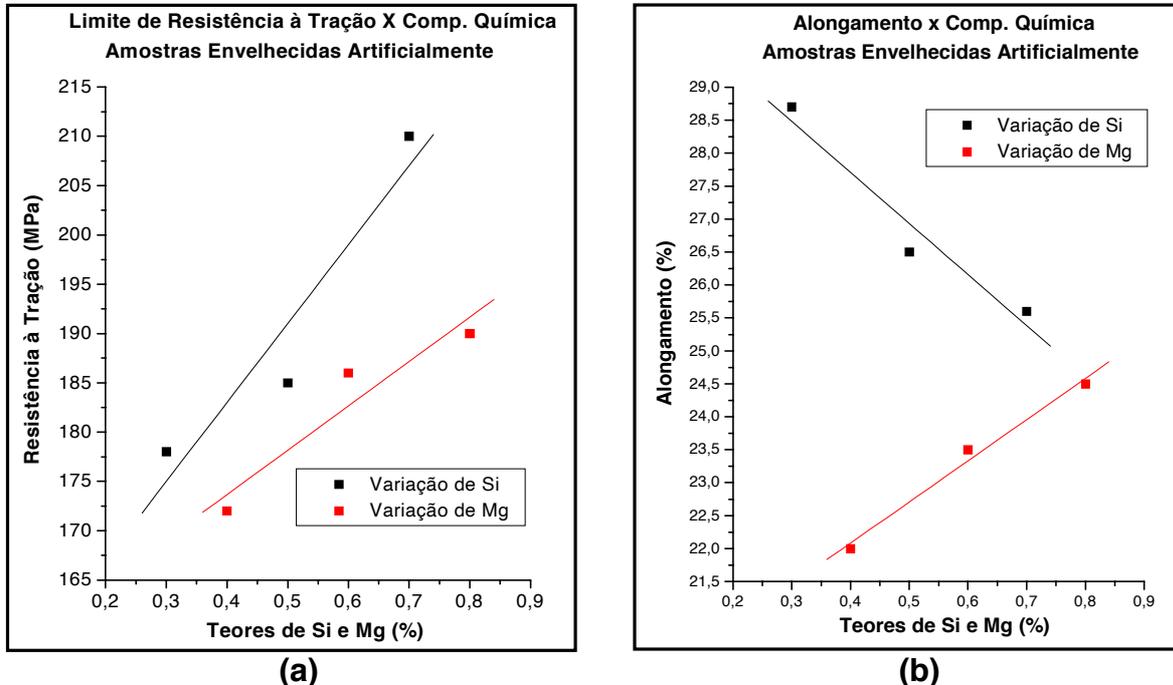


Figura 4 – Propriedades mecânicas da liga 6101, após envelhecimento artificial a 150°C por 6h. Em (a): Gráfico Tração x Composição química. Em (b): Gráfico Alongamento x Composição química.

Na Figura 4a observa-se que todos os resultados foram satisfatórios, pois os valores de resistência à tração aumentaram, se comparados com as respostas após a solubilização (Figura 3a). Isto nos confirma que todas as ligas, mesmo com diferentes teores de silício e magnésio, apresentam forte poder de endurecimento por precipitação de fases.

A Figura 4b mostra que há uma queda brusca de ductilidade, na curva de tendência para a variação de Si, o que está diretamente relacionado ao crescimento do LRT na etapa de envelhecimento artificial. Já para o magnésio, as amostras envelhecidas tiveram um comportamento quase linear, aumentando o alongamento com o aumento do teor. Este comportamento dá a idéia de que o magnésio tem o poder de aumentar a ductilidade da liga como envelhecida.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos concluiu-se que:

No resultado de LRT observa-se que: para as amostras solubilizadas, seu comportamento foi consideravelmente menor do que para as amostras envelhecidas, tanto para os teores de Mg, quanto para os de Si.

Observou-se que a variação dos teores de Si confere à liga um maior Limite de Resistência à Tração, tanto para as amostras solubilizadas, quanto para as envelhecidas.

Para o alongamento há uma queda brusca de ductilidade, na curva de tendência para a variação de Si, tanto na solubilização, como no envelhecimento artificial, o que está diretamente relacionado ao crescimento do LRT nas etapas de solubilização e envelhecimento artificial. Já para o Magnésio, as amostras envelhecidas tiveram um comportamento diferente das amostras solubilizadas, aumentando o alongamento com o aumento do teor. Este comportamento dá a idéia de que o magnésio tem o poder de aumentar a ductilidade da liga como envelhecida.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EDWARDS, G. A.; STILLER, K.; DUNLOP, G. L. e COUPER, M. J.; The Precipitation Sequence in Al-Mg-Si Alloys. *Acta Mater*; Vol. 46; nº 11; p. 3893 – 3904; 1998.

MARIOARA, C. D; ANDERSEN, S. J.; JANSEN, J. e ZANDBERGEN, H. W.; Atom Model for GP Zones in a 6082 Al-Mg-Si System. *Acta Materialia*, Vol. 49, p. 321-328, 2001.

RINGER, S. P. e HONO, K; Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys: Atom Probe Field-Ion Microscopy and Transmission Electron Microscopy Studies. Elsevier Science Inc.; 2000.

SIDDIQUI, A. R.; HUSSEIN, A. A. e KHAMIS R. A.; Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, p. 234-240, 2000.

MURAYAMA, M. AND HONO, K.; Pre-Precipitate Clusters and Precipitation Processes in Al-Mg-Si Alloys. *Acta Materialia*; vol 47; Nº 5; pp. 1537 – 1548; (1999).

ASM METALS HANDBOOK, Metallography and Microstructures; Vol. 9; 1999.

GUPTA, A. K; LLOYD, D. J.; e COURT, S. A.; Precipitation Hardening in Al-Mg-Si Alloys With and Without Excess Si. *Materials Science and Engineering A316* (2001); p. 11-17.

ACTION OF THE Si AND Mg IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE 6101 ALLOY (Al-Mg-Si) SOLUBILIZED AND ARTIFICIALLY AGED ⁽¹⁾

Emerson David Cavalcante Santos ⁽²⁾

André Oliveira Kishi ⁽³⁾

Mauro Sérgio Vieira Matos ⁽⁴⁾

Kleber Agustín Sabat da Cruz ⁽⁵⁾

José Maria do Vale Quaresma ⁽⁶⁾

The main objective of this work is to analyze the effect of the variation of the silicon tenors and magnesium in the mechanical properties of the 6101 alloy, through the answers of the traction tests.

For so much, it was made the variation of the percentile of the silicon compositions (0,3; 0,5 and 0,7%) and of magnesium (0,4; 0,6 and 0,8%). The castings were made in a unidirectional solidification chamber, in steel mold with thickness of 63 mm. Left of the obtained ingots, specimens for traction tests that were solubilized for 6 hours to 540°C and aged artificially by 6 hours to 150°C. The traction tests were made in a machine Kratos MD2000, in positions previously defined in the ingot.

It was observed that the values of the tensile strength (MPa) they increase and the elongation (%) it decreases with the increase of the silicon tenors and magnesium in the league, so much for samples solubilized, as for aged samples.

Keywords: 6101 alloy, Solubilization, Artificial aging, Mechanical properties.

V Casting Seminar, May 17-19 2004, Salvador – Bahia.

(1) – Article to be presented in the V Casting Seminar 2004.

(2) – Mechanical Engineering Undergraduate, Universidade Federal do Pará;

(3) – Mechanical Engineering Undergraduate, Universidade Federal do Pará;

(4) – Mechanical Engineering Undergraduate, Universidade Federal do Pará;

(5) – Master´s degree student, Universidade Federal do Pará;

(6) – Dr. Prof., DEM – CT – Universidade Federal do Pará.