

# **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO EXCESSO DE Si % NO ENDURECIMENTO DA LIGA 6101 (Al , Mg , Si) ENVELHECIDA ARTIFICIALMENTE<sup>(1)</sup>**

Mauro Sérgio Vieira Matos<sup>(2)</sup>  
André Oliveira Kishi<sup>(3)</sup>  
Emerson David Cavalcante Santos<sup>(4)</sup>  
Sandro Pereira Corrêa<sup>(5)</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>(6)</sup>

O escopo deste trabalho é avaliar a resposta mecânica de vergalhões da liga 6101 (Al, Mg, Si), através de ensaios de tração e condutividade elétrica obtidos através de lingotamento contínuo, como fabricado e após tratamento de envelhecimento artificial a 150°C por até 4h.

Vários vergalhões (diâmetro de 9,5mm) de liga 6101 obtidos através de lingotamento contínuo foram selecionados para estudo de sua composição química. A partir desse registro calculou-se o excesso de Si% para cada um pela expressão: Excesso de Si = (%Si na liga) – [(%Mg na liga)/1,73 + 0,25 x (%Fe na liga)]. Então, antes e depois de sofrerem tratamento térmico a 150°C por até 4h, testes de tração e condutividade elétrica foram feitos nos vergalhões selecionados e seus comportamentos foram registrados em gráficos plotados no decorrer do tempo de tratamento de envelhecimento artificial.

Os gráficos obtidos a partir dos testes feitos mostraram uma resposta natural e satisfatória ao tratamento de envelhecimento artificial, porém não fica evidenciado que o excesso de silício% como definido anteriormente irá influenciar significativamente no endurecimento da liga 6101. Vale registrar que esse parâmetro deve ser registrado como mais um parâmetro de escolha para uso da liga.

Palavras-Chave: Liga 6101, Excesso de Si, Tratamento Térmico.

---

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

Segundo *Edwards* [2] a seqüência de precipitação nas ligas da série 6xxx, quando submetidas ao envelhecimento é: Aglomerados de Mg e Si, Zonas GP-I, Zonas GP-II/ $\beta''$ ,  $\beta'$ ,  $\beta$ Mg<sub>2</sub>Si. No seu trabalho o autor afirma que a formação das fases endurecidas estão altamente ligadas com a distribuição dos aglomerados de Mg e Si. Logo, para qualquer envelhecimento a baixa temperatura, um tempo suficiente deve ser respeitado para que se desenvolva uma boa quantidade desses aglomerados.

A partir dos estudos feitos por *Gupta et. al* [1], onde o autor afirma que o acréscimo do excesso de Si em ligas de Al (Tabela 1), contendo Fe, Si e Mg em várias composições, muda a densidade e composição de partículas metaestáveis  $\beta''$ . Portanto ligas da série 6xxx geralmente contêm uma quantidade de Si acima daquela necessária para formar o Mg<sub>2</sub>Si estequiométrico, com o objetivo de melhorar o efeito do envelhecimento.

Sabe-se que o excesso de Si não altera a seqüência de precipitação, a estrutura e os parâmetros de rede das diferentes fases metaestáveis, mas modifica a composição e densidade das partículas. Entretanto, o excesso de Si parece provocar a formação de fases adicionais durante os estágios mais derradeiros do envelhecimento, porém estas fases não contribuem significativamente para o endurecimento.

*Gupta et. al* [GUPTA, 2001], em seus estudos, avaliou várias ligas de Alumínio contendo Fe, Mg e Si, no intuito de calcular o excesso de Si presente em cada uma delas. As composições químicas estão na Tabela 1.

Liga	Mg(%)	Si(%)	Fe(%)	Mg <sub>2</sub> Si(%) = (Mg%/1.73) +Mg%	Excesso Si(%)
1	0,4	0,28	0,25	0,63	-
2	0,6	0,39	0,25	0,95	-0,09
3	0,8	0,47	0,25	1,26	-0,04
4	0,4	0,72	0,25	0,63	0,44
5	0,4	1,32	0,25	0,63	1,04
6	0,6	1,32	0,25	0,95	0,92
7	0,8	1,02	0,25	1,26	0,51
8	-	1,29	0,25	-	-

Tabela 1 – Composição química das ligas estudadas por Gupta e Lloyd.

Estes autores propuseram a relação abaixo, que tem a finalidade de expressar a quantidade de Mg<sub>2</sub>Si e o Excesso de Si em ligas da série 6xxx.

$$\text{Mg}_2\text{Si} = (\text{Mg}\% / 1.73) + \text{Mg}\%$$

$$\text{Excesso de Si \%} = (\% \text{Si na liga}) - [(\% \text{Mg na Liga})/1,73 + 0,25 \times (\% \text{Fe na liga})]$$

Para esses autores, a quantidade de excesso de Si em uma liga pode ser prevista através da equação acima. Subtraindo a quantidade de Si que participa da formação do Mg<sub>2</sub>Si (razão em peso 1:1.73) e a quantidade de Si que está nas partículas ricas em Fe, ou quantidade total de Si na liga, tem-se o excesso de Si na liga. As partículas ricas em Fe possuem Si na razão de 1:4, por isso o fator de 0,25 multiplicando o percentual de Fe.

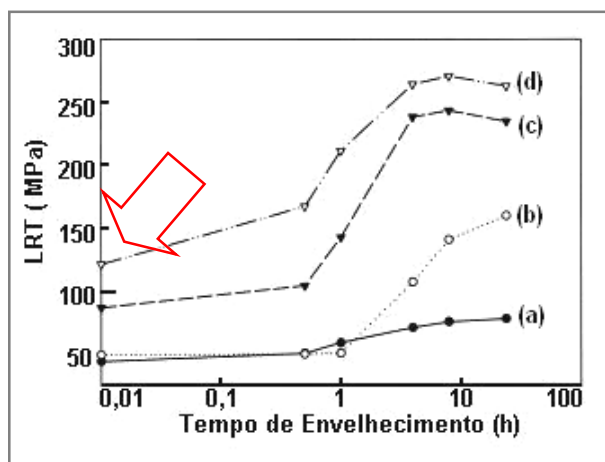


FIGURA 1 – Relação entre Resistência a Tração e Tempo de Envelhecimento: (a) Binário Al-1.32%Si; (b) sem excesso de Si, (c) 0,44% de excesso de Si, (d) 1,04% de excesso de Si, são respectivamente as ligas 1, 4 e 5 da tabela 1, [GUPTA, 2001].

Segundo Gupta ligas com excesso de Si apresentam LRT maior que ligas equilibradas, como pode ser visto na Figura 1. Porém, quando o autor analisa somente ligas com excesso de Si, o que determina as melhores respostas mecânicas é a maior quantidade de  $Mg_2Si$  o que, para as suas ligas (Tabela 1), significa menor excesso de Si, como pode ser verificado na Figura 2, logo abaixo.

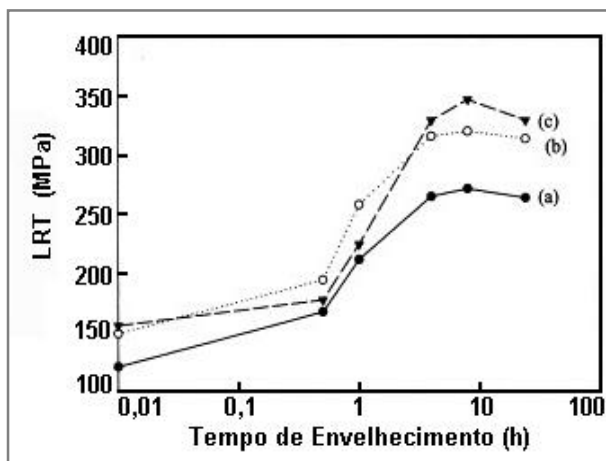


FIGURA 2 – Efeito do Mg no comportamento das ligas com excesso de Si: As ligas (a); (b); (c), são respectivamente as ligas 5, 6 e 7 da tabela 1, [GUPTA, 2001].

Como pode ser visto nas análises de Gupta [GUPTA, 1991] evidenciados na Tabela 1 e nas Figuras 1 e 2, que mostram que menores valores de excesso de Si, associados a maiores quantidades de  $Mg_2Si$ , quando submetidos a envelhecimento artificial, melhoram a resistência à tração das amostras.

Por exemplo: A adição de 0,4% de Mg aumenta o conteúdo de  $Mg_2Si$  de 0,63 para 1,26%, ocorre um ganho de 0,63%, e reduz o conteúdo de excesso de Si de 1,04 para 0,51 ocorrendo um abaixamento de 0,53%.

Não pode ser esquecido que o excesso de Si implica, **sempre**, em maiores quantidades de Si em relação às quantidades de Mg nas ligas da série 6xxx.

A leitura do trabalho destes autores nos permite entender melhor sobre a cinética de precipitação, além de mostrar a influência da composição química nos produtos de precipitação em ligas da série 6xxx. Com isso pode-se fazer testes físicos para comprovar a teoria descrita por esses autores aplicando seus conceitos,

e discutindo qual seria a melhor forma de se proceder no processo de envelhecimento artificial.

Foram feitos cálculos de excesso de Si e  $Mg_2Si$  em todas as bobinas coletadas, com o objetivo de analisar, através de tabelas e gráficos, a influência desses dados nas propriedades mecânicas do vergalhão.

## 2. OBJETIVO

Avaliar o comportamento mecânico de ligas 6101 quando submetidas a envelhecimento artificial, após terem sofrido envelhecimento natural. Analisando a influência da composição química na resposta ao envelhecimento artificial das ligas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Vários vergalhões (com diâmetro de 9,5mm) de liga 6101 obtidos através de lingotamento contínuo foram selecionados para estudo de sua composição química. A partir desse registro calculou-se o excesso de Si% para cada um pela expressão: Excesso de Si = (%Si na liga) – [(%Mg na liga)/1,73 + 0,25 x (%Fe na liga)], além da possibilidade máxima de formação de  $Mg_2Si$ . Então a cada hora de tratamento térmico as respostas mecânicas foram registradas e analisadas. As ligas estudadas têm suas composições registradas na Tabela 2.

CORRIDA	ENSAIO DE COLETA			COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
	Mpa	A%	%IACS	%Mg	%Si	%Fe	%B	%Ti	% $Mg_2Si$	%Al	%Exc. Si
202C19R1-3B	201,29	19,76	52,80	0,5920	0,5800	0,2530	0,0011	0,0071	0,9342	98,550	0,1746
103114R1-8A	190,21	16,46	51,70	0,5320	0,5470	0,2090	0,0013	0,0071	0,8395	98,680	0,1872
203114R1-5B	186,39	18,57	51,70	0,5230	0,5470	0,2190	0,0012	0,0057	0,8253	98,680	0,1899
103628R1-6B	192,47	17,56	50,80	0,5880	0,5900	0,2410	0,0010	0,0110	0,9279	98,540	0,1899
203528R1-2B	186,88	18	51,45	0,5940	0,5960	0,2280	0,0012	0,0107	0,9374	98,550	0,1956
203728R1-1A	183	17,16	51,95	0,5120	0,5400	0,2480	0,0006	0,0094	0,8080	98,6600	0,1820
203722R1-2A	180	15	53	0,4880	0,4830	0,2170	0,0008	0,0099	0,7701	98,7600	0,1467

Tabela 2 – Composições químicas das ligas estudadas sem tratamento.

A Tabela 2 e a Figura 3 mostram que o excesso de Si é o agente predominante na modificação da resistência mecânica do material, uma vez que ligas com excesso de Si decrescente apresentam maiores possibilidades de formação de  $Mg_2Si$ .

Quando comparamos os momentos iniciais da Figura 1, indicado pela seta vermelha, com a Figura 3, percebemos que há semelhança entre elas, uma vez que o LRT cresce com o excesso de Si. Na Figura 3 podemos também verificar que a trabalhabilidade é beneficiada com o aumento do excesso de Si, já que o alongamento cresce com o aumento do excesso de Si.

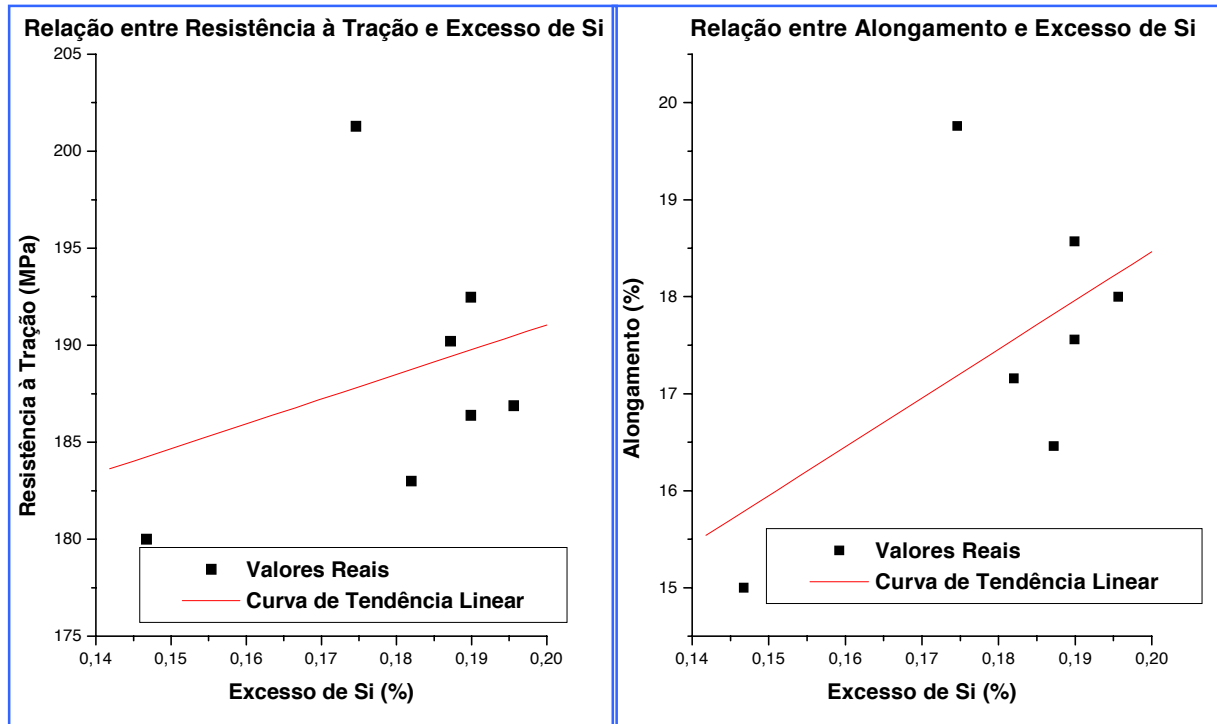


Figura 3 – Variação da Resistência a Tração e Alongamento em relação ao Excesso de Si, em amostras sem tratamento térmico.

Gupta[1] faz também uma avaliação da quantidade de  $Mg_2Si$  em ligas com excesso de Si, fazendo a avaliação do LRT da amostra em relação a essa variável.

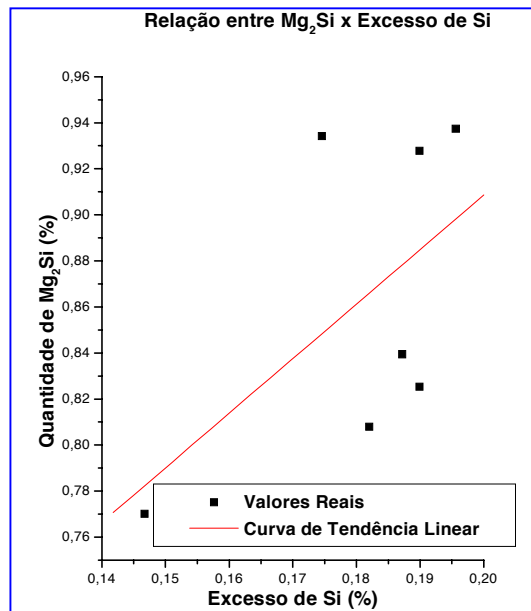


FIGURA 4 – de  $Mg_2Si$  x Excesso de Si.

Relação de Quantidade

Aplicando o mesmo conceito da quantidade de  $Mg_2Si$  proposto por Gupta no material estudado temos:

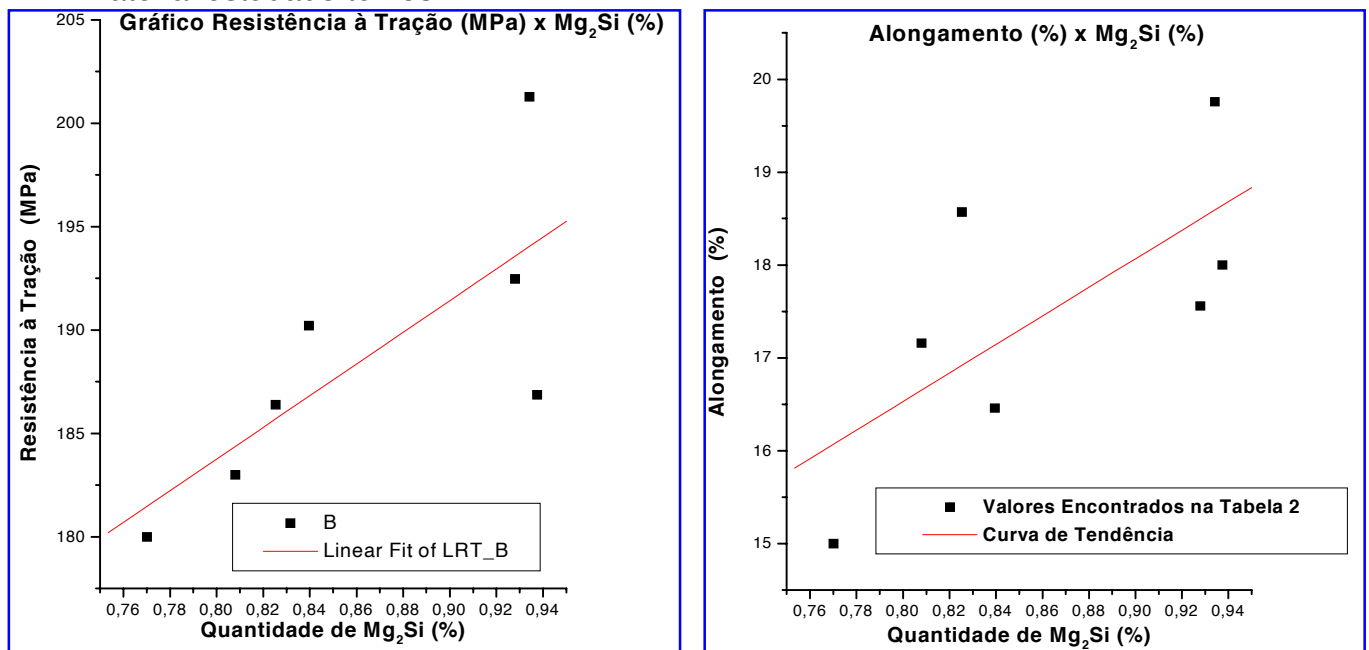


FIGURA 5 – Resultados obtidos a partir de amostras sem tratamento térmico percebemos um comportamento crescente da Resistência Mecânica com o aumento da quantidade de  $Mg_2Si$ , o que está de acordo com os resultados de GUPTA, evidenciados na figura 2.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir de uma amostragem de 7 bobinas, foram feitas uma triagem e escolhidas três bobinas em função dos diferentes teores de excesso de Si e quantidades de  $Mg_2Si$ . Suas respostas foram avaliadas através do tempo de envelhecimento artificial, da hora 0 (zero) até 4 (quatro) h. As Figuras 6(a) e 6(b), mostram o comportamento mecânico do material estudado, poderão ser avaliados que o vergalhão de liga 6101 se comporta como a maioria dos materiais envelhecíveis por precipitação, já que as respostas aos ensaios segue o padrão encontrado na literatura, ou seja, com o passar do tempo de envelhecimento a tendência é de aumento da Resistência à Tração e diminuição do Alongamento, logo um aumento de dureza e diminuição de ductilidade. Partindo do princípio que esse material passará por processos de conformação plástica, tais como trefilação e encordoamento, não é interessante o tratamento térmico do material na forma de vergalhão, porém, quando feito com um controle esse envelhecimento pode ser importante para obtenção de algumas características em processos posteriores.

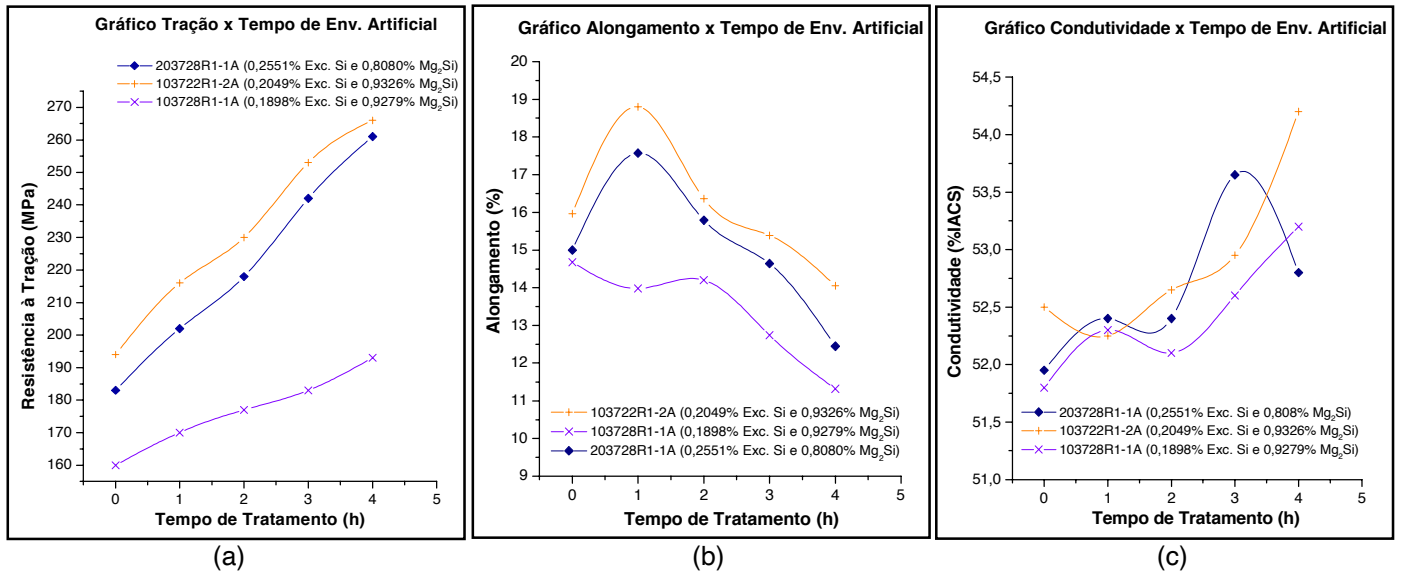


Figura 6 – (a) Comportamento da Resistência à Tração com o passar do tempo de envelhecimento; (b) Característica da ductilidade em relação ao tempo de envelhecimento; (c) Comportamento da Condutividade Elétrica em relação ao tempo de Envelhecimento Artificial.

A Figura 6(a) mostra um comportamento interessante, pois indica que há uma uniformidade de comportamento entre os vergalhões, apesar de existir uma corrida que fuja a esse padrão. A corrida 103728R1-1A, que foge ao conjunto, apresenta uma associação entre o excesso de Si e a quantidade de Mg<sub>2</sub>Si aparentemente desejada, excesso de Si (%) = 0,1898 (baixo) e a %Mg<sub>2</sub>Si = 0,9276 (elevado). Apesar dessa corrida apresentar uma desejada relação entre o excesso de Si (%) e Mg<sub>2</sub>Si apresenta a pior resposta ao ensaio de tração, quando comparada com as corridas analisadas na Figura 6(a). A Figura 6(b) mostra a tendência geral de diminuição de alongamento com o passar do tempo de envelhecimento, comportamento que se espera em vergalhões. A corrida 103722R1-2A apresentou comportamento, quanto a ductilidade, superior às outras duas curvas analisadas na Figura 6(b). Tratam-se de ligas com teores de Mg(0,591%) e Si (0,603%) muito próximos. É provável que este fato comprometa o comportamento. Entretanto, pode-se observar que o material possivelmente responderia melhor ao processo produtivo se fossem observadas faixas de composições químicas mais estreitas para os elementos de liga. Nos valores plotados na Figura 6(c) é muito presente a tendência de crescimento dos valores da Condutividade Elétrica em função do tempo de tratamento. Esta tendência fica mais evidente quando se observamos valores com as seguintes associações: Exc. Si de 0,2551% para 0,808% Mg<sub>2</sub>Si; Exc. Si de 0,2049% para 0,9326% Mg<sub>2</sub>Si; e Exc. Si 0,1898% para 0,9279% Mg<sub>2</sub>Si, tendem a obedecer a regra de Gupta. Entretanto são possibilidades.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios de tração trazem uma idéia que a quantidade de Mg<sub>2</sub>Si crescente pode ser o elemento endurecedor desse tipo de liga, mas é importante observar que o excesso de Si também indica alguma influência na liga,

visto que amostras com praticamente mesmo valor de  $Mg_2Si$  o de menor excesso de Si teve o pior desempenho ao tratamento térmico. Com relação à ductilidade o comportamento foi semelhante para todas as amostras, indicando apenas que uma maior formação de  $Mg_2Si$  pode indicar menor capacidade de deformação. Observando a condutividade elétrica podemos indicar uma tendência de crescimento tímido dessa propriedade, logo não será indicado qualquer tratamento térmico para melhorar essa característica do material, e nem o excesso de Si nem a formação de  $Mg_2Si$  parecem influenciar a condutividade elétrica do material.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- K. Gupta, D. J. Lloyd and S. A. Court – Precipitation Hardening in Al-Si-Mg Alloys with and without Excess Si, *Materials Science and Engineering A* 316 (2001) 11–17;
- G. A. Edwards, K. Stiller, G. L. Dunlop and M. J. Couper – The Precipitation Sequence in Al-Mg-Si Alloy, *Acta mater.* 46 (1998);
- MURAYAMA, M. AND HONO, K.; Pre-Precipitate Clusters and Precipitation Processes in Al-Mg-Si Alloys. *Acta Materialia*; vol 47; N° 5; pp. 1537 – 1548; (1999).
- ASM HANDBOOK, *Metallography and Microstructures*; Vol. 9; 1999.
- 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.



# INFLUENCE OF EXCESS OF Si% IN THE PRECIPITATION HARDENING OF 6101 ALUMINIUM ALLOY ARTIFICIALLY AGED<sup>(1)</sup>

Mauro Sérgio Vieira Matos<sup>(2)</sup>  
André Oliveira Kishi<sup>(3)</sup>  
Emerson David Cavalcante Santos<sup>(4)</sup>  
Sandro Pereira Corrêa<sup>(5)</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>(6)</sup>

This paper try analyze the mechanical behavior of rods of aluminium alloy 6101, through tensile strenght and electric conductivity tests, manufactured for continuos casting of ingots, as casting and artificially aged for until four hours.

Some rods ( $\phi = 9.50\text{mm}$ ) of 6101 aluminium alloy had examined their chemical composition. After recorded the excess of Si for each sample, for the relation proposed by Gupta:  $\text{Exc. Si \%} = (\text{Si}\%) - [(\text{Mg}\%)/1.73 + 0.25 \times (\text{Fe}\%)]$ . So, in samples as casting and after the artificially aged, to 150°C for until 4h, tests to a room temperature were doing, and graphics and lists aded the mechanical behavior.

Answers obtened don't show a large influence of the excess of Si how an hardening element of the alloy. Howhever, the mechanical behavior were good, because the tensile strength increase significantilly.

**Keywords:** 6101 aluminium alloy, excess of Si, heat treatment.

---

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

<sup>(1)</sup> – Article to be presented in the V Casting Seminar 2004.

<sup>(2)</sup> to <sup>(5)</sup> – Mechanical Engineering Undergraduates, Universidade Federal do Pará;

<sup>(6)</sup> – Prof. Dr., DEM – CT – Universidade Federal do Pará.