

# AVALIAÇÃO DA RESPOSTA AO TRATAMENTO TÉRMICO DE VERGALHÕES DE LIGA Al-Mg-Si OBTIDOS ATRAVÉS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO <sup>(1)</sup>

André Oliveira Kishi <sup>(2)</sup>  
Emerson David Cavalcante Santos <sup>(3)</sup>  
Fernando Antônio de Sá <sup>(4)</sup>  
Mauro Sérgio Vieira Matos <sup>(5)</sup>  
José Maria do Vale Quaresma <sup>(6)</sup>

Este trabalho tem como objetivos avaliar o comportamento de vergalhões ( $\phi = 9,5\text{mm}$ ) da liga 6101 quanto ao envelhecimento artificial, a  $150^{\circ}\text{C}$  por 5 horas, tendo como referência o LRT e o  $\delta\%$  e avaliar a microestrutura da fratura e sua composição química ao longo do envelhecimento artificial com auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Coletou-se amostras em forma de vergalhões de duas corridas diferentes: 01 e 02, registrando-se a composição química das mesmas, que foram preparadas para ensaios de tração, e em seguida submetidas a tratamento térmico por 5h à  $150^{\circ}\text{C}$ . A cada hora foi retirado um lote de amostras a fim de se obter resposta ao tratamento térmico sofrido pelo material. Após os ensaios de tração foi possível analisar o comportamento mecânico de vergalhões, ao longo do processo de tratamento térmico.

A análise dos resultados dos gráficos indica comportamento natural do elemento estudado: cresce o LRT diminui a deformação para as duas corridas estudadas. Entretanto, há indicação de uma pequena recuperação na ductilidade para o tempo entre 3 e 4 hora para a corrida 01 e entre 4 e 5 horas para a corrida 02, sem contudo, afetar o crescimento do LRT.

Palavras-chave: Tratamento térmico, Liga 6101, Limite de Resistência à Tração.

---

XXXV Seminário de Fusão e refino 2004, 17 a 19 de maio, Salvador-BA.

<sup>(1)</sup> – Trabalho a ser apresentado no XXXV Seminário de Fusão e Refino e Solidificação dos metais 2004.

<sup>(2)</sup> – Graduado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

<sup>(3)</sup> – Graduado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

<sup>(4)</sup> – Prof. MSc. DEM – CT – Universidade Federal do Pará;

<sup>(5)</sup> – Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

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

## 1. INTRODUÇÃO

Advindo da necessidade de verticalizar a produção de alumínio, surge como uma das alternativas a Tecnologia do Lingotamento Contínuo, que através de processos que envolvem a tecnologia térmica, leva à obtenção de um produto com valor agregado e amplas aplicações industriais.

Nas ligas Al-Si, cogita-se que os átomos de Si acompanham as lacunas que são condensadas, durante e imediatamente após a têmpera. Semelhante processo também ocorreria no sistema Al-Mg-Si, o que seria mais tarde confirmado por Gupta e Lloyd (1992), quando anunciaram que os picos exotérmicos observados nas curvas de análise térmica durante a precipitação de uma fase, poderiam de fato, consistir em dois picos justapostos, indicando a presença de uma segunda reação de precipitação.

A partir das observações de Dutta e Allen, Gupta e Lloyd, diversos passos foram dados no estudo da seqüência de precipitação das ligas Al-Mg-Si, até que em 1998, G.L Dunlop compondo um grupo de pesquisadores, publicou um artigo [G.A. EDWARDS; K. STILLER; G.L. DUNLOP; M.J. COUPER, 1998] contendo estudos bem mais detalhados sobre o assunto, utilizando observações através de equipamentos tais como: Scanner calorimétrico diferencial (DSC), Microscópio de investigação atômica de campo iônico (APFIM) e um Microscópio de transmissão eletrônica (TEM). Com isso surge uma nova proposta de seqüência de precipitados, envolvendo, principalmente o processo de agrupamento inicial e a estrutura das zonas GP-I e GP-II ( $\beta''$ ), assim como a composição de todos os precipitados intermediários, que é a seguinte:

1. Solução Sólida Supersaturada;
2. Agrupamentos de átomos de Si e agrupamentos de átomos de Mg;
3. Dissolução dos agrupamentos de átomos de Mg;
4. Formação de agrupamentos de átomos com Mg e Si;
5. Pequenos precipitados de estrutura desconhecida;
6. Precipitados  $\beta''$ ;
7. Precipitados  $\beta''$  e precipitados  $\beta'$ ;
8. Precipitados  $Mg_2Si$  ( $\beta$ ).

Há uma grande necessidade da sistematização da pesquisa neste seguimento do conhecimento. Desenvolveu-se então, um procedimento de coleta de amostras para o estudo da precipitação de fases, ao longo do processo de fabricação de cabos condutores de energia elétrica fabricados pelo Grupo Alubar, empresa da região nordeste do Estado do Pará.

## 2. OBJETIVOS

Avaliar o comportamento de vergalhões ( $\phi = 9,5\text{mm}$ ) da liga 6101 quanto ao envelhecimento artificial, a  $150^\circ\text{C}$  por 5 horas, temperatura máxima em que o forno para tratamento térmico da empresa Alubar alcança, tendo como referência o LRT e o  $\delta\%$  e avaliar a microestrutura da fratura e sua composição química ao longo do envelhecimento artificial com auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Coletou-se amostras em forma de vergalhões de duas corridas diferentes: 01 e 02, registrando-se a composição química das mesmas, que foram preparadas para

ensaios de tração, e em seguida submetidas a tratamento térmico por 5h à 150°C. A cada hora foi retirado um lote de amostras a fim de se obter resposta ao tratamento térmico sofrido pelo material. A análise química da liga coletada na calha de vazamento do metal líquido foi feita através de um Espectrômetro de Massa.

As amostras coletadas de cinco bobinas de vergalhões resultantes da fabricação utilizando a liga Al-Mg-Si (6101) foram avaliadas fisicamente através de ensaios de tração, LRT ( $\sigma$ ) e alongamento percentual ( $\delta\%$ ) realizados em uma máquina modelo Kratos-MD2000.

Com a necessidade de se analisar melhor o material coletado, as fraturas de vergalhões foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura.

Abaixo temos a tabela de composição nominal da liga 6101.

Si	Fe	Mg	B	Ti	V	Al
0,59	0,241	0,588	0,001	0,0110	0,0064	98,54

Tabela 1 – Composição química da liga estudada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – Avaliação do comportamento mecânico de vergalhão

Com os vergalhões todos cortados de acordo com a norma ABNT – NBR – 6810 para ensaio de tração, submeteram-se os mesmos a tratamento térmico a 150° C em uma estufa, sendo que, a cada uma hora de tratamento era retirado um lote de amostras para ensaios de tração. A quantidade de amostras para cada bobina era em número de três, garantindo a repetibilidade dos ensaios.

Na Figura 1, pode-se observar o gráfico com as curvas de resistência à tração para cada bobina tratada termicamente de acordo com o tempo de envelhecimento artificial.

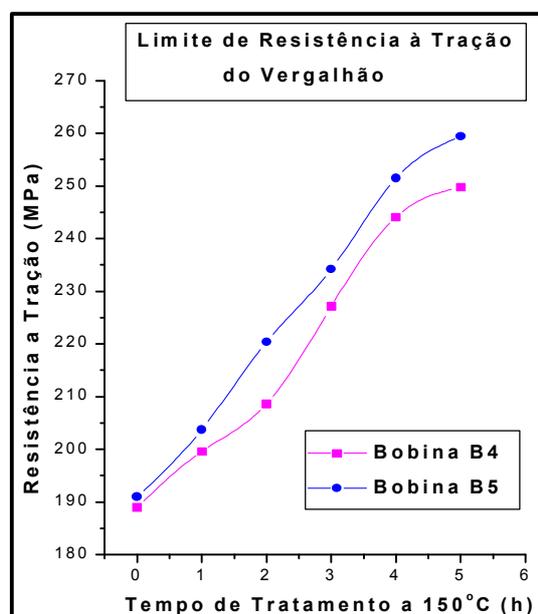


Figura 1 – Relação entre a resistência à tração do vergalhão e o tempo de envelhecimento artificial à 150°C (testes em triplicata).

Os corpos de prova foram armazenados já no tamanho padrão para ensaio de tração na máquina Kratos, de acordo com a norma para ensaio de tração ABNT – NBR – 6810.

A análise dos resultados dos gráficos das Figuras 1 e 2 indica comportamento natural do elemento estudado: cresce o LRT e diminui a deformação.

Nota-se que as duas bobinas, B4 e B5, comportam-se de forma semelhante na resposta ao envelhecimento natural, assegurando que esse processo tende a aumentar a resistência à tração do vergalhão.

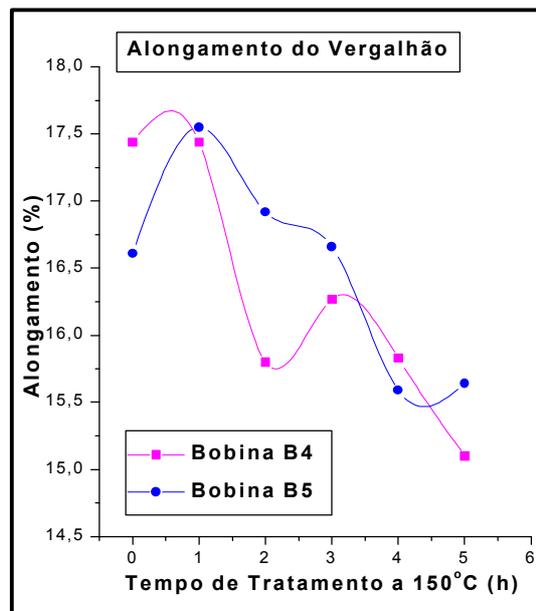


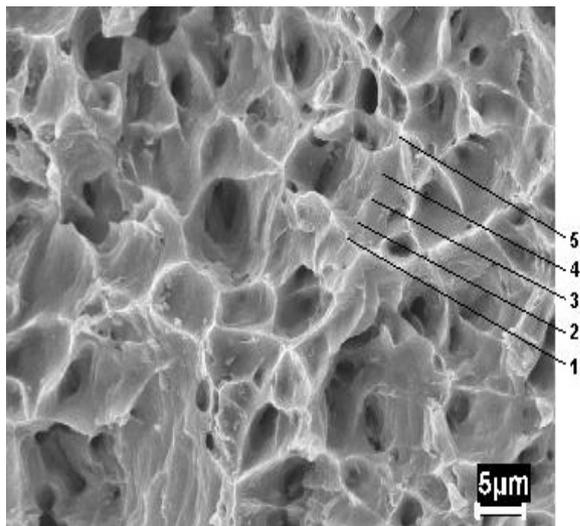
Figura 2 – Relação entre o alongamento do vergalhão e o tempo de envelhecimento artificial à 150°C (testes e, triplicata).

Entretanto, há uma indicação de uma pequena recuperação na ductilidade para o tempo entre 3 e 4 horas para a bobina B4 sem, contudo, afetar o crescimento do LRT.

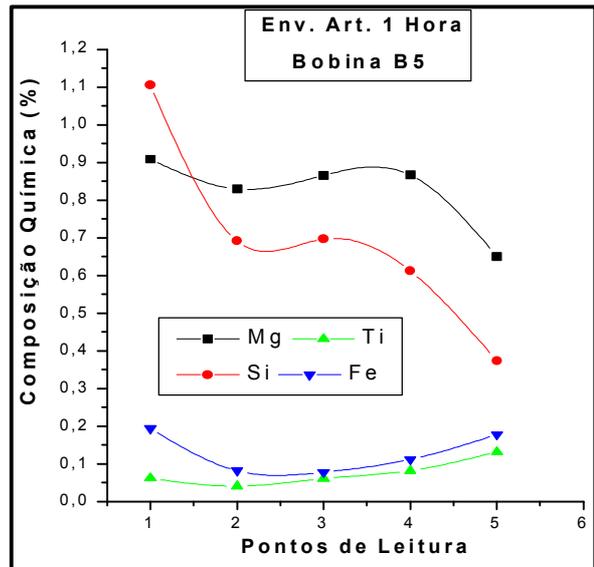
#### 4.2 – Análise metalográfica do vergalhão

Foram feitas imagens das fraturas dos vergalhões, envelhecidos artificialmente. As seqüências de fotomicrográficas a seguir foram obtidas via microscopia eletrônica de varredura e estão associadas aos pontos dos gráficos de resistência a tração e alongamento de vergalhões anteriormente.

Para o envelhecimento artificial, também foi selecionada uma das bobinas para se fazer a fractografia dos corpos de prova ensaiados ao longo do tempo de tratamento térmico a temperatura de 150°C, neste caso a bobina selecionada foi a B5.



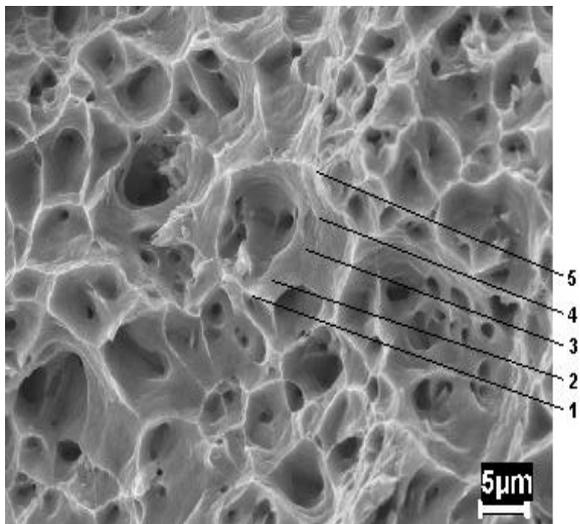
(a)



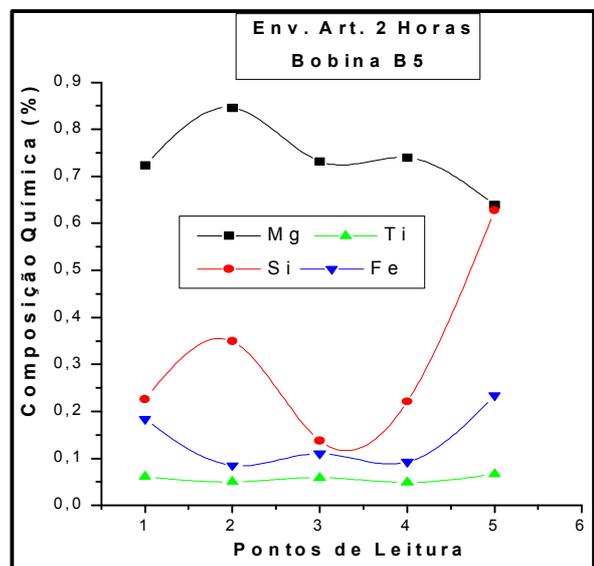
(b)

Figura 3 – Em (a), microestrutura da fratura de um vergalhão ensaiado com 1 hora de envelhecimento artificial ampliada 2000x. Em (b), a distribuição dos teores de Si, Mg, Ti e Fe nos pontos analisados.

Pode-se observar no gráfico da Figura 3 que em alguns pontos o silício está superior ao magnésio e em outros ele tende a formar a relação 2:1 ( $Mg_2Si$ ). Os outros elementos se comportam de forma estável e com baixo teor.



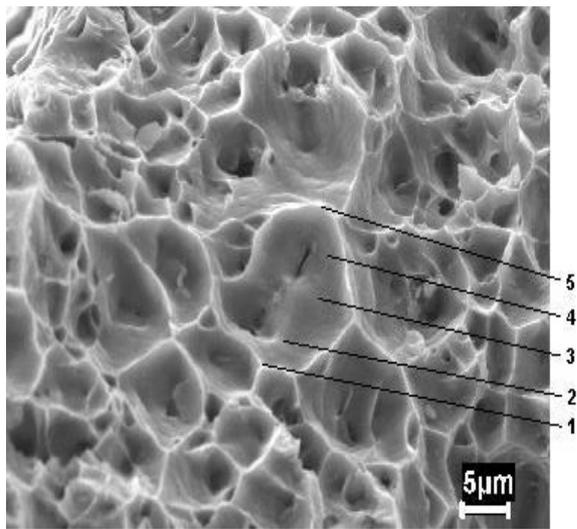
(a)



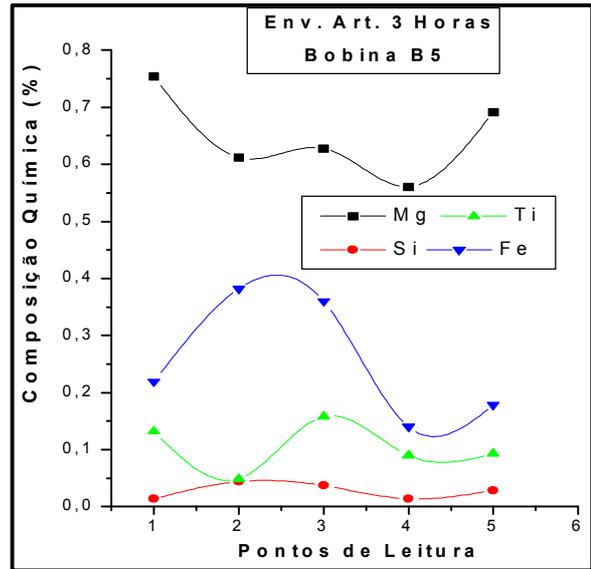
(b)

Figura 4 – Em (a), microestrutura da fratura de um vergalhão ensaiado com 2 horas de envelhecimento artificial ampliada 2000x. Em (b), a distribuição dos teores de Si, Mg, Ti e Fe nos pontos analisados.

Nas primeiras duas horas de envelhecimento artificial à 150° C os elementos se comportam de forma semelhante na liga estudada, como se pode observar comparando os gráficos das Figuras 3 e 4. Ambos mostram uma tendência da formação do  $Mg_2Si$ .

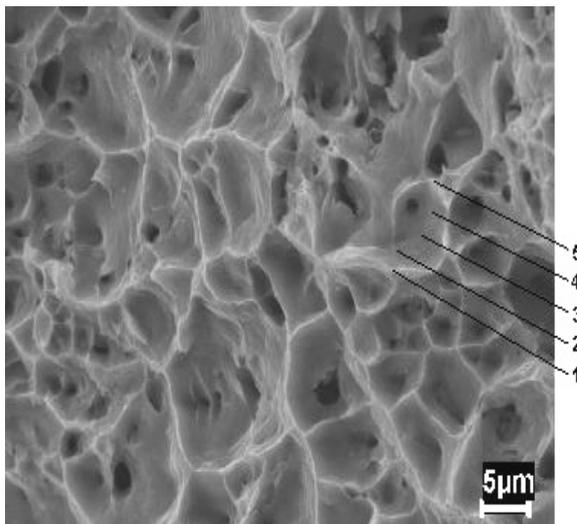


(a)

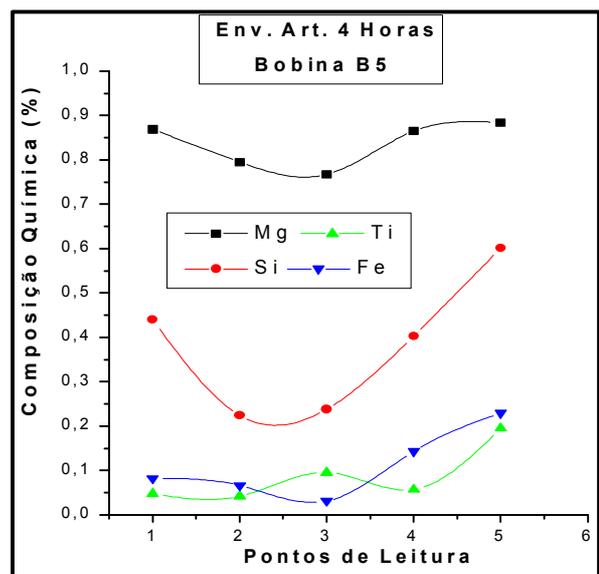


(b)

Figura 5 – Em (a), microestrutura da fratura de um vergalhão ensaiado com 3 horas de envelhecimento artificial ampliada 2000x. Em (b), a distribuição dos teores de Si, Mg, Ti e Fe nos pontos analisados.



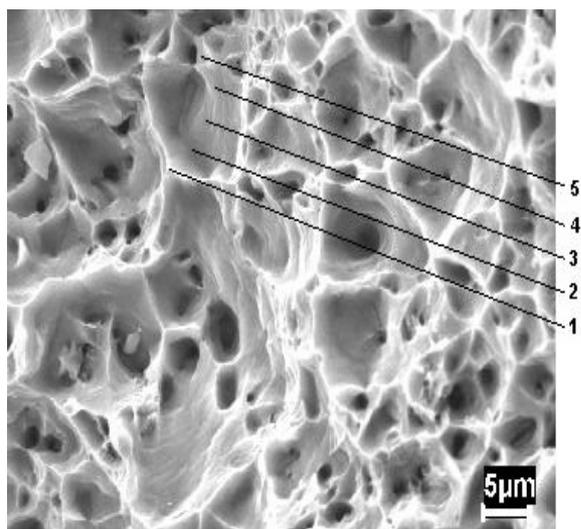
(a)



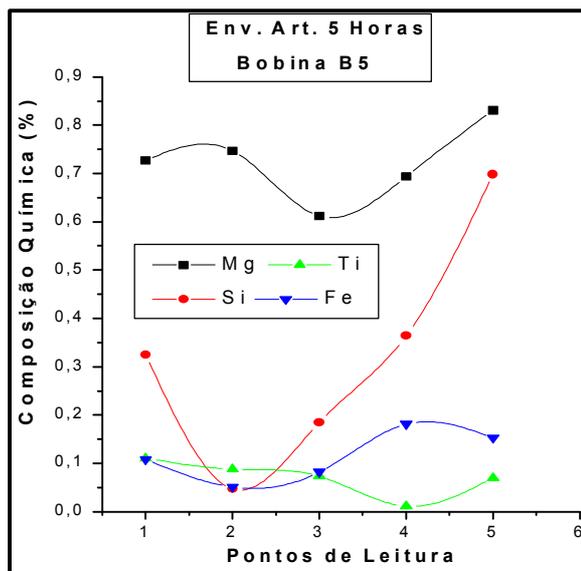
(b)

Figura 6 – Em (a), microestrutura da fratura de um vergalhão ensaiado com 4 horas de envelhecimento artificial ampliada 2000x. Em (b), a distribuição dos teores de Si, Mg, Ti e Fe nos pontos analisados.

No gráfico da Figura 6, o ferro se comporta de forma diferente, apresentando uma grande mobilidade na liga.



(a)



(b)

Figura 7 – Em (a), microestrutura da fratura de um vergalhão ensaiado com 5 horas de envelhecimento artificial ampliada 2000x. Em (b), a distribuição dos teores de Si, Mg, Ti e Fe nos pontos analisados.

Na quarta e quinta hora de envelhecimento artificial o magnésio e o silício voltam a se comportar como nas primeiras horas de envelhecimento, com tendência de formação de  $Mg_2Si$ . O ferro volta a se estabilizar e o titânio se comporta estável durante todo o processo de tratamento térmico.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados e dos resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- Os vergalhões apresentaram uma tendência crescente de fragilização, aumentando o limite de resistência à tração e diminuindo a ductilidade com o tempo de envelhecimento, isto pode estar relacionado ao fato do magnésio ter uma grande afinidade com o alumínio, limite de solubilidade de 14,9% de Mg, pois o mesmo se comportou de forma estável em todas as amostras analisadas, formando com o alumínio um binário estável que está sendo modificado pelo silício que tem uma dificuldade maior de se homogeneizar no alumínio, tendendo a formar *clusters* de precipitados que irão associar-se para formar o  $Mg_2Si$  posteriormente.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EDWARDS, G. A.; STILLER, K.; DUNLOP, G. L. and COUPER, M. J.; The Precipitation Sequence in Al-Mg-Si Alloys. Acta Mater; Vol. 46; n 11; p. 3893 – 3904; 1998.
- GUPTA, A. K. AND LLOYD, D. J.; in Aluminium Alloys: “Their Physical and Mechanical Properties”, Vol. 2, ed. L. Arnberg et al.; Norwegian Institute of Technology and SINTEF Metallurgy, Trondheim; p. 21; 1992.
- DUTTA AND ALLEN, S. M.; J. Mater. Sci. Lett. Vol. 10, p. 323; 1991.
- ASM HANDBOOK. Metallography and Microstructures, Vol. 9, 1999.

# RODS BEHAVIOR ON HEAT TREATMENT OF Al-Mg-Si (6101) MANUFACTURED BY CONTINUOUS CASTING INGOT<sup>(1)</sup>

André Oliveira Kishi <sup>(2)</sup>  
Emerson David Cavalcante Santos <sup>(3)</sup>  
Fernando Antônio de Sá <sup>(4)</sup>  
Mauro Sérgio Vieira Matos <sup>(5)</sup>  
José Maria do Vale Quaresma <sup>(6)</sup>

This work has as objectives to evaluate the rods behavior ( $\phi = 9,5\text{mm}$ ) of the 6101 alloy as for the artificial aging, to 150°C for 5 hours, tends as reference UTS and elongation, and to evaluate the fractograph and chemical composition along the artificial aging with aid of Scanning Electron Microscope (SEM).

It was collected rods of two different coils: 01 and 02, recording the chemical composition of them, and they were prepared for traction tests, and soon afterwards submitted to thermal treatment by 5h at 150°C. Every hour a lot of samples was removed in order to obtain the heat treatment behavior for the material. After the traction tests it was possible to analyze the mechanical behavior of rods, along the process of heat treatment.

The analysis of the results of the graphs indicates natural behavior of the studied element: increases UTS and reduces the deformation for the two studied races. However, there is indication of a small recovery in the ductility for the time between 3 and 4 hour for the race 01 and among 4 and 5 hours for the race 02, without however, to affect the growth of UTS.

Keywords: Heat treatment, 6101 alloy, Tensile strength.

---

XXXV Steelmaking Seminar, May 17-21 2004, Salvador – Bahia.

<sup>(1)</sup> – Article to be presented in the Steelmaking seminar 2004.

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

<sup>(3)</sup> – Prof. Master, Universidade Federal do Pará;

<sup>(4)</sup> – Mechanical Engineering Undergraduate, Universidade Federal do Pará;

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

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