



A INFLUÊNCIA DO TEMPO NA SOLUBILIZAÇÃO E NO ENVELHECIMENTO NATURAL DA LIGA Al-0,6%Mg-0,5%Si (6101)

Hélio Cleidson de Oliveira Sena, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 helido@ufpa.br

Johnyson Pereira Feitosa, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 jfeitosa@ufpa.br

Jamílson Araújo Petronílio, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 jamilson@ufpa.br

José Maria do Vale Quaresma, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, DEM. Rua Augusto Corrêa, 1, Guamá, Belém – Pará, CEP.: 66075-900 jmdovale@ufpa.br

Resumo

As ligas de Al-Mg-Si formam um importante grupo de ligas largamente utilizadas industrialmente na fabricação de fios e cabos para o transporte de energia elétrica. Na condição de ligas endurecíveis por precipitação no envelhecimento natural e artificial, estas, são geralmente tratadas termicamente, para adquirirem determinadas propriedades mecânicas (resistência e alongamento). Deste ponto de vista, a liga (Al-Mg-Si) utilizada para construção de fios condutores e siderúrgicos em uma empresa da região (Alubar Metais/Barcarena/Pará/Brasil), surgiu o interesse de se estudar a mesma quanto à aplicação de ensaios de tração e caracterização metalográfica frente ao processo de envelhecimento sofrido depois de passar por alguns estágios experimentais. As amostras como produzidas foram solubilizadas a 540°C em tempos de 2,4 e 6 horas, e em seguida tratadas termicamente (resfriadas em água) até a temperatura ambiente. No entanto, esta proposta analisou a eficiência de reagentes químicos encontrados na literatura, utilizados para a caracterização metalográfica deste não-ferroso. Enquanto, que na segunda etapa, o ensaio de tração realizado nos vergalhões da liga (6101), mostraram através dos diagramas tensão x deformação, as alterações que ocorreram nos valores das propriedades ali avaliadas. A correlação destes resultados tornou-se um fator importante para a obtenção das propriedades resultantes da liga em estudo.

Palavras-Chave: liga Al-Mg-Si; solubilização; tratamento térmico.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de Al-Mg-Si são endurecíveis por precipitação e podem ser tratadas termicamente na condição de “T6” (tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera e envelhecimento artificial) e na condição de “T4” (tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera e envelhecimento natural) para adquirirem uma adequada resistência mecânica. Sendo muito significativa a resposta do endurecimento por precipitação nestas ligas, o tratamento térmico e o envelhecimento, tornando-se estes fatores importantes para que sejam alcançadas as propriedades de resistência e alongamento desejadas. Particularmente durante o processo de fabricação de fios e cabos condutores de energia elétrica, a liga Al-Mg-Si (6101), em seu processo produtivo, é

processada na solidificação e no processo de lingotamento contínuo rotativo (LCR) e depois num processo de laminação à quente até atingir a temperatura de têmpera de 75°C, Fig. (1). A partir de então, o metal é resfriado à temperatura ambiente, tendo-se dessa forma uma solução sólida sobressaturada, com elevado grau de deformação.

Edwards et. al. (1998), em seus estudos, preocupou-se com o controle da precipitação durante o tratamento térmico por entender ser um fator crítico para atingir um ótimo desempenho da liga, e desta forma apresentou toda a seqüência de precipitados resultantes no processo de envelhecimento da liga 6061 (bastante próxima em termos de composição com a liga em estudo “6101”), como descrito a seguir.

✓ Al SSS; agrupamentos de Si/agrupamentos de Mg; dissolução de agrupamentos de Mg; co-agrupamentos de Mg/Si; estrutura não definida de pequenos precipitados; precipitados β” (GPII); precipitados β’ e β” e precipitados β ou Mg₂Si.

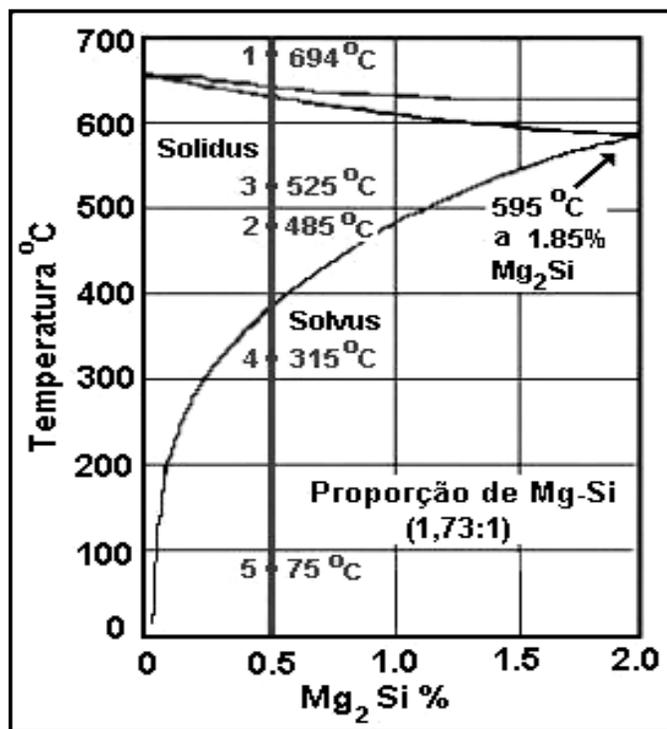


Figura 1. Etapas do processo produtivo da liga 6101 (Al-Mg-Si) até atingir a temperatura de têmpera de 75°C.

Edwards ainda em seus estudos avaliou os trabalhos de Dutta e Allen (1991), que propuseram ser estes efeitos o resultado de agrupamentos de átomos de Si. Contudo, há uma certa discordância para as ligas de Al-Si, observada nas análises térmicas e de resistividade. Sendo mais aceitável que os átomos de Mg movam agrupamentos de átomos de Si que são formados depois da têmpera, produzindo observações térmicas e de resistência. Nas ligas de Al-Si os átomos de Si acompanham lacunas que são condensados durante e depois da têmpera, sendo que este processo só ocorre em ligas de Al-Mg-Si.

Gupta e Lloyd (1992), informaram que a discrepância observada nas análises térmica e de resistividade podia consistir de dois picos, superpondo-se, indicando a possível presença de uma segunda reação de precipitação.

Já (Smith, 1973; Cordier e Gruhl, 1965), estes informaram que o precipitado tinha forma esférica.

Finalmente, a fase de equilíbrio Mg_2Si tem pequena contribuição na resistência das ligas de Al-Mg-Si.

Geralmente nas ligas de alumínio, os precipitados são tipicamente o produto final de uma seqüência de precipitação e que envolve a formação de outros precipitados metaestáveis. O processo principal do envelhecimento natural de ligas de alumínio é a decomposição da solução sólida sobressaturada obtida após têmpera sem transformação de fases, ocasionando nas propriedades mecânicas, variações no limite de resistência à tração, limite de escoamento e na dureza da liga, etc.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

- Liga usada: Al-Mg-Si (6101)
- Composição: 0,35 a 0,80% Mg; 0,30 a 0,70% Si; 0,10% Cu; 0,50% Fe; 0,03% Mn.
- Foram utilizados 3 lotes de vergalhões (300 x 10) mm de 15 unidades cada.
- Elevou-se a temperatura do forno até a região monofásica de 540 °C dos vergalhões em intervalos de tempo de 2, 4 e 6 horas, para que então fosse realizada a têmpera (resfriadas em água) e sobressaturação da solução sólida. E desde já sofrendo um processo de envelhecimento da liga Al-Mg-Si.
- As amostras foram usinadas longitudinalmente. Estas foram lixadas e polidas em uma politriz rotativa “rpm”, e depois atacadas em solução ácida (reagentes), em semanas alternadas até atingir as 9 (nove) semanas, para a macrografia das amostras da liga 6101 de 2, 4 e 6 horas.
- Os reagentes para a macro mais adequados foram os seguintes: o reagente Tucker (45ml HCl+15ml HNO₃+15ml HF+25mlH₂O) e o reagente Cáustico (10g NaOH+90ml H₂O). Handbook, ASM (1999).
- Os ensaios de tração foram realizados numa máquina modelo Kratos (MD2000). Utilizou-se um microscópio óptico com máquina fotográfica para a examinação das fotos macrográficas.

2.1. Um Breve Comentário sobre a Precipitação de Fases com o Envelhecimento

A precipitação de fases durante o envelhecimento, em particular nas ligas de alumínio, é o principal mecanismo do tratamento conhecido como “Endurecimento por Precipitação”. Muito embora alguns processos industriais não tenham como objetivo principal o endurecimento por precipitação, este processo de endurecimento sempre acontece. Dessa forma, analisar mais detalhadamente as etapas do processo produtivo passa a ser imprescindível para o entendimento das transformações que ocorrem com o metal e as variações de propriedades mecânicas, ajudando na definição de variáveis que necessitem de um maior grau de controle.

Basicamente, a elevação das propriedades de resistência mecânica através da precipitação de fases no estado sólido, se dá no cumprimento de três etapas principais:

(A) deve-se ter a formação de uma estrutura uniforme e monofásica da solução sólida, isto pode ser obtido através do aquecimento e permanência a temperaturas compreendidas entre as temperaturas solidus e solvus da liga, a esta etapa, dá-se o nome de Solubilização.

(B) a liga deve ser rapidamente resfriada para que se obtenha então, uma solução sólida supersaturada de elementos de liga (S.S.S.), a essa etapa, dá-se o nome de Têmpera.

(C) ocorrerá a decomposição da Solução Sólida Sobressaturada, constituindo a etapa de envelhecimento. As etapas acima descritas, Fig. (2), estão ilustradas abaixo.

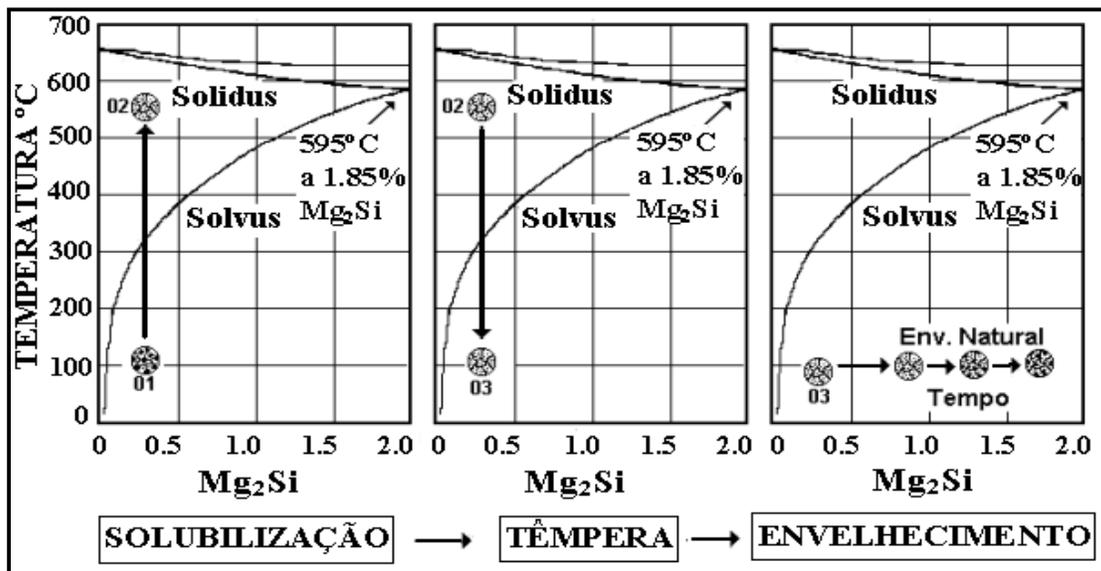


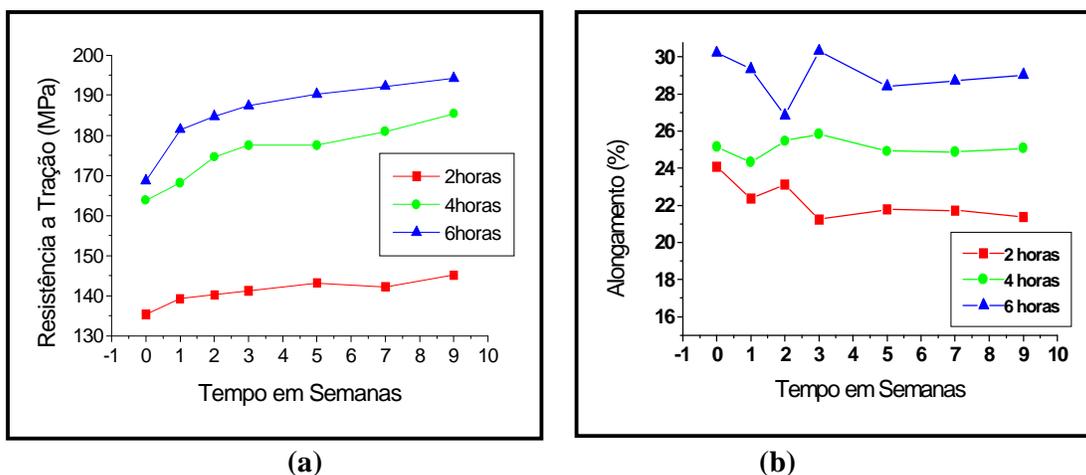
Figura 2. (01) Ilustração do processo de solubilização das amostras desde a temperatura ambiente a 540°C, (02), e em seguida submetidas ao processo de tratamento térmico (03), resfriadas em água. Do ponto (03) inicia-se o processo de envelhecimento natural da liga 6101.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os equipamentos e acessórios utilizados no desenvolvimento experimental do ensaio tração e da caracterização metalográfica foram bastante úteis e importantes para a obtenção dos resultados obtidos das propriedades de resistência mecânica, alongamento e de estruturas macrográficas durante todo o período de envelhecimento sofrido pela liga em estudo, onde esta ficou vulnerável a crescentes modificações estruturais. As amostras foram selecionadas em semanas alternadas e estão indicadas abaixo.

3.1. Resultados de Propriedades no Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração (tensão x deformação) das amostras da liga 6101, identificou-se as mudanças em suas propriedades de resistência e alongamento. Estes resultados podem ser observados, como segue nas Fig. abaixo.



Figuras 3. (a) curvas de resistência a tração (MPa) e (b) curvas de alongamento (%) variando de acordo com as semanas de estudo da liga e ambos para os tempos de solubilização de 2, 4 e 6 horas.

Como se pode observar, o comportamento do envelhecimento foi influenciado pela temperatura de solubilização de 540°C nas amostras de 2,4 e 6 horas e se percebeu nitidamente as suas variações acima, tanto para a resistência quanto para o alongamento. Primeiro, no gráfico para a resistência (MPa), Fig. (3a), distinguiu-se que para o maior tempo de solubilização (6 horas) a liga 6101, adquiriu no momento inicial maiores valores de resistência (semana zero) e esses valores foram aumentando até atingir as nove semanas. E sendo assim, o mesmo processo é observado para os tempos de solubilização de 2 e 4 horas, mas que adquiriram valores menores de resistência, onde a tendência foi de a liga obter, ao fim de algum tempo, uma maior resistência com o tempo.

Já para o segundo gráfico, Fig. (3b), correspondendo às curvas de alongamento, observou-se de início que tanto para os três tempos de solubilização o comportamento foi bastante similar, e que na 1 semana houve um decréscimo de valores para as amostras de 2 e 4 horas e enquanto para a amostra de 6 horas, este decréscimo brusco se deu na 2 semana (atingindo picos decrescentes) e que depois foi normalizado chegando a uma estabilidade até o complemento das 9 semanas.

3.2. Macroestruturas de Amostras Longitudinais da Liga 6101 Solubilizadas à 540°C nos Tempos de 2, 4 e 6 horas

3.2.1. Para a Macrografia (Para o Reagente de Macro Tucker)

3.2.1.1. Tempo de Solubilização à 540°C: 2h

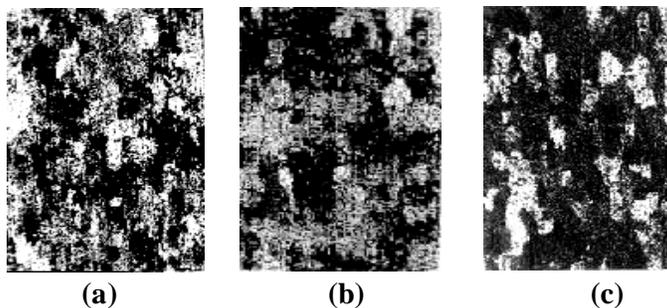


Figura 4. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente Tucker (50 s – 100x).

3.2.1.2. Tempo de Solubilização à 540°C: 4h

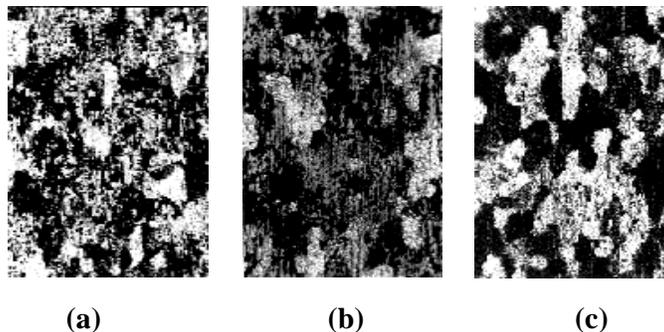


Figura 5. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente Tucker (50 s – 100x).

3.2.1.3. Tempo de Solubilização à 540°C: 6h

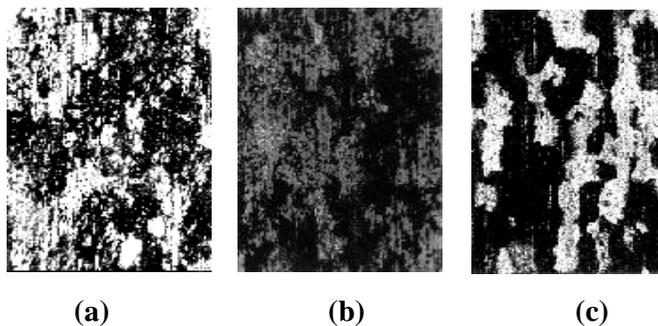


Figura 6. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente Tucker (50 s – 100x).

3.2.2. Para a Macrografia (Para o Reagente de Macro Cáustico “NaOH”)

3.2.2.1. Tempo de Solubilização à 540°C: 2h

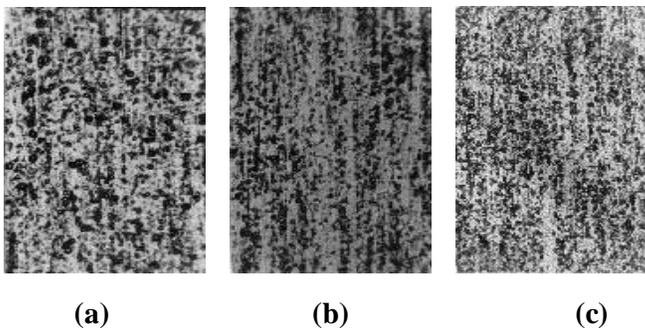


Figura 7. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente NaOH (15min. – 100x).

3.2.2.2. Tempo de Solubilização à 540°C: 4h

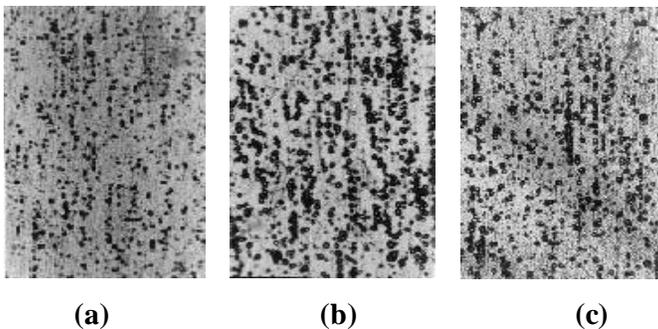


Figura 8. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente NaOH (15min. – 100x).

3.2.2.3. Tempo de Solubilização à 540°C: 6h

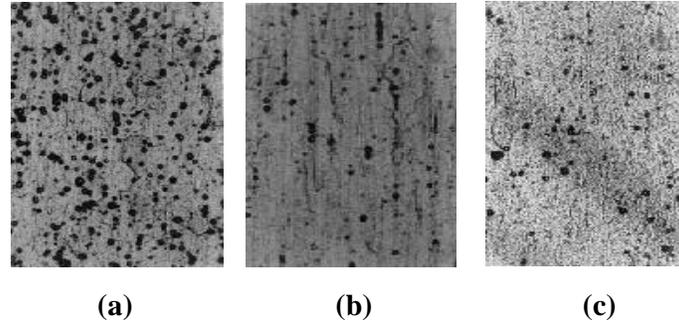


Figura 9. Conjunto de macrografias evidenciando a evolução do envelhecimento sobre: (a) 03 semana, (b) 05 semana e (c) 09 semana, respectivamente. Reagente NaOH (15min. – 100x).

3.3. Resultados Comparativos entre o Ensaio de Tração e as Amostras da Caracterização Metalográfica

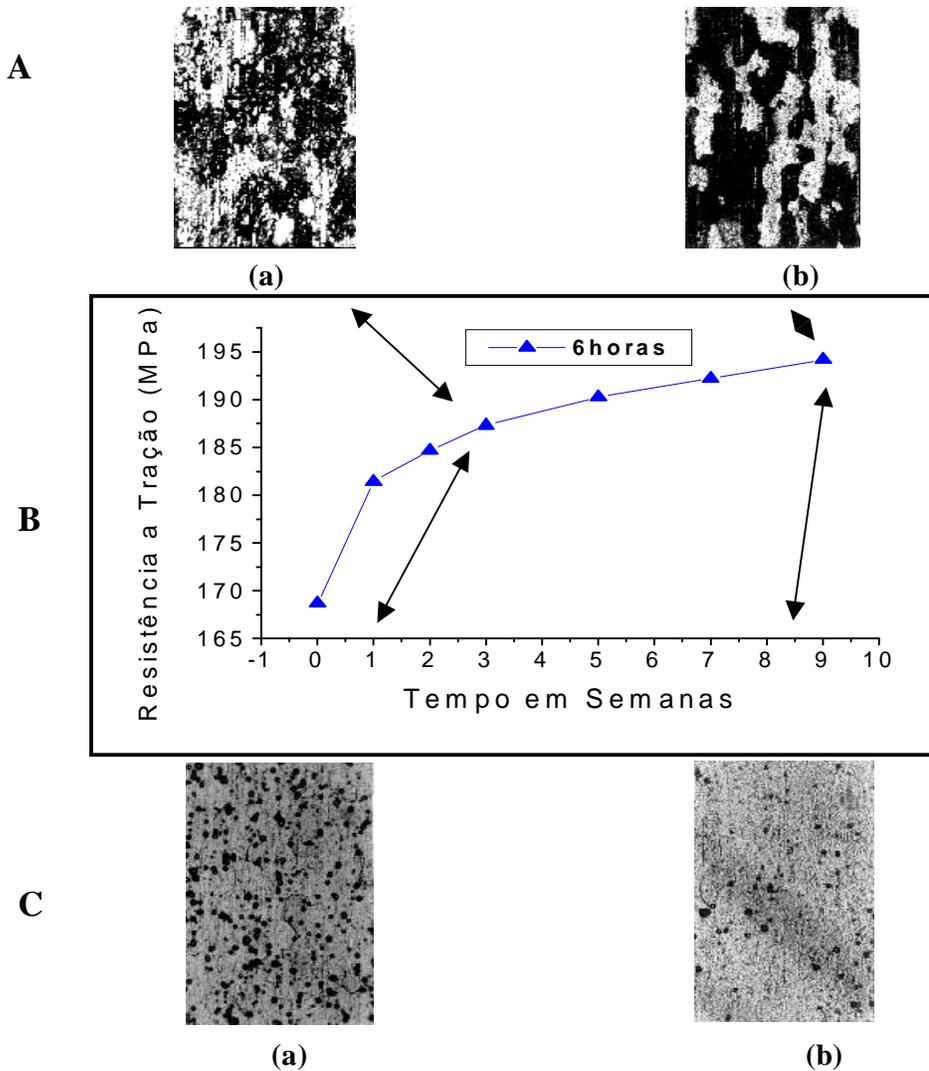


Figura 10. (A) Conjunto de fotos macrográficas (Reagente Tucker – 50s / 100x), (a) 03 e (b) 09 semana, respectivamente. (B) gráfico referente à resistência a tração (MPa) com o decorrer do tempo (semanas). (C) Conjunto de fotos macrográficas (Reagente Cáustico – 15 min/100x), (a) 03 e (b) 09 semana, respectivamente.

Nas Figuras (10A), (10B) e (10C), mostra-se a evolução das propriedades e das estruturas especificamente para a amostra solubilizada por 6 horas. O que se pretendeu mostrar foi a evolução ou mutação de estruturas provocadas pelo endurecimento pôr precipitação devido ao envelhecimento natural. Observou-se nitidamente que os reagentes revelaram estruturas bastante diferentes ao longo das semanas em estudo da liga Al-Mg-Si (6101).

4. CONCLUSÕES

No processo de solubilização das amostras a 540°C, a liga em estudo (6101) forma uma única região de microestrutura monofásica para depois de feito o tratamento térmico (resfriada em água) até a temperatura ambiente, ocorra sobressaturação da solução sólida sem transformação de fases, ocasionando ganho em suas propriedades mecânicas, e como consequência melhorando as condições de endurecimento por precipitação.

Os resultados para a análise metalográfica e o ensaio de tração das amostras da liga 6101, tiveram como grande finalidade a avaliação das mudanças e variações em suas propriedades de resistência e alongamento devido ao endurecimento por precipitação, provocado pelo envelhecimento natural; e tendo como referência a comparação macrográfica das mutações que evoluíram com o envelhecimento natural até o término das 9 (nove) semanas.

Na caracterização macrográfica, tanto para o reagente Tucker e como para o reagente Cáustico “NaOH” observou-se estruturas ou fases de precipitados bastante diferentes. Os três tempos de solubilização de 2, 4 e 6 horas foram determinantes neste estudo. Para o maior tempo (6 horas) a 540°C, observou-se que a solubilização ocorreu melhor e mais adequada durante todo o processo, ou seja, saturou com mais intensidade internamente os grãos e com isto retardou o surgimento de precipitados, neste caso e a nosso juízo, o aumento da resistência à tração deu-se devido ao choque térmico da têmpera.

5. AGRADECIMENTOS

Em especial ao querido Orientador Prof. Dr. José Maria do V. Quaresma e ao grupo GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais-DEM/UFPA).

Propesp e ao PIBIC/CNPq.

Alubar Metais/Barcarena/Pará/Brasil.

6. REFERÊNCIAS

ASM Handbook, Metallography and Microstructures; Vol. 9; 1999.

Cordier, H. and Gruhl, W.; Z. Metall. Vol. 56 (1965), p. 669.

Dutta and Allen, S. M.; J. Mater. Sci. Lett. Vol. 10 (1991), p. 323.

Edwards, G. A.; Stiller, K.; Dunlop, G. L.; and Couper, M. J.; “The Precipitation Sequence in Al-Mg-Si Alloys”. Acta Mater, Vol. 46, Nº 11, pp. 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, 1992, p. 21.

Smith, W. F.; Metall. Trans. Vol. 4 (1973), p. 2435.

7. DIREITOS AUTORAIS

Grupo GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais-DEM/UFPA)

THE INFLUENCE OF THE TIME IN THE SOLUBILIZATION AND IN THE NATURAL AGEING OF ALLOY Al-0,6%Mg-0,5%Si (6101)

Hélio Cleidson de Oliveira Sena, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 helido@ufpa.br

Johnyson Pereira Feitosa, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 jfeitosa@ufpa.br

Jamílson Araújo Petronílio, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 jamilson@ufpa.br

José Maria do Vale Quaresma, Federal University of Pará, Technological Center, DEM. Augusto Corrêa Street, 1, Guamá, Belém/Pará, ZIP: 66075-900 jmdovale@ufpa.br

***Abstract.** Al-Mg-Si alloys are an important group of alloys that are widely used industrially in wire and cables production to the electric power transport. In the condition of alloys hardened by precipitation in the natural and artificial aging, these are usually treated thermally to acquire certain mechanical properties (resistance and prolongation). Although, the Al-Mg-Si alloy used for construction of conductive and metallurgical wire in a company of this area (Alubar Metais/Barcarena/Pará/Brazil), it appeared the interest of studying the same as for the application of traction test and characterization metallographic front to the process of suffered aging after passing by some experimental stages. The samples as produced were solubilized at 540°C in times of 2, 4 and 6 hours, and in followed was treated thermally (cold in water) at room temperature. However, this proposal analyzed the efficiency of chemical reagents found in the literature, used for the characterization metallographic of this no-ferrous. While, that in the second stage, the traction test accomplished in the cables of (6101) alloy, it showed through the diagrams deformation x tension, the alterations that happened in the values of the properties there appraised. The correlation of these results becomes an important factor for the obtaining of the resulting properties of alloy in study.*

Keywords: Al-Mg-Si alloy; solubilization; thermal treatment.