

EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO A356¹

Guilherme O. Verran²

Tatiane Haskel³

César Edil da Costa⁴

Resumo

Este trabalho tem por objetivo verificar o efeito do tempo de solubilização sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga de alumínio A356. Foram fundidos corpos de prova para ensaios de tração e realizados tratamentos térmicos de solubilização utilizando tempos de 2, 6 e 10h na temperatura de 540°C. Para avaliação dos resultados foram realizados ensaios de resistência à tração, análises metalográficas e fractografias usando MEV. Os resultados indicaram aumentos no limite máximo de resistência e no alongamento e reduções no limite de escoamento com o aumento no tempo de solubilização. Para menores tempos de solubilização observou-se crescimento das dendritas de alumínio α e alterações graduais na morfologia do Si eutético. As melhores propriedades foram obtidas com 10 hs de solubilização a 540°C como resultado de uma melhor distribuição e um maior coalescimento das partículas de Si, gerando uma microestrutura mais homogênea. As fractografias mostraram alterações no modo de fratura em função do incremento no tempo de solubilização evidenciando o aumento de ductilidade observado através dos ensaios mecânicos.

Palavras-chave: Tratamentos térmicos; Ligas de alumínio; Solubilização; Microestruturas; Propriedades mecânicas.

EFFECTS OF SOLUTION HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF A356 ALUMINUM ALLOY

Abstract

This work has the objective to investigate the effect of solution heat treatment time on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy. The tensile bars were molten to tensile tests and solution heat treatments at 540°C for 2, 6 and 10 hours were done. To evaluate the results tensile test, metallographic analysis and fractographs using Scanning Electron Microscope (SEM) were performed. The results indicated increase in ultimate tensile strength and elongation and, reduction in yield strength with increase of the solution time. For the lower solution times it was observed α -aluminum dendrites growing and graduate changes in the morphology of eutectic Si. The best properties were obtained with 10 hours of the solution treatment in 540°C, as a result of a better distribution and a bigger coalescence of the Si particles, producing a more homogeneous microstructure. The fractographs showed changes on the fracture mode in function of increase in the solution time, evidencing the increase of the ductility observed through mechanical tests.

Key words: Heat treatments; Aluminum alloys; Solution; Microstructures; Mechanical properties.

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

² *Dr. Eng. Met. – Prof. do DEM-PGCEM/UFES*

³ *Eng. Mec. – Mestranda do PGCEM/UFES*

⁴ *Dr. Eng. Mat. - Prof. do DEM-PGCEM/UFES*

1 INTRODUÇÃO

A liga de alumínio A 356 é usada extensivamente em componentes de manufatura para indústria automotiva e aeroespacial devido a suas propriedades físicas e mecânicas.⁽¹⁾ Ligas Al-Si com adições de Cu e/ou Mg são materiais com grande potencial para a fabricação de componentes estruturais nestes segmentos em função do baixo peso e da razoável usinabilidade,^(2,3) no entanto a obtenção de melhores propriedades mecânicas está condicionada à realização de tratamentos térmicos.

O tratamento térmico típico dessas ligas envolve solubilização, tempera e envelhecimento artificial. De acordo com procedimentos padrões definidos pela ASTM, os fundidos devem ser tratados termicamente por solubilização entre 4 horas a 12 horas a $540^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, temperados, envelhecidos naturalmente por 8 horas e então envelhecidos artificialmente a $155^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.⁽¹⁾ Os aumentos no limite de resistência e no limite de escoamento ocorrem através do endurecimento por solução sólida e o aumento na ductilidade através da esferoidização do Si eutético.⁽²⁾ Tratamento térmico de solubilização de ligas de alumínio fundidas resulta em: 1) dissolução dos elementos de liga Si e Mg na matriz de alumínio, 2) separação da estrutura do silício e esferoidização das partículas resultantes e, 3) uma homogeneização geral da microestrutura.⁽²⁾ A cinética de dissolução de intermetálicos durante o tratamento depende de dois fatores: da difusividade do soluto na matriz e da mobilidade da interface matriz-soluto .

O tempo de solubilização interfere na cinética de modificação da morfologia das partículas de silício fazendo com que ocorram alterações nas propriedades mecânicas das ligas AlSi, alguns autores^(4,5) determinaram experimentalmente que curtos tempos de solubilização já propiciam alterações microestruturais significativas na liga A356, levando a incrementos consideráveis nas propriedades mecânicas. Outros pesquisadores⁽³⁾ se preocuparam em investigar a influência da temperatura de solubilização, os resultados desta pesquisa mostraram que o incremento na temperatura de solubilização de 540°C para 560°C ocasionou maior coalescimento das partículas de Si, no entanto ocorreu queda nas propriedades mecânicas em função da ocorrência de excessivo crescimento das dendritas de alumínio α .

Tiryakioglu e Shuey⁽⁶⁾ investigaram o efeito da temperatura do meio resfriante (água) sobre as propriedades mecânicas da liga A356, os resultados obtidos sugerem que variações na temperatura da água entre 15°C e 90°C não ocasionaram alterações significativas nas propriedades mecânicas.

Outro possível fator de influência sobre as prováveis alterações nas propriedades mecânicas é a variação na composição química da liga, alguns estudos^(3,7) mostraram que a modificação com Sr pode afetar a morfologia das partículas de Si e reagir com o Mg presente na liga A356 interferindo na microestrutura e na resistência final da liga. Outros trabalhos^(8,9) mostraram que o aumento na concentração de Mg induz um aumento de resistência acompanhado pela queda na ductilidade, enquanto que o aumento na concentração de Si tende a reduzir a ductilidade.

Os principais objetivos dessa pesquisa são estudar o efeito do tempo de solubilização na microestrutura da liga A356, quais os mecanismos determinantes destas alterações microestruturais e quais as conseqüências sobre as propriedades mecânicas da liga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova para ensaio de tração, utilizados nesse estudo, foram obtidos pela fundição da liga A356 na temperatura de 730°C, usando um forno a indução. O metal fundido foi vazado a 710°C em uma coquilha de aço 1045 pré-aquecida a 400°C. A composição química da liga utilizada está representada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química da liga A356 utilizada

| Si | Mg | Fe | Cu | Mn | Ni | Zn | Ti | Pb | Sn | Cr | Al |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 6,919 | 0,145 | 0,146 | 0,014 | 0,054 | 0,020 | 0,026 | 0,139 | 0,007 | 0,003 | 0,003 | Balanço |

As amostras foram solubilizadas em um forno tipo mufla com aquecimento por resistência a diferentes tempos, seguida de têmpera em água a temperatura ambiente de 24°C ± 2°C. Subsequente ao tratamento térmico de solubilização as amostras foram submetidas ao ensaio de tração após 20hs de envelhecimento natural à temperatura ambiente (~25°C). Os parâmetros de tratamento térmico para tempera T4 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Detalhamento dos tratamentos de solubilização realizados

| Ciclo | Tratamento de Solubilização | | Temperatura de Têmpera (°C) | Envelhecimento Natural (h) |
|-------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|
| | Temperatura (°C) | Tempo (h) | | |
| A | 540 | 2 | 24 ± 2 | 20 ± 2 |
| B | 540 | 6 | 24 ± 2 | 20 ± 2 |
| C | 540 | 10 | 24 ± 2 | 20 ± 2 |

A caracterização microestrutural das ligas bruta de fundição e tratada térmicamente foi realizada utilizando microscópio óptico. Técnicas padronizadas de metalografia foram adotadas para preparação das amostras. As amostras foram lixadas utilizando lixas de SiC com diferentes tamanhos de grãos, seguido de polimento com alumina (1 µm) em suspensão em água.

As propriedades de tração: limite máximo de resistência, limite de escoamento e alongamento foram medidas utilizando uma máquina Universal de Ensaio Mecânicos na taxa de extensão de 5 mm/minuto. Onze ensaios foram conduzidos para cada condição de tratamento térmico e bruto de fundição. Dos onze o menor valor não foi levado em consideração para o cálculo da média. Os resultados destes ensaios serão apresentados na forma de valores médios para cada condição experimental com os seus respectivos desvios padrão. Adicionalmente foram realizadas análises fractográficas em algumas amostras rompidas selecionadas para cada condição, utilizando Microscópio Eletrônico de varredura para verificação da variação no comportamento de fratura (frágil-dúctil) em função das variações nas condições experimentais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta uma seqüência de micrografias mostrando as alterações microestruturais decorrentes das variações no tempo de solubilização.

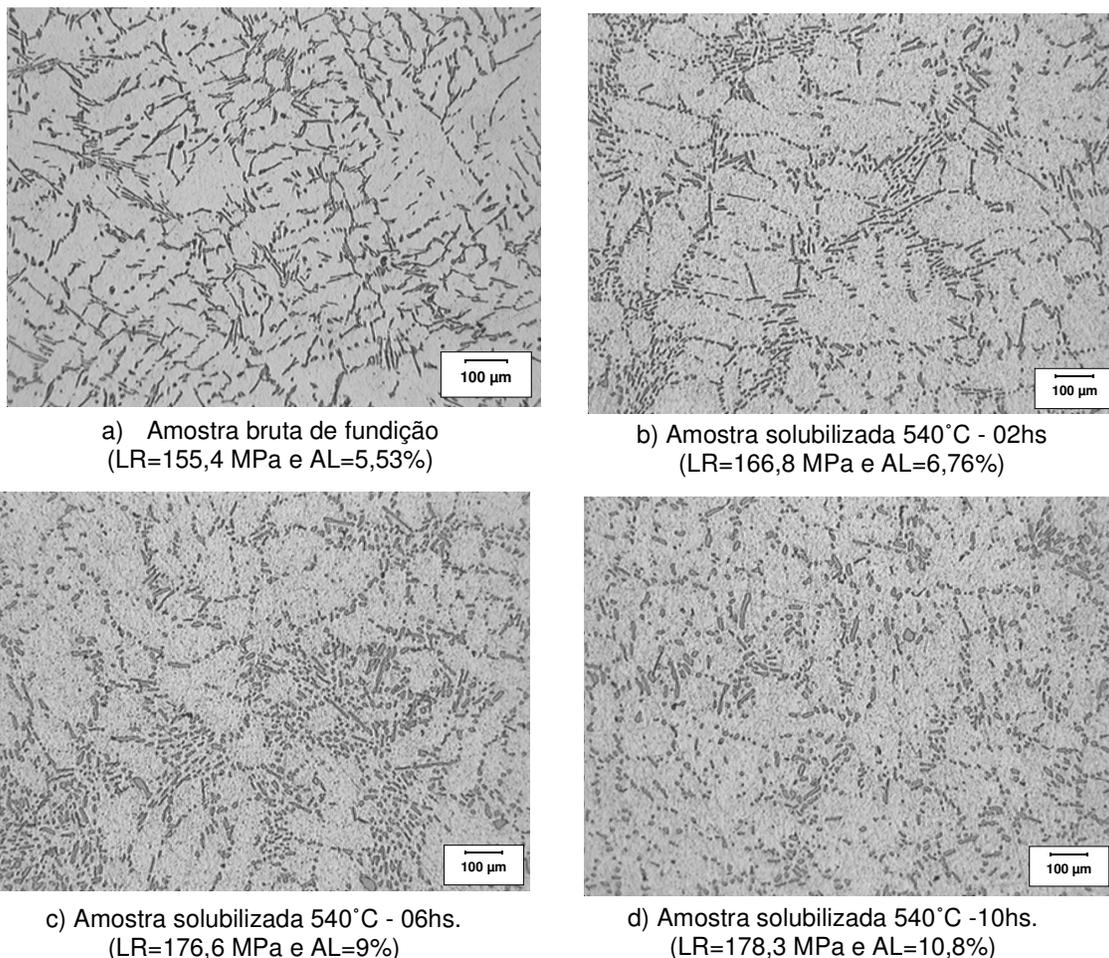


Figura 1. Efeito do tempo de tratamento térmico de solubilização na microestrutura da liga A356.

A estrutura bruta de fundição da liga A356 é apresentada na Figura 1(a), onde se pode observar a existência de dendritas de alumínio α e de Si eutético irregularmente distribuído nas regiões interdendríticas, o que representa uma microestrutura típica desta liga na condição bruta de fusão

Os efeitos do tratamento térmico de solubilização da liga A356 na microestrutura estão mostrados nas Figuras 1b-d. Percebe-se que houve uma evolução na morfologia do Si. As partículas do eutético do Si ficaram mais distribuídas e mais coalescidas com o aumento do tempo de tratamento de solubilização, como resultado de mecanismos de fragmentação e coalescimento das partículas de Si durante o tempo de permanência no forno. Observou-se, também, uma clara ocorrência de crescimento das dendritas de alumínio α , em especial para os tempos de 2 h e 6 h de solubilização.

Uma mudança significativa na microestrutura ocorreu para 10hs de solubilização a 540°C (Figura 1d), as partículas de Si apresentaram-se em menor tamanho e mais distribuídas na matriz obtendo-se dessa forma uma microestrutura mais refinada e homogênea, conforme pode ser visto na figura 2.

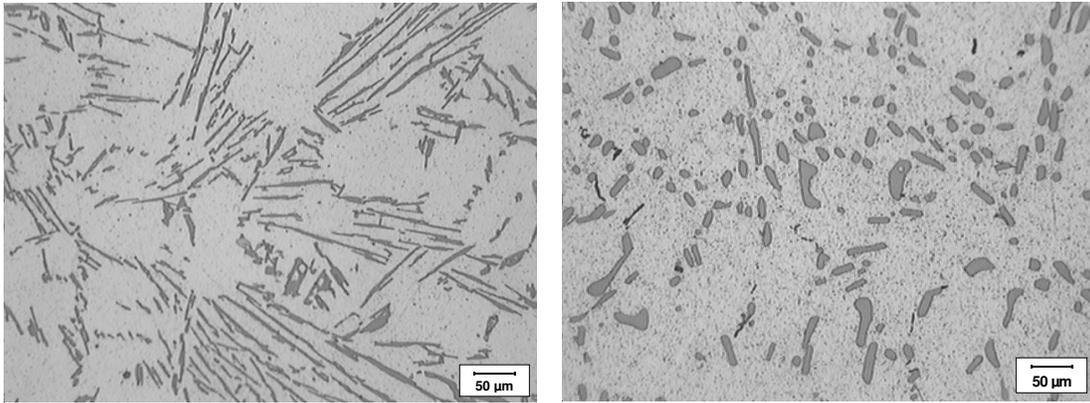
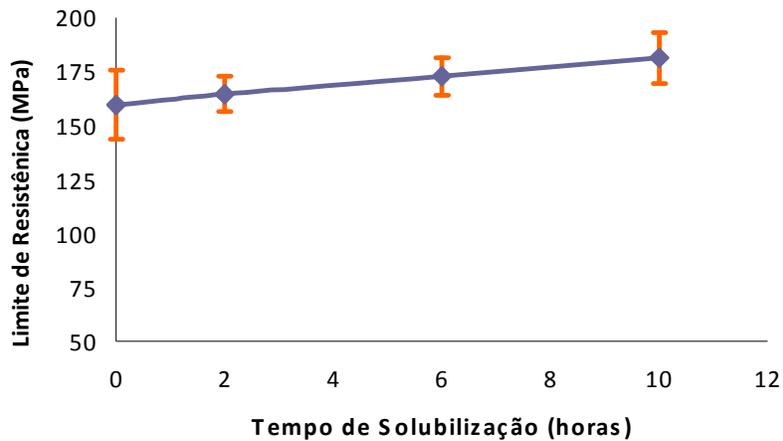


Figura 2. Microestruturas da liga bruta de fusão (a) e na condição solubilizada por 10h (b).

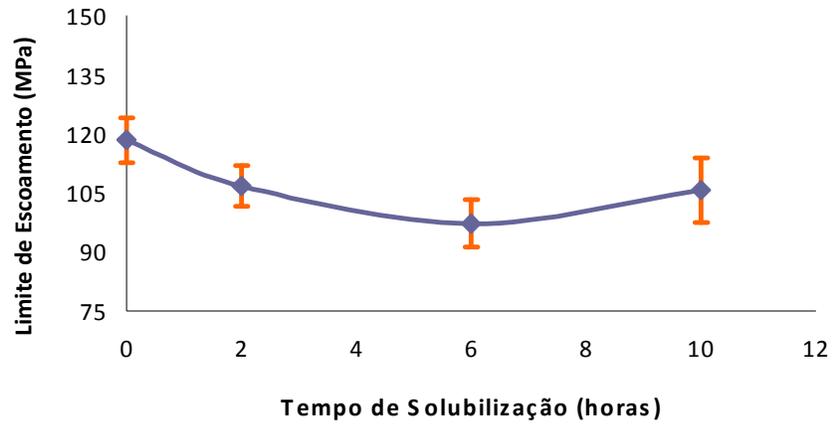
Os efeitos do tratamento térmico de solubilização sobre as propriedades de tração da liga A 356 são mostrada na Figura 3.

Como mostra a Figura 3.a o limite de resistência aumenta com o aumento do tempo de solubilização e chega a um valor máximo para 10hs de tratamento, fenômeno que aparentemente está relacionado com a ocorrência de solubilização progressiva do precipitado de Mg_2Si a medida que o tempo de solubilização foi incrementado.

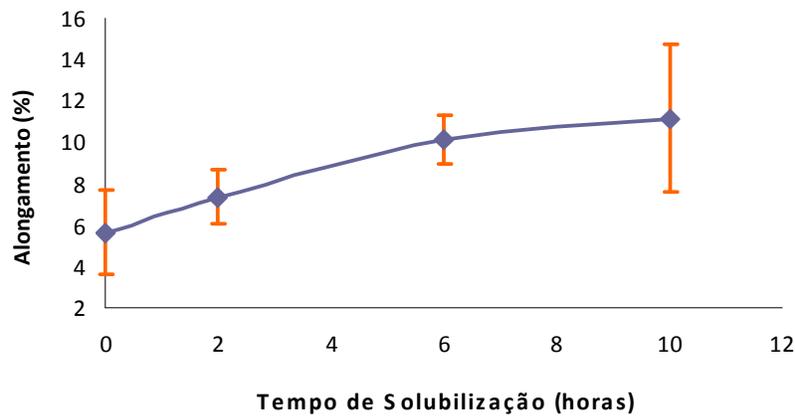
O alongamento aumentou de 5,6% da condição bruta de fundição para 11,2% depois de 10 hs de solubilização a $540^{\circ}C$ (Figura 3b), enquanto que o limite de escoamento inicialmente diminuiu com o tratamento de solubilização para os tempos de 2h e 6h e posteriormente aumentou para 10 h de tratamento (Figura 3.c), resultados que podem estar relacionados com o excessivo crescimento das dendritas da fase alumínio α observado na análise da microestruturas. Isto sugere uma predominância dos mecanismos de crescimentos de grãos e de coalescimento das partículas de silício sobre o efeito de endurecimento devido a solubilização do Mg para menores tempos de solubilização e uma inversão neste comportamento quanto o tempo de solubilização foi incrementado para 10h.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Efeito do tratamento de solubilização a 540°C nas propriedades de tração da liga A356.

As fractografias da liga bruta de fundição e solubilizadas por diferentes tempos a 540°C estão representadas na figura 4a-d. Mudanças no comportamento de fratura podem ser observados desde a condição frágil (Figura 4.a) até a relativamente dúctil (Figura 4.d). A superfície de fratura da liga bruta de fundição (Figura 4a) exibe fratura tipicamente frágil com superfícies mostrando planos de placa, com superfície facetada como morfologias. Já as Figuras 4b a 4.d mostram um modo de fratura cada vez mais dúctil, com alvéolos de secção circular, com o aumento do tempo de solubilização.

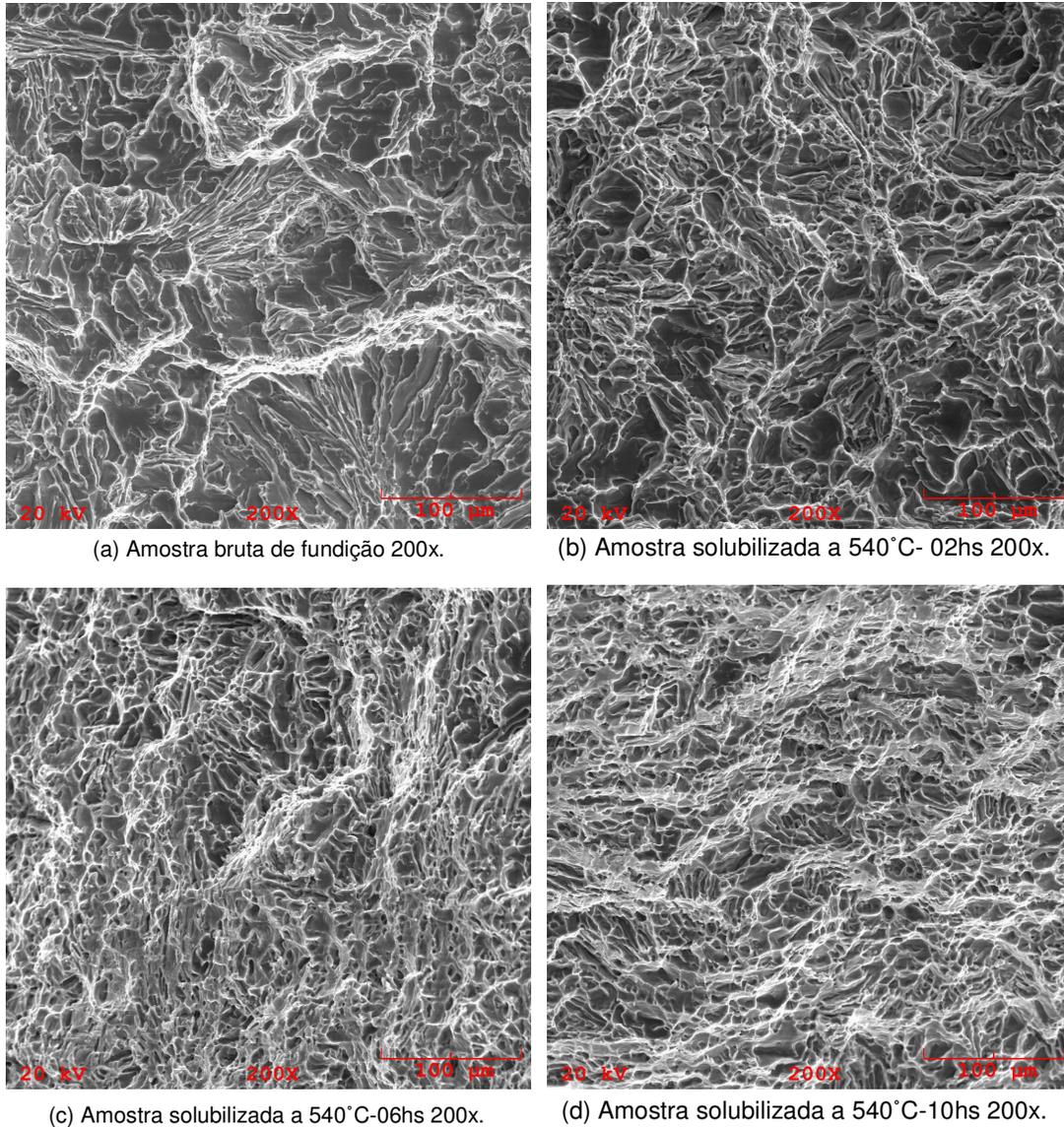


Figura 4. Fractografias de amostras bruta de fusão (a) e solubilizadas por 2h(b), 6h(c) e 10h(d). MEV.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- o tempo de solubilização apresenta um efeito significativo sobre a microestrutura da liga A356, sendo que estas alterações microestruturais ocasionam variações nas propriedades mecânicas desta liga;
- os melhores resultados em termos de propriedades mecânicas foram obtidos para o uso de 10 h de solubilização a temperatura de 540 °C;
- para menores tempos de solubilização (2h e 6h) ocorreram incrementos consideráveis na ductilidade e decréscimos na tensão de escoamento, estas variações podem estar relacionadas excessivos crescimentos das dendritas de alumínio α e com o coalescimento das partículas de Si;

- as fractografias confirmam a ocorrência de variação gradual no comportamento dúctil–frágil da liga A356 a medida que a mesma é submetida a tratamentos de solubilização em tempos crescentes.

REFERÊNCIAS

- 1 HERNÁNDEZ-PAZ, J.F.; PARAY, F.; GRUZLESKI, J.E. Natural Aging and Heat Treatment of A356 Aluminium Alloy, **AFS Transaction**, 2004.
- 2 CHAUDHURY, S.K.; APELIN, D. Effects of Solution Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg (354) Alloy Using a Fluidized Bed Reactor, **AFS Transactions**, 1-14 (2005).
- 3 SHIVKUMAR, S.; RICCI, S.; KELLER, C.; APELIAN, D. Effect of Solution Treatment Parameters on Tensile Properties of Cast Aluminum Alloys, **Journal of Heat Treating**, vol. 8, n.1, p. 63-70, 1990.
- 4 OGRIS, E.; WAHLEN, A.; LUCHINGER, H.; UGGOWITZER, P.J. On The Silicon Spheroidization in Al-Si Alloys, **Journal of Light Metals**, vol. 2, p. 263-269, 2002.
- 5 ZHANG, D.L.; ZHENG, L.H.; St JONH, D.H. Effect of a Short Solution Treatment Time on Microstructure and Mechanical Properties of Modified Al-7wt.%Si-0,3wt.%Mg Alloy, **Journal of Light Metals**, vol. 2, p. 27-36, 2002.
- 6 TIRYAKIOGLU, M.; SHUEY, R.T. Quench Sensitivity of an Al-7 Pct Si-0,6 Pct Mg Alloy: Characterization and Modeling, **The Minerals, Metals e Materials Society and ASM International**, publicado online, DOI 10.1007/s11663-007-9027-4, 2007.
- 7 MA, Z.; SAMUEL, A.M.; SAMUEL, F.H. Effect of Iron and Cooling Rate on Tensile Properties of B319.2 Alloys in Non-Modified and Sr-Modified Conditions. **AFS Transactions**.2004
- 8 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. 32A, 2001.
- 9 CACERES, C.H.; DAVIDSON, C.J.; GRIFFITHS, J.R.; WANG, Q.G. The Effect of Mg on the Microstructure and Mechanical Behavior of Al-Si-Mg Casting Alloys, **Metallurgical and Materials Transactions A**, vol. 30A, 1999.