



TRATAMENTO DE SOLUBILIZAÇÃO DA LIGA A356: EFEITOS DO TEMPO E DA TEMPERATURA¹

Tatiane Haske²
Guilherme Ourique Verran³

Resumo

Este trabalho teve por objetivo verificar os efeitos do tempo e da temperatura de solubilização sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga de alumínio A356. Os corpos de prova foram fundidos e submetidos a tratamentos térmicos de solubilização usando diferentes combinações de tempos e temperaturas. Para avaliação dos resultados foram realizados ensaios de resistência à tração, de microdureza da matriz e análises metalográficas. Os resultados indicaram pequenos aumentos nos limites máximo de resistência e de escoamento e acréscimos significativos na ductilidade em função de aumentos nos tempos de solubilização. Variações na temperatura de solubilização não ocasionaram alterações significativas nas propriedades mecânicas. As melhores propriedades foram obtidas com 10hs de solubilização a 540°C como resultado de uma melhor distribuição e um maior coalescimento das partículas de Si, gerando uma microestrutura mais homogênea.

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

SOLUTION HEAT TREATMENT OF A356 ALLOY: EFFECTS OF THE TIME AND TEMPERATURE

Abstract

The present study was undertaken to investigate the effects of solution heat treatment times and temperatures on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy. Tensile specimens were casted in permanent mould and solution heat treated using different combinations of times and temperatures were performed. The results evaluations were carried out using tensile tests, metallographic analysis and microhardness tests. The results indicated minor increase in ultimate tensile and yield strengths and higher increases in elongation values as a function of the solution heat treatment time increases. Changes on solution heat treatment temperatures were resulted in minor variations on mechanical properties. 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.

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

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Mestre Eng. Materiais. – Pesquisadora DEM/PGCEM/UDESC*

³ *Dr. Eng. Met. – Prof. do DEM-PGCEM/UDESC*



1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de se obter ligas de alumínio com melhores propriedades mecânicas tem-se desenvolvido pesquisas relacionadas com o tratamento térmico dessas ligas. A liga de alumínio A 356, muito utilizada em componentes automobilísticos e aeroespaciais por suas características físicas e mecânicas,⁽¹⁾ permite melhorias no seu desempenho mecânico através de tratamentos térmicos.⁽²⁾

O tratamento térmico típico dessas ligas envolve solubilização, tempera e envelhecimento artificial. Procedimentos padrões definidos pela ASTM recomendam, para a liga A 356 fundida em molde permanente, um tratamento térmico denominado como T6, que envolve um tratamento de solubilização entre 4 horas a 12 horas a $540^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, tempera em água, envelhecimento naturalmente por 8 horas e então envelhecimento artificial de 6 horas a 12 horas a $155^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.⁽¹⁾ De acordo com a aplicação da liga o tratamento térmico também se pode resumir ao tratamento de solubilização seguido de têmpera e envelhecimento natural (T4), quando se requer alta tenacidade,⁽³⁾ ou um tratamento de envelhecimento artificial realizado diretamente após fundição da liga, quando o objetivo é obter alta resistência e baixa ductilidade. O tratamento T6 é recomendável quando, ambos, ductilidade e resistência são desejáveis.^(4,5)

Quanto à microestrutura, o tratamento térmico de solubilização de ligas de alumínio fundidas do grupo AlSiMg resulta em: 1) dissolução dos elementos de liga Si e Mg na matriz de alumínio, 2) coalescimento e esferoidização das partículas de silício e, 3) uma homogeneização geral da microestrutura. 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.^(6,7) 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.⁽⁶⁾ 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^(4,8) determinaram experimentalmente que curtos tempos de solubilização já propiciam alterações microestruturais significativas na liga A356, levando a incrementos consideráveis nas propriedades mecânicas. Outros pesquisadores⁽⁹⁾ 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 fusão dos contornos dendríticos. Tiryakioglu e Shuey⁽⁷⁾ 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 possíveis alterações nas propriedades mecânicas é a variação na composição química da liga, alguns estudos^(9,10) 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^(2,11) 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 os efeitos do tempo e da temperatura de solubilização na microestrutura e nas propriedades da liga A356.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

Dois lotes diferentes da liga de alumínio fundida A356 foram utilizados para a realização desse trabalho. As composições químicas da liga estão representadas na Tabela 1. Para o Lote 1 apenas o efeito do tempo de tratamento foi verificado, conforme publicação em trabalho anterior,⁽¹²⁾ enquanto que para o Lote 2 tanto o efeito do tempo quanto da temperatura de solubilização na liga foram analisados.

Tabela 1. Composições químicas dos diferentes lotes da liga A356 utilizados neste trabalho

	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
Lote 1	6,919	0,145	0,146	0,014	0,054	0,020	0,026	0,139	0,007	0,003	0,003	Bal.
Lote 2	6,188	0,302	0,203	0,007	0,020	0,024	0,064	0,000	0,014	0,011	0,002	Bal.

Os corpos de prova para ensaio de tração, utilizados nesse estudo, foram obtidos pela fusão da liga A356 e elevação da temperatura do banho até 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

As amostras foram solubilizadas em um forno tipo mufla com aquecimento por resistência a diferentes tempos e temperaturas, seguindo-se têmpera em água a temperatura ambiente de 24°C ± 2°C. Após o tratamento térmico de solubilização as amostras foram envelhecidas naturalmente por 20h à temperatura ambiente (~25°C) e então submetidas aos ensaios de tração. Os parâmetros do tratamento térmico são apresentados na tabela 2. As definições dos tempos e das temperaturas de solubilização utilizados, foram baseadas nos padrões de solubilização para molde permanente de 4 a 12 horas a temperatura de 540°C, segundo Metals HandBook.⁽⁵⁾

Tabela 2. Detalhamento dos tratamentos de solubilização realizados

	Ciclo	Tratamento de Solubilização		Temperatura de Têmpera (°C)	Envelhecimento Natural (h)
		Temperatura (°C)	Tempo (h)		
Lote 1	A	540 ± 2	2	24 ± 2	20 ± 2
	B	540 ± 2	6	24 ± 2	20 ± 2
	C	540 ± 2	10	24 ± 2	20 ± 2
	D	540 ± 2	12	24 ± 2	20 ± 2
Lote 2	F	510 ± 2	10	24 ± 2	20 ± 2
	G	540 ± 2	10	24 ± 2	20 ± 2
	H	570 ± 2	10	24 ± 2	20 ± 2
	I	540 ± 2	6	24 ± 2	20 ± 2
	J	540 ± 2	12	24 ± 2	20 ± 2

A caracterização microestrutural das ligas nas condições bruta de fundição e tratadas 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 com velocidade do cabeçote para aplicação da carga de 5mm/minuto, seguindo a norma ASTM E 8M.⁽¹³⁾ Os ensaios foram realizados sem o uso de extensômetro, tendo sido utilizado o limite convencional 0,2% para medição da tensão limite de escoamento. Onze ensaios foram conduzidos para cada

condição experimental. Dos onze o menor valor não foi levado em consideração para o cálculo da média.

A microdureza da matriz da liga foi determinada utilizando um indentador Vickers com carga para a realização de ensaio de 25 g (HV 0,025). Um total de dez medidas foram obtidas para cada amostra analisada.

Os resultados destes ensaios serão apresentados na forma de valores médios para cada condição experimental com os seus respectivos desvios padrão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efeitos do tratamento térmico de solubilização sobre a microestrutura da liga A356 podem ser observados com o incremento do tempo de solubilização. A figura 1 apresenta uma seqüência de micrografias mostrando a evolução microestrutural decorrentes das variações no tempo de solubilização para o segundo lote da liga A356 (liga com 0,3% em peso de Mg). Observa-se que para o tempo de 6h ainda existem alguns precipitados do intermetálico Mg_2Si .

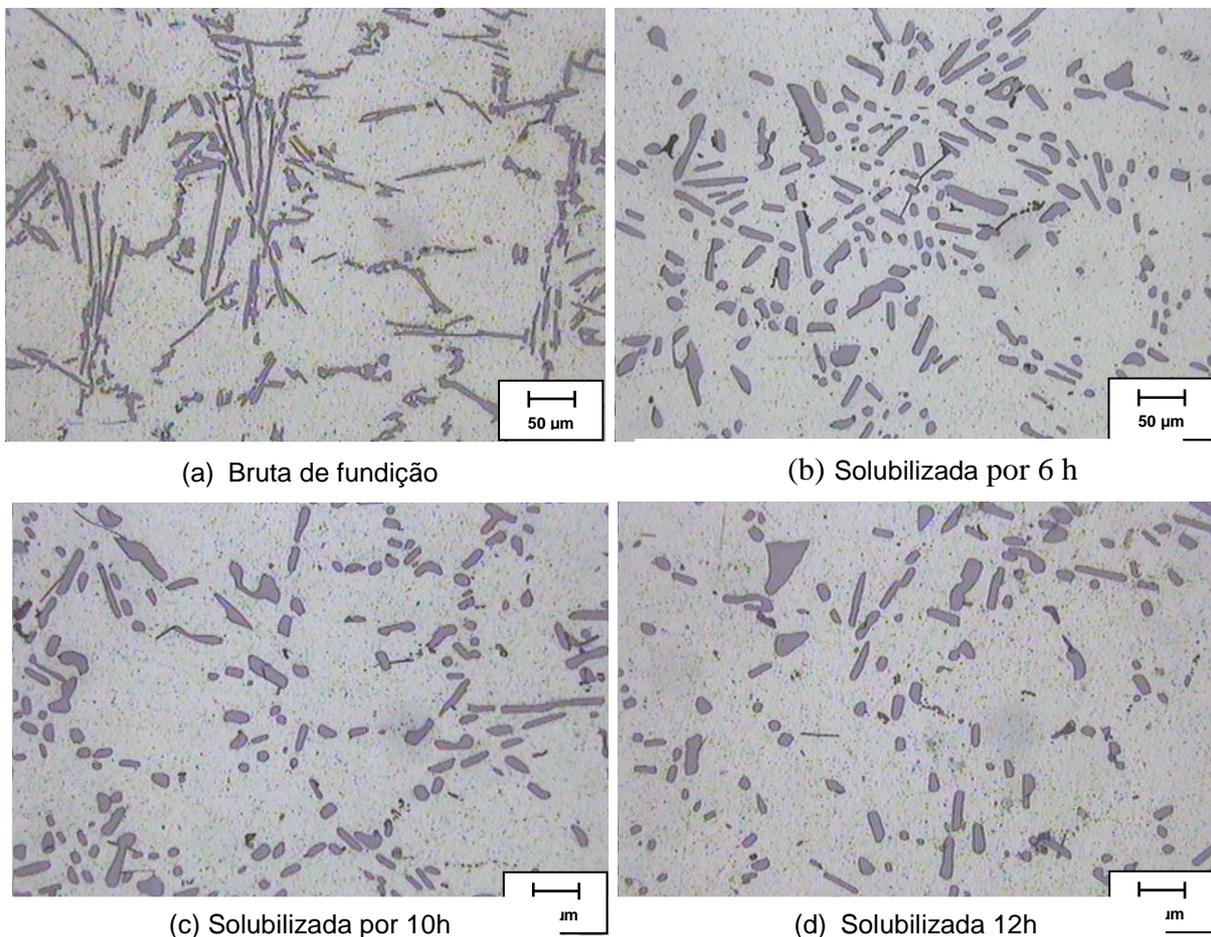


Figura 1. Microestruturas da liga A 356 (lote 2) bruta de fundição (a) e solubilizada a 540°C por (b) 6 h, (c) 10 h e (d) 12 h.

As mesmas alterações microestruturais apresentadas no primeiro lote da liga, em trabalho publicado anteriormente⁽¹²⁾ podem ser observadas na microestrutura da liga do lote 2, com o decorrer do tempo de tratamento. As partículas finas, compridas e pontiagudas características da condição bruta de fundição, irregularmente distribuídas nas regiões interdendríticas (Figura 1a), tornaram-se menores, mais encorpadas e melhor distribuídas na microestrutura, com o aumento do tempo de

solubilização (Figura 1b-d), estas alterações podem ser atribuídas aos mecanismos de fragmentação e coalescimento dessas partículas. Isso também fez com que os contornos dendríticos que se apresentam bem definidos na condição bruta de fundição (Figura 1a) perdessem sua evidência com o tempo de solubilização principalmente a partir de 10 horas de tratamento (figura 1b-d). Para os dois lotes da liga uma melhor distribuição do Si e uma maior homogeneização estrutural foi alcançada para 10 horas de tratamento.

Cáceres, Davidson e Griffiths,⁽¹⁴⁾ observaram que os contornos dendríticos ficam indefinidos com o tratamento de solubilização em estruturas com dendritas menores, submetidas à alta taxa de solidificação. No presente trabalho pode-se observar que os contornos dendríticos também ficam menos definidos para tempos de solubilização a partir de 10 h de tratamento.

A Figura 2 mostra os efeitos da variação na temperatura de solubilização, a 510°C, 540°C e 570°C por 10 horas de tratamento, sobre a microestrutura da liga A356.

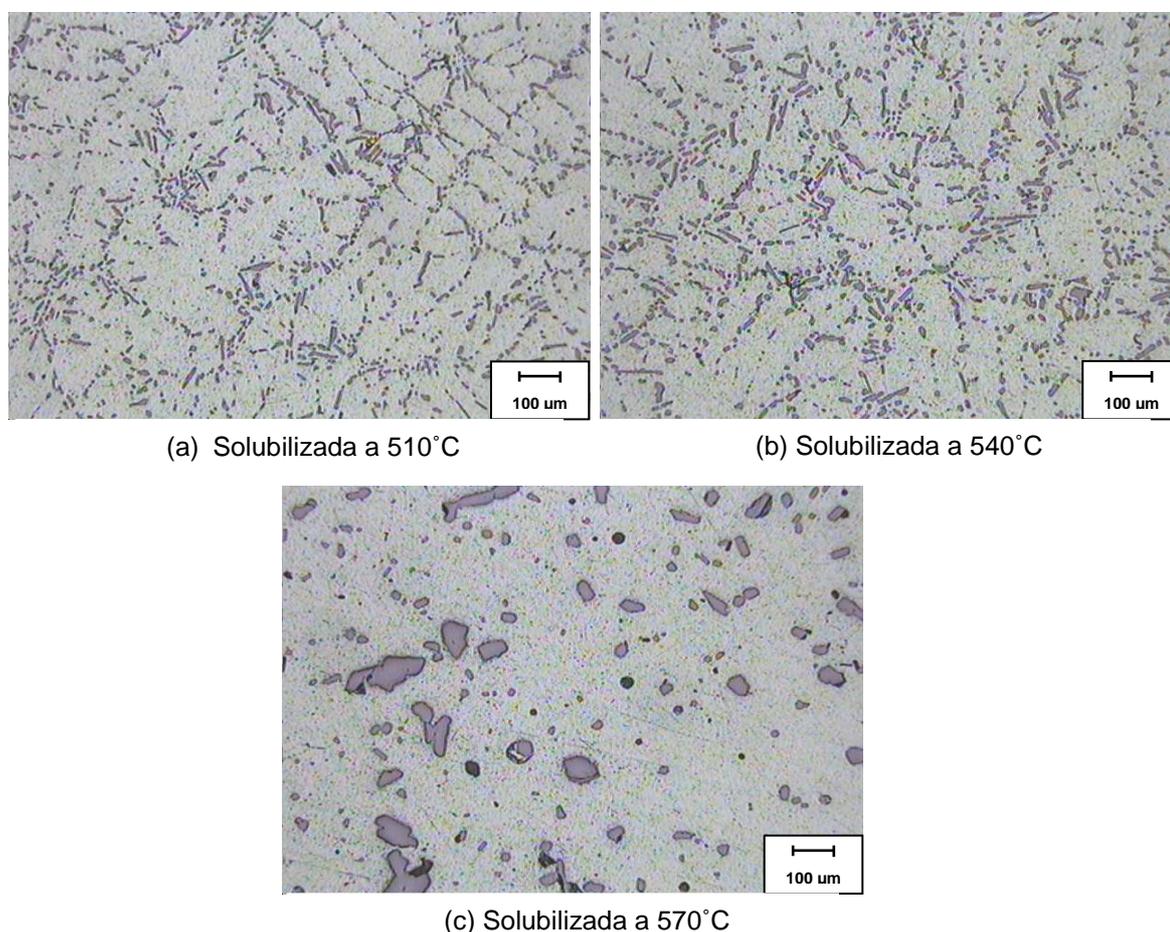


Figura 2. Microestruturas da liga A356 solubilizada por 10 horas a (a) 510°C, (b) 540°C e (c) 570°C.

Comparando a microestrutura da liga solubilizada a 510°C (Figura 2a) com a solubilizada a temperatura de 540°C (Figura 2b) não foram observadas grandes alterações microestruturais. Apenas os contornos dendríticos ficaram um pouco mais evidentes e as partículas de Si pouco menos coalescidas e distribuídas com relação à mesma liga solubilizada a 540°C. Uma grande mudança na microestrutura foi observada quando a liga foi submetida ao tratamento de solubilização a temperatura de 570°C (Figura 2c). Como o aumento na temperatura de solubilização tende a aumentar a velocidade das transformações na microestrutura, as partículas de Si

coalesceram e cresceram mais rapidamente, tornando-se muito mais grossas com relação às outras condições estudadas anteriormente, ocorrendo também o desaparecimento dos contornos dendríticos. Estes resultados estão em concordância com Shivkumar et al.,⁽⁹⁾ que afirmaram que taxas extremamente altas de engrossamento das partículas de Si e a fusão dos contornos podem ser obtidas com a utilização de temperaturas maiores que 560°C.

As influências do tempo de solubilização nas propriedades mecânicas da liga A356 podem ser visualizadas na Figura 3.

Com o aumento no tempo de tratamento de solubilização ocorreram incrementos nas propriedades mecânicas, tanto na liga A356 com baixo Mg (lote1) como para liga A356 com 0,3% em peso de magnésio (lote 2). Todas as propriedades tiveram um comportamento semelhante, ou seja, as propriedades aumentaram com o acréscimo do tempo de solubilização até 10 horas, ocorrendo um pequeno decréscimo para 12 horas de solubilização, este decaimento pode estar associado ao fato de que para maiores tempos de solubilização o mecanismo de coalescimento do Si passa a predominar em detrimento do endurecimento por solução sólida. As melhores propriedades obtidas para o tempo de 10 horas de tratamento podem ser explicadas pela microestrutura mais homogênea obtida para esse tempo, bem como pela maior solubilização do Mg na matriz rica em alumínio.

Os resultados das propriedades mecânicas são semelhantes aos valores descritos por Pedersen e Arnberg,⁽²⁾ confirmando que para longos tempos de solubilização ocorrem pequenas variações nestas propriedades.

Um comportamento diferente foi observado no limite de escoamento para o lote 1 da liga (Figura 3b), que apresentou uma queda nas primeiras horas de solubilização (2 h e 6 h), provavelmente devido ao fato de que a quantia de Mg dissolvido na matriz não tenha sido o suficiente para compensar o crescimento das dendritas, conforme descrito em publicação anterior.⁽¹²⁾

Os resultados indicam que o Mg teve uma forte influência nas propriedades de resistência da liga. Este efeito ficou evidente para a tensão limite máximo de resistência (Figura 3a) onde se pode observar que tratamentos com tempos acima de 6 h de solubilização ocasionaram acréscimos mais significativos nesta propriedade para a amostras do lote 2 em comparação com as amostras do lote 1, indicando que para maiores tempos de solubilização e maiores teores de Mg o mecanismo de endurecimento por solubilização foi efetivo.

O tratamento de solubilização resultou em um pequeno aumento nas propriedades de resistência da liga e acréscimos significativos na ductilidade. O dobro do alongamento foi obtido com 6 horas de solubilização (Figura 3c). Os efeitos na morfologia do Si (coalescimento e esferoidização) foram os fatores que proporcionaram maior ductilidade à liga.

Apesar dos melhores resultados serem obtidos com 10 h de tratamento a 540°C, um tratamento de 6 h seria o suficiente para a obtenção de bons níveis de propriedades.

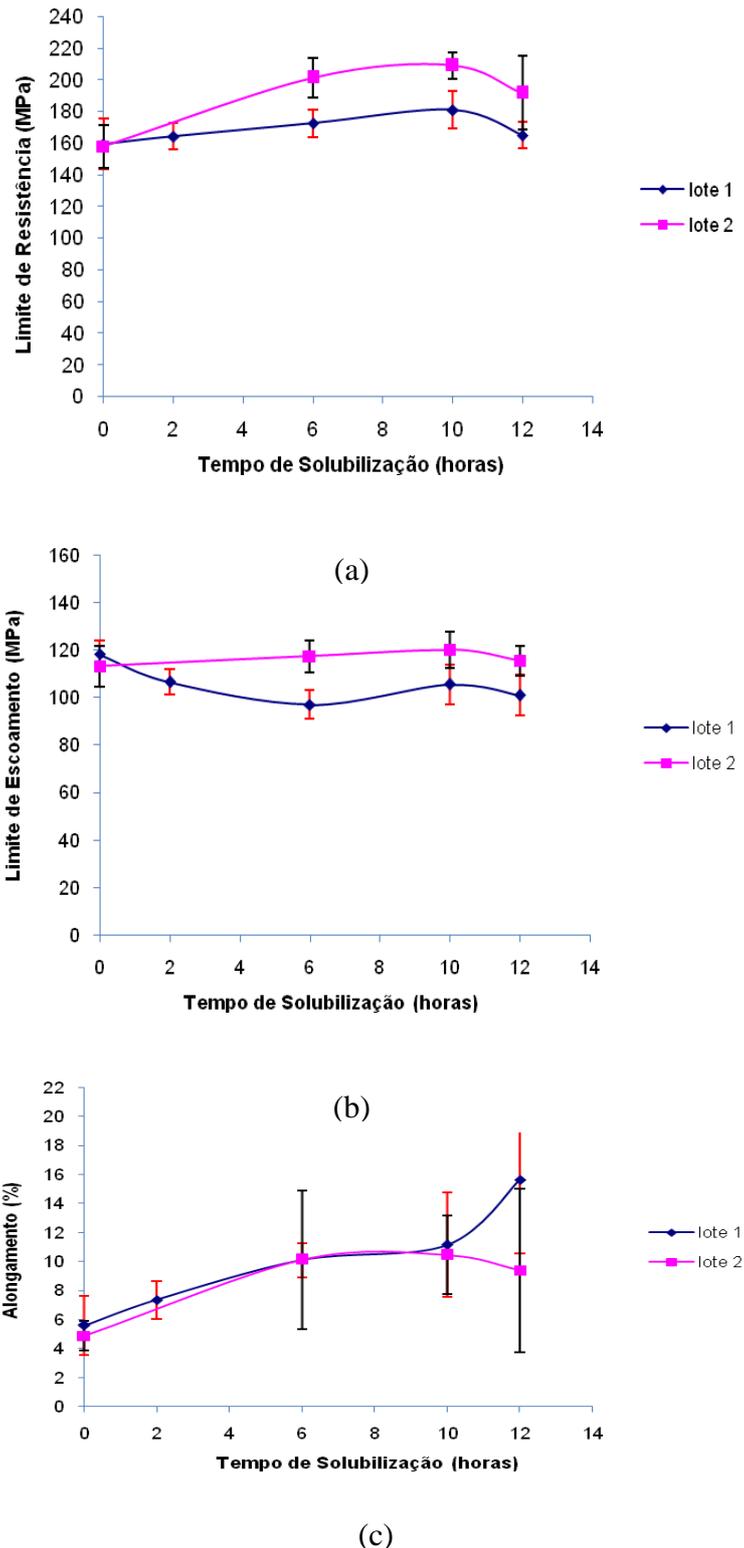


Figura 3. Variações das propriedades de tração da liga A356 em função do tempo de solubilização: (a) limite de resistência, (b) limite de escoamento, (c) alongamento.

As variações na microdureza da liga para as duas composições químicas estudadas são apresentados na Figura 4. Observa-se aumentos mais significativos na microdureza das mostras com maior teor de Mg, indicando que uma maior quantidade de Mg deve ter entrado em solução sólida na matriz. Neste caso ficou evidente que o aumento no tempo de solubilização até 10 h e maiores teores de Mg



tendem a aumentar a dureza da matriz como decorrência do mecanismo de endurecimento por solubilização.

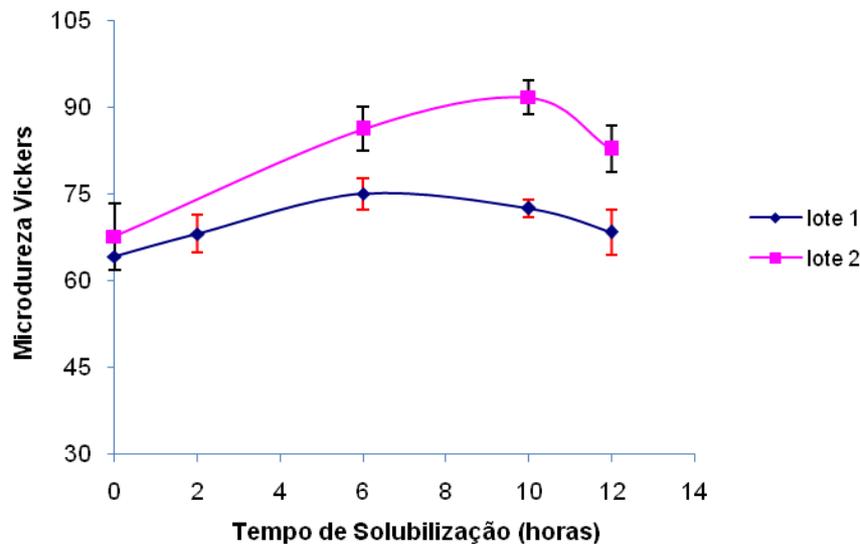


Figura 4. Variações da microdureza para em função do tempo de solubilização para os dois lotes da liga A356 estudados.

Os efeitos da temperatura de solubilização, usando temperaturas de 510°C, 540°C e 570°C, sobre as propriedades mecânicas são apresentados na figura 5.

As melhores propriedades de tração foram obtidas a temperatura de 540°C, em função da sua microestrutura mais homogênea com relação às demais temperaturas.

A 510°C as partículas de Si se apresentaram menores e menos distribuídas na microestrutura em comparação com a obtida a 540°C. Para 570°C ocorreram reduções da máxima resistência (Figura 5a), apesar da estrutura da liga tratada a essa temperatura ter seus contornos dendríticos desaparecidos, ela apresentou menor ductilidade que as amostras solubilizadas usando as demais temperaturas (Figura 5c). Estes resultados indicam um comportamento anômalo das amostras tratadas nesta condição experimental quanto a variação nas propriedades mecânicas.

A ocorrência de reduções nas propriedades para a temperatura de 570°C confirma as observações de Shivkumar et al.⁽⁹⁾ de que o tratamento de solubilização acima de 560°C resulta na redução das propriedades em função da fusão dos contornos de grão.

Também foi observado que o limite de escoamento foi maior para liga tratada a 570°C em comparação com a tratada a 510°C (Figura 5b). Isso pode ser resultado de uma maior dissolução de Si e Mg na matriz, e de uma maior homogeneização na distribuição das partículas de Si para o tratamento térmico a essa temperatura. Estes resultados estão de acordo com Zhang, Zheng e St Jonh,⁽⁴⁾ que associaram o aumento no limite de escoamento destas ligas com a presença de maiores quantidades Mg e Si em solução na matriz e com a maior homogeneidade da microestrutura. O aumento significativo na microdureza da liga tratada por 10 h se manteve, com relação à condição bruta de fundição, para as diferentes temperaturas. As variações nos valores de microdureza com o aumento da temperatura (Figura 5d) foram pouco significativas.

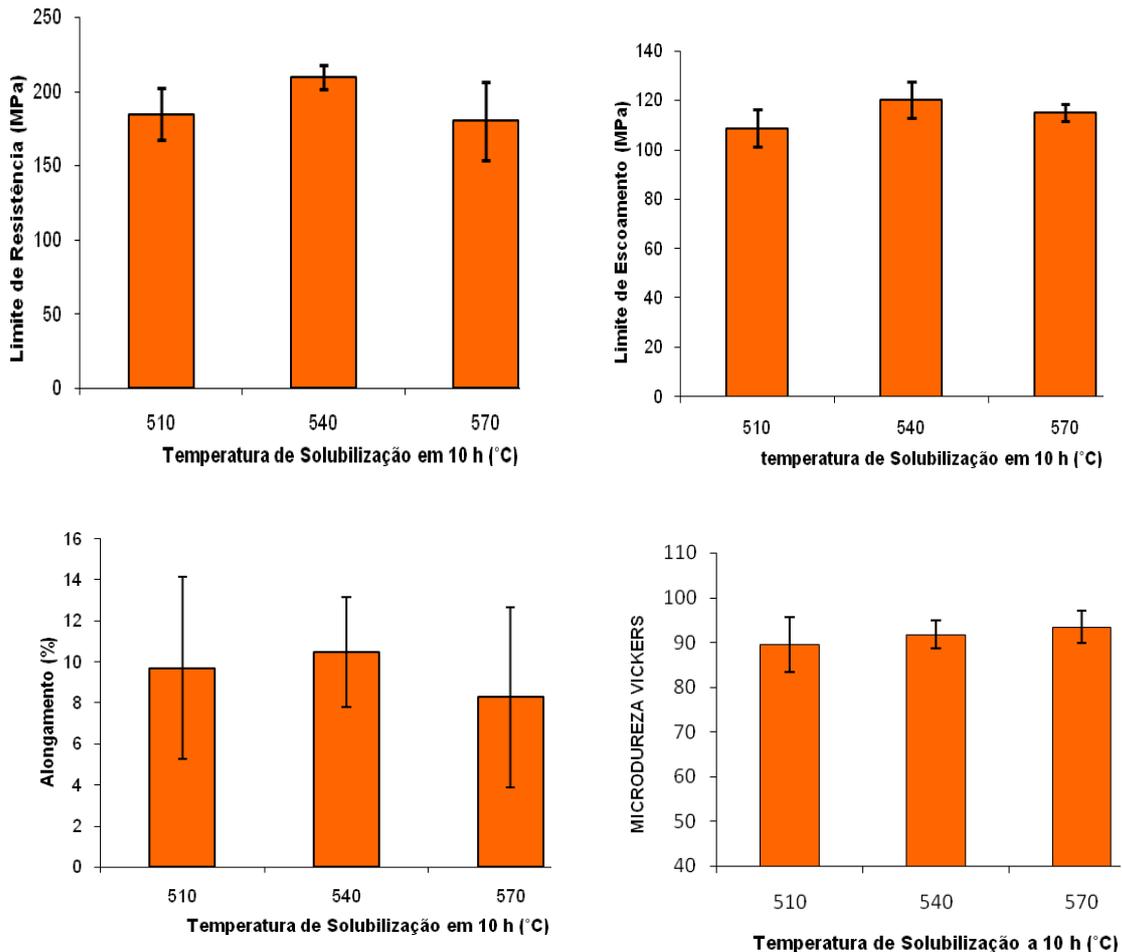


Figura 5. Efeito da temperatura de solubilização nas propriedades mecânicas da liga A356 (0,3% Mg).

Uma descrição mais detalhada dos resultados apresentados neste artigo foi apresentada em publicação recente.⁽¹⁵⁾

4 CONCLUSÕES

- O tratamento de solubilização resultou em alterações microestruturais, especialmente na morfologia e distribuição do Si e na forma dos contornos dendríticos.
- Com o aumento do tempo de solubilização os contornos dendríticos ficaram menos evidentes e as partículas de Si mais coalescidas e melhor distribuídas na microestrutura, obtendo-se uma homogeneização da estrutura. O aumento da temperatura acelerou esses fenômenos.
- O tratamento de solubilização na liga A356 com 0,3% em peso de Mg proporcionou uma maior ductilidade juntamente com um aumento na dureza e na resistência, indicando que um maior teor de Mg na liga tende a aumentar o efeito de endurecimento por solubilização.
- As melhores propriedades mecânicas foram obtidas para a liga A356 solubilizada a 540°C por 10 h, em função da maior homogeneidade da microestrutura nessa condição de tratamento.



- O principal efeito do tratamento térmico de solubilização na liga A356 foi torná-la mais dúctil, devido à esferoidização, coalescimento e ao maior espaçamento entre as partículas de Si.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao PGCEM/CCT/UEDESC pelo apoio financeiro e pela infra-estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 HERNÁNDEZ-PAZ, J.F.; PARAY, F.; GRUZLESKI, J.E. Natural Aging and Heat Treatment of A356 Aluminum Alloy, **AFS Transaction**, 2004.
- 2 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.
- 3 MAJOR, J.F.; SIGWORFH, G.K. Chemistry / Property Relationships in AA 206 Alloys, **AFS Transactions**, 2006.
- 4 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.
- 5 ASM. Heat Treating. Metals HandBook, vol 4, 2004
- 6 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).
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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
- 11 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.
- 12 VERRAN, G. O.; HASKEL, T.; COSTA, C.E. Efeitos do Tratamento Térmico de Solubilização na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio A356, **64^o Congresso Anual da ABM**, 2009, Belo Horizonte/MG/Brasil.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. E 8M – 01: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2002.
- 14 CACERES, C.H.; DAVIDSON, C.J.; GRIFFITHS, J.R. The deformation and Fracture Behaviour of an Al-Si-Mg Casting Alloy, **Material Science and Engineering A197**, p. 171-179, 1995.
- 15 HASKEL, T. Efeito do tratamento térmico de solubilização na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga de alumínio A356. 115 páginas. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS) – PGCEM/UEDESC, Joinville, 2009.