

ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL DAS LIGAS 356 E A356: EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO¹

Greice Scarduelli Ronsani²

Guilherme Ourique Verran³

Vinícius Maurício Cardeliquio Villela⁴

Wagner Felipe Vogel⁴

Resumo

Foram investigados os efeitos da composição química (diferentes percentuais de Mg e maiores quantidades de impurezas) e dos parâmetros temperatura e tempo de envelhecimento sobre as propriedades mecânicas de ligas de alumínio de fundição da série Al7SiMg. Amostras das ligas A356 e 356 (com diferentes percentuais de Mg) foram fundidas em coquilha e submetidas ao tratamento de solubilização por 10 h a 540°C seguido de tempera em água (25°C), a seguir foram realizados tratamentos de envelhecimento a usando diferentes combinações de tempos e de temperaturas. Para avaliação dos resultados foram realizados ensaios mecânicos de tração, microdureza e análises da microestrutura e da superfície de fratura. Os resultados mostraram melhores propriedades mecânicas para as amostras com maior quantidade de Mg. Observou-se um forte efeito dos parâmetros tempo e temperatura de envelhecimento sobre o comportamento mecânico das ligas estudadas.

Palavras-chave: Ligas AlSiMg; Envelhecimento artificial; Propriedades mecânicas; tempo de envelhecimento; Temperatura de envelhecimento.

ARTIFICIAL AGING OF ALLOYS 356 AND A356: EFFECTS OF CHEMICAL COMPOSITION AND PROCESSING PARAMETERS

Abstract

Experiments was undertaken to investigate the effects of aging treatment parameters (time and temperature) and Mg contends on the mechanical properties of 356 aluminum alloy, Additionally the high purity A356 alloy was studied. The T6 heat treatments, which consist of solution and aging treatments, were carried out. The specimens were casted in permanent moulds and submitted to solution treatments for 10 h at 540°C, the samples were quenched in cold water (25°C), followed by aging at 155°C for 2,5 h, 8 h and 12 h. Aging was also carried out at different temperatures (155°C, 175°C, 195°C and 215°C) for 5h. The results were evaluated using tensile tests, metallographic analysis and micro hardness tests. The results were showed the best mechanical properties for 356 alloy with higher Mg contends. It was found that treatment parameters (time and temperature) to have stronger effects on the mechanical behavior of these alloys.

Key words: AlSiMg alloys; Artificial aging; Mechanical properties; Aging time; Aging temperature.

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

² Msc. Engenharia de Materiais – SOCIESC.

³ Dr. Eng. Metalúrgica – Professor do DEM/PGCEM/UDESC.

⁴ Acadêmico de Eng. Mecânica – Bolsista PIBIC_CNPQ_UDESC.

1 INTRODUÇÃO

As ligas leves para fundição exercem um papel importante em uma grande variedade de aplicações militares e civis. Em particular, sua utilização nos sistemas de transportes terrestres, aéreos e navais tem resultado na redução de peso e conseqüente redução no consumo de combustível. A mudança sistemática de aços forjados, ferros fundidos e aços soldados por fundidos em alumínio de alta qualidade e alta resistência apresenta um grande crescimento, em especial na produção de veículos comerciais.⁽¹⁾ Quando o alumínio se liga com outros elementos como o magnésio, cobre silício entre outros, são formados importantes sistemas de ligas de alumínio com grande potencial para aplicações que requerem melhores combinações resistência x peso como automobilísticas, aeroespaciais e estruturais. Parte dos elementos de liga entra e solução solida na matriz e outra parte dos elementos forma partículas intermetálicas durante a solidificação. Adições de silício ao alumínio puro aumentam sensivelmente a fluidez, a resistência a trincas de contração e as características de alimentação. As composições mais utilizadas em todos os processos de fundição são as do sistema alumínio – silício. Os teores de silício no alumínio podem alcançar até 25% em peso.⁽²⁾ O magnésio e o cobre são freqüentemente adicionados as ligas alumínio – silício para aumentar a resistência matriz rica em alumínio, enquanto o ferro é uma impureza comumente encontrada nestas ligas e forma compostos intermetálicos que fragilizam a liga. Os efeitos totais destes elementos de liga ainda não são totalmente compreendidos, entretanto, sabe – se que o cobre aumenta o numero de porosidades. O magnésio é o elemento chave para o incremento de dureza e resistência em ligas de alumínio-silício tratadas termicamente sendo comumente usado em ligas Al-Si contendo cobre, níquel e outros elementos para o mesmo propósito.⁽³⁾ Algumas composições de alta qualidade nas ligas Al-Si, empregam magnésio na faixa de 0,4% a 0,7%,⁽⁴⁾ o magnésio acelera e intensifica o efeito de endurecimento, durante o tratamento térmico T6, decorrente da precipitação de compostos intermetálicos Mg₂Si.⁽⁵⁾ Diversos estudos são descritos na literatura especializada.⁽⁶⁻¹¹⁾ envolvendo os efeitos da composição química e dos parâmetros de tratamento sobre as propriedades mecânicas das ligas de fundição AlSiMg.

Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos das variáveis tempo e temperatura de envelhecimento sobre as propriedades mecânicas da liga 356, bem como observar a influência do percentual de magnésio na liga sobre estas propriedades. Adicionalmente foram feitas comparações com a liga A356 que é uma versão mais pura desta liga.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os corpos de prova brutos de fundição (BF) foram obtidos por fusão em forno de indução e vazamento do metal líquido em um molde permanente de aço 1045. O metal foi elevado à temperatura de 740°C e vazado a 710°C no molde aquecido a temperatura de 400°C. Operações de tratamento do metal como desgaseificação e escorificação foram realizadas durante o processo de fusão. Para cada condição foram obtidos sete corpos de prova com 140 ±1 mm de comprimento total e 12,60 ±0,1 mm de diâmetro útil no comprimento de 75 ±0,15 mm. Foram utilizadas duas composições da liga 356 tendo como principal variável o teor de magnésio e uma versão mais pura denominada A356. As composições químicas das ligas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composições químicas das ligas utilizadas

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Al
356 Baixo Mg	7,857	0,343	0,296	0,441	0,295	0,013	0,013	0,031	0,024	0,004	Bal.
356 Alto Mg	7,772	0,356	0,295	0,445	0,498	0,013	0,013	0,031	0,025	0,006	Bal.
A356	6,353	0,136	0,006	0,019	0,347	0,008	0,008	0,000	0,004	0,000	Bal

Os tratamentos térmicos foram realizados usando ciclos característicos dos tratamentos T6, iniciando pela solubilização em forno de mufla a temperatura de 540°C por 10 horas, resfriamento em água a temperatura ambiente e envelhecimento artificial usando diferentes combinações de tempos e temperaturas (Tabela 2).

Tabela 2. Condições experimentais investigadas

Liga 356.0					
Ciclo*	Solubilização		Resfriamento	Envelhecimento	
	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Tempo(h)	Temperatura (°C)
BF	0	0	0	0	0
SOL	10	540	25 ± 4	0	0
T6.1	10	540	25 ± 4	2	155± 4
T6.2	10	540	25 ± 4	5	155± 4
T6.3	10	540	25 ± 4	8	155± 4
T6.4	10	540	25 ± 4	12	155± 4
T6.5	10	540	25 ± 4	5	175± 4
T6.6	10	540	25 ± 4	5	195± 4
T6.7	10	540	25 ± 4	5	215± 4
Liga A356. 0					
BF	0	0	0	0	0
SOL	10	540	25 ± 4	0	0
T6	10	540	25 ± 4	5	155± 4

* Para a liga 356 foram investigados dois percentuais de Mg indicados na Tabela 1.

Para a avaliação das propriedades mecânicas foram conduzidos ensaios de tração utilizando uma máquina de ensaios universais EMIC, com velocidade de ensaio de 5 mm/minuto e ensaios de microdureza Vickers utilizando carga de 25 g. Na caracterização microestrutural foram utilizados microscopia óptica e MEV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de tração e microdureza obtidos para as diferentes condições descritas na Tabela 2 para as ligas 356 e A356 são apresentados nas Tabelas 3 e 4, estes valores representam a média em sete corpos de prova para cada condição experimental, os números entre parênteses indicam os desvios padrão.

Tabela 3. Resultados das propriedades mecânicas para as duas versões da liga 356

Limite de escoamento (MPa)									
	BF	SOL	T6 155°C				T6 5h		
			2 h	5h	8h	12h	175°C	195°C	215°C
Baixo Mg	142,5 (±7,2)	148,5 (±8,2)	173,8 (±6,8)	228,7 (±4,4)	252,4 (±6,7)	256,7 (±10,7)	273 (±10,0)	281,1 (±4,0)	236,7 (±9,3)
Alto Mg	152,5 (±8,1)	174,8 (±11,7)	204,7 (±5,4)	252,4 (±5,6)	270,7 (±8,5)	272,1 (±26,2)	319,4 (±22,6)	315,2 (±15,7)	258,7 (±16,8)
Limite de Resistência (MPa)									
	BF	SOL	T6 155°C				T6 5h		
			2 h	5h	8h	12h	175°C	195°C	215°C
Baixo Mg	187,7 (±12,7)	248,0 (±7,8)	256,8 (±55,3)	295,3 (±23,9)	311,4 (±15,0)	311,9 (22,7)	312,3 (±15,6)	313,1 (±6,1)	272,0 (±12,7)
Alto Mg	185,0 (±21,0)	216,4 (±33,7)	276,8 (±13,4)	302,7 (±20,3)	294,2 (±29,3)	282,4 (±31,0)	332,2 (±30,1)	337,0 (±25,3)	278,6 (±22,3)
Alongamento (%)									
	BF	SOL	T6 155°C				T6 5h		
			2 h	5h	8h	12h	175°C	195°C	215°C
Baixo Mg	2,5 (±0,6)	9,6 (±1,1)	7,1 (±3,8)	4,5 (±2,4)	3,6 (±1,4)	3,6 (±1,8)	2,3 (±0,7)	2,4 (±0,4)	2,6 (±0,8)
Alto Mg	1,9 (±0,6)	2,7 (±2,0)	4,1 (±1,3)	2,7 (±1,2)	1,8 (±0,8)	1,2 (±0,2)	1,1 (±0,7)	0,97 (±0,4)	1,16 (±0,7)
Microdureza da Matriz (HV)									
	BF	SOL	T6 155°C				T6 5h		
			2 h	5h	8h	12h	175°C	195°C	215°C
Baixo Mg	81,3 (±4,8)	80,33 (±2,1)	87,2 (±5,6)	108,4 (±5,3)	116,8 (±3,2)	112,4 (±2,6)	115,9 (±2,30)	113,8 (±3,9)	96,7 (±2,5)
Alto Mg	81,8 (±4,9)	94,8 (±3,3)	106,3 (±4,7)	114,9 (±4,0)	115,8 (±5,2)	119,9 (±7,4)	129,6 (±3,1)	125,2 (±4,5)	106,4 (±5,3)

Tabela 4. Resultados das propriedades mecânicas para a liga A356

Liga A356	Bruta de Fusão	Solubilizada	Envelhecida (115°C,5 h)
Limite de Escoamento (MPa)	99,05 (±7,2)	133,0 (±7,8)	201 (±7,7)
Limite de Resistência (MPa)	126,21(±10,05)	203,1 (±15,0)	245,3 (±21,7)
Alongamento (%)	2,20 (±0,6)	5,6 (±1,2)	3,09 (±1,7)
Microdureza (HV)	62,5 (±2,4)	84,5 (±2,1)	88,99 (±5,0)

3.1 Efeito do Tempo de Envelhecimento

Os resultados indicam uma tendência para o aumento da resistência da liga para maiores tempos de envelhecimento, havendo um grande incremento para tempos de até 8h de envelhecimento e uma estabilização nos valores de resistência para o tratamento usando um tempo maior (12 h), o gráfico da Figura 1 ilustra este comportamento.

Quanto ao teor de magnésio na liga, observam-se maiores valores de resistência para a liga com alto teor de magnésio ($\approx 0,50\%$ em peso) em todas as condições experimentais, no entanto os incrementos em função dos tratamentos térmicos seguem a mesma tendência para duas formulações da liga 356 em estudo. Foi observado um comportamento diferente para a liga com alto magnésio na condição solubilizada onde ocorreu um menor incremento na resistência e um grande desvio padrão entre os resultados, fato que pode estar relacionado com a presença de defeitos de fundição que levaram a redução das propriedades mecânicas em algumas das amostras referentes a esta condição experimental. Outra observação

importante foi a ocorrência de redução no limite de resistência na liga com alto magnésio para os tempos de 8 h e 12 h de envelhecimento, enquanto que o limite de escoamento continuou crescendo em função do tempo de envelhecimento, havendo uma aproximação muito grande entre os valores dos limites de resistência e de escoamento para o tempo de 12 h de envelhecimento, este comportamento sugere que para esta combinação de parâmetros existe uma condição favorável para a ocorrência do fenômeno de superenvelhecimento.

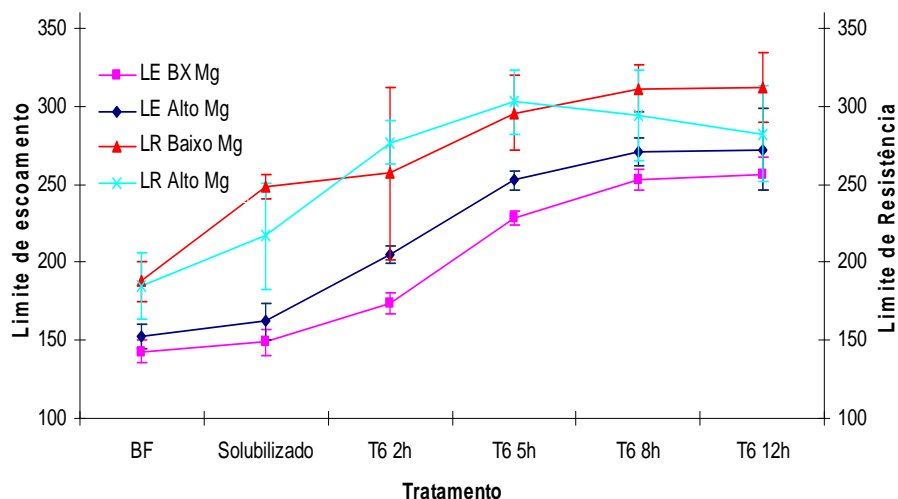


Figura 1. Limites de resistência e de escoamento para amostras brutas de fundição, solubilizadas e envelhecidas a 155^oC usando diferentes tempos.

A Figura 2 mostra as variações no alongamento e na microdureza para as condições bruta de fusão, solubilizada e envelhecidas usando diferentes tempos de envelhecimento.

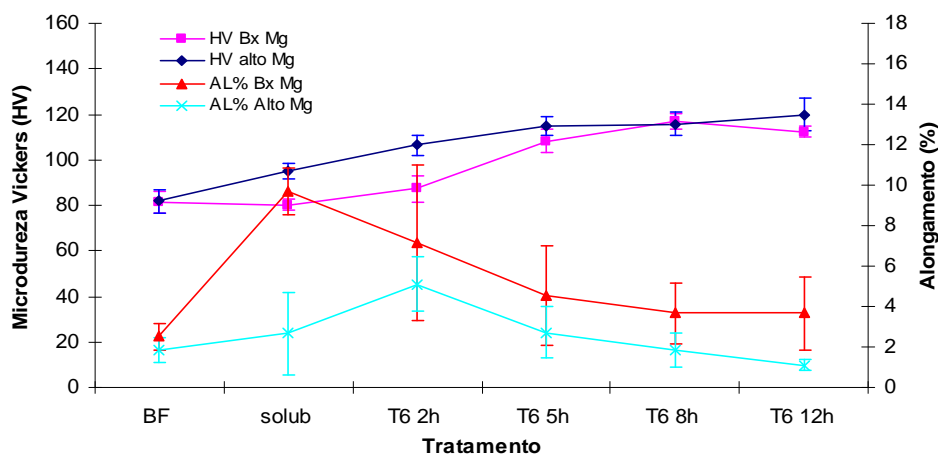


Figura 2. Valores de alongamento e microdureza para amostras brutas de fundição, solubilizadas e envelhecidas a 155^oC usando diferentes tempos.

Observa-se que o alongamento apresentou um incremento considerável com o tratamento de solubilização na liga com baixo Mg e um pequeno incremento na liga com alto Mg, este comportamento sugere que na liga com menor teor de Mg os efeitos dos mecanismos de coalescimento das partículas de Si foram mais efetivos

que o endurecimento por solubilização, observando-se uma inversão neste comportamento para a liga com maior teor de Mg. Os resultados da influência do coalescimento das partículas de Si sobre o comportamento mecânico destas ligas estão de acordo com resultados recentemente publicados.^(12,13) Para o tratamento de envelhecimento a ductilidade diminuiu com o acréscimo no tempo de tratamento. Os valores de microdureza apresentaram um comportamento semelhante aos observados para os limites de resistência e de escoamento, a combinação destes comportamentos evidencia o efeito do tempo na cinética de endurecimento por precipitação da liga 356.

3.2 Efeito da Temperatura de Envelhecimento

O acréscimo na temperatura de envelhecimento até 195°C resultou em incrementos nos valores dos limites de resistência e de escoamento nas ligas em estudo envelhecidas durante 5 h (Figura 3).

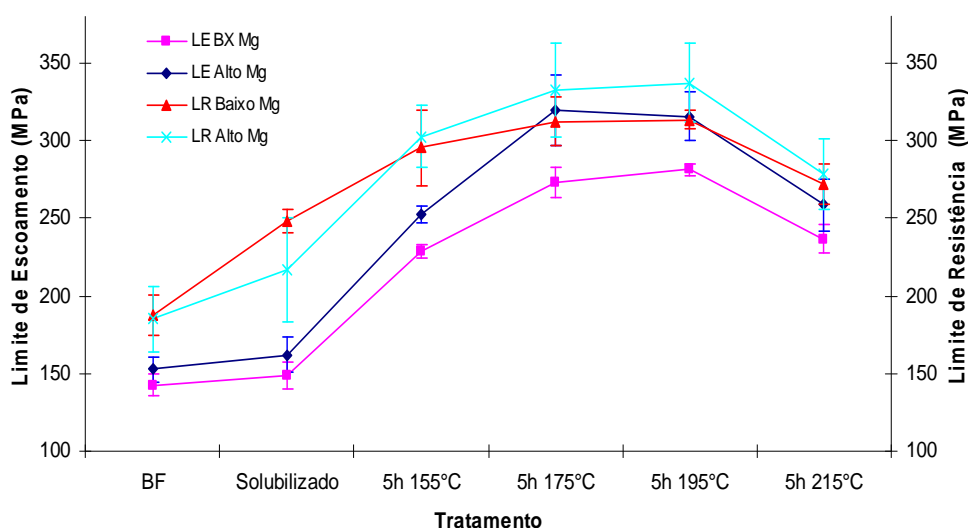


Figura 3. Limites de resistência e de escoamento para amostras brutas de fundição, solubilizadas e envelhecidas 5 h usando diferentes temperaturas.

Na comparação com os valores obtidos usando 155°C, foram observados grandes incrementos nos valores de resistência nas amostras tratadas a 175°C, tendendo para estabilização a 195°C e uma redução considerável nestes valores para o tratamento a 215°C. As amostras tratadas por 5 horas a 155°C apresentaram valores limite de escoamento de 228 Mpa e 252 Mpa, respectivamente para as versões baixo e alto e magnésio, e valores de resistência máxima de 295 Mpa e 302 MPa, respectivamente. Quando foram tratados a 175°C estes valores aumentaram para 273 Mpa e 319 Mpa para o limite de escoamento e 312 Mpa e 332 Mpa para o limite de resistência. Os maiores valores encontrados sugerem um aumento na cinética de endurecimento por precipitação com o acréscimo na temperatura de envelhecimento nesta faixa de temperaturas. Para a temperatura de 215°C os valores de resistência foram menores, indicando que temperaturas excessivas podem causar o fenômeno de superenvelhecimento, com a conseqüente redução na resistência mecânica da liga.

Os valores de microdureza Vickers mostram o mesmo comportamento em função da variação de temperatura, reforçando a idéia do incremento do endurecimento por precipitação para maiores tempos de envelhecimento. Os valores de microdureza Vickers e alongamento para as condições bruta de fundição, solubilizada e envelhecidas durante 5 h usando diferentes temperaturas são apresentados na Figura 4. De uma forma geral, o aumento na temperatura de envelhecimento das amostras resultou em reduções nos valores de alongamento e incrementos nos valores de microdureza Vickers. Uma redução na microdureza foi observada nas amostras tratadas a 12 horas com baixo teor de magnésio, sugerindo a ocorrência do fenômeno de superenvelhecimento.

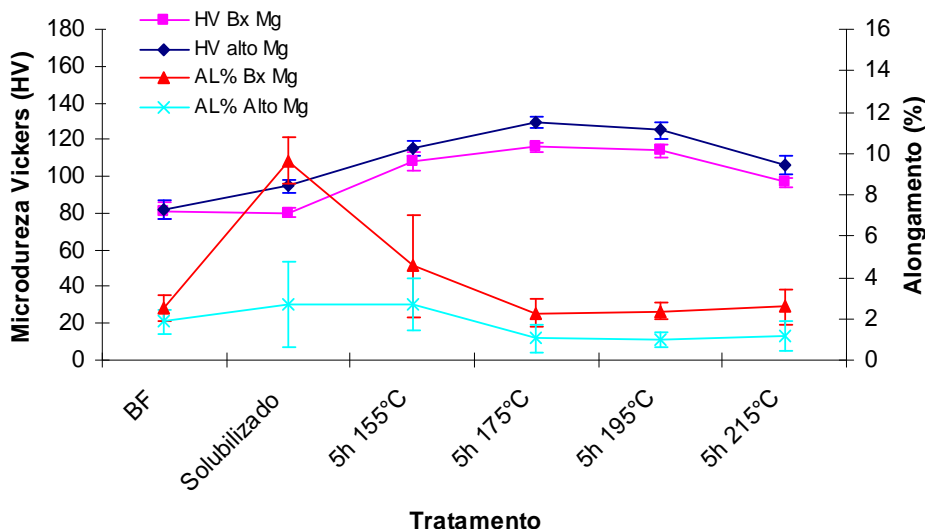


Figura 4. Valores de alongamento e microdureza para amostras brutas de fundição, solubilizadas e envelhecidas durante 5h a diferentes temperaturas.

O ASM Metals Handbook⁽¹⁴⁾ sugere que para um tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento artificial valores de limite de escoamento de 185 MPa, alongamento de 5% e limite de resistência de 262 Mpa para a liga em estudo. As condições nas quais e os valores destas propriedades mais se assemelham a esta indicação ocorreram nas amostras tratadas a 155°C durante 5 horas para a liga com baixo teor de magnésio e nas amostras tratadas a 155°C durante 2 horas para a liga com alto teor de magnésio, neste trabalho foram alcançados maiores valores de resistência mecânica para algumas das condições experimentais investigadas. Os resultados mostraram que para as ligas em estudo os melhores valores de resistência podem ser obtidas para tratamentos de envelhecimento a 155°C durante 8 h ou a 175°C durante 5 h, evidenciando as influências das combinações ótimas de temperatura e tempo de envelhecimento sobre o desempenho mecânico destas ligas.

3.3 Influência da Composição Química

Os gráficos das figuras 5 e 6 apresentam uma comparação entre os valores de resistência e microdureza obtidos para as ligas A356 e 356 baixo e alto Mg nas condições bruto de fundição, solubilizada e envelhecida usando os mesmos parâmetros de tratamento. Os resultados indicam a influência das variações nos percentuais de Mg e da maior quantidade de impurezas (Fe, Mn, Cu) na liga 356 sobre as propriedades mecânicas desta liga.

Observa-se que o incremento no limite de escoamento foi muito semelhante para as diferentes composições químicas investigadas e que a liga 356 com alto Mg apresentou maior resistência em todas as condições experimentais.

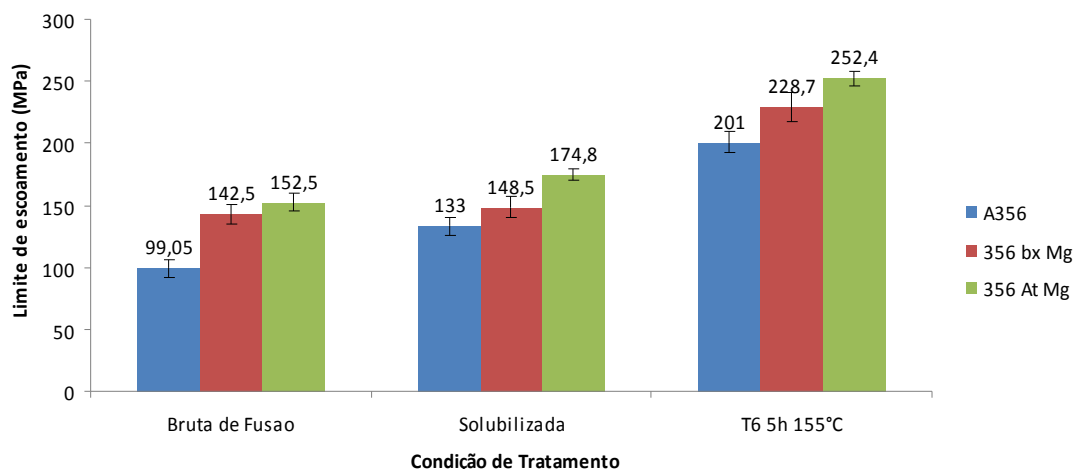


Figura 5. Variações no limite de escoamento nas ligas 356 e A356 para diferentes condições experimentais.

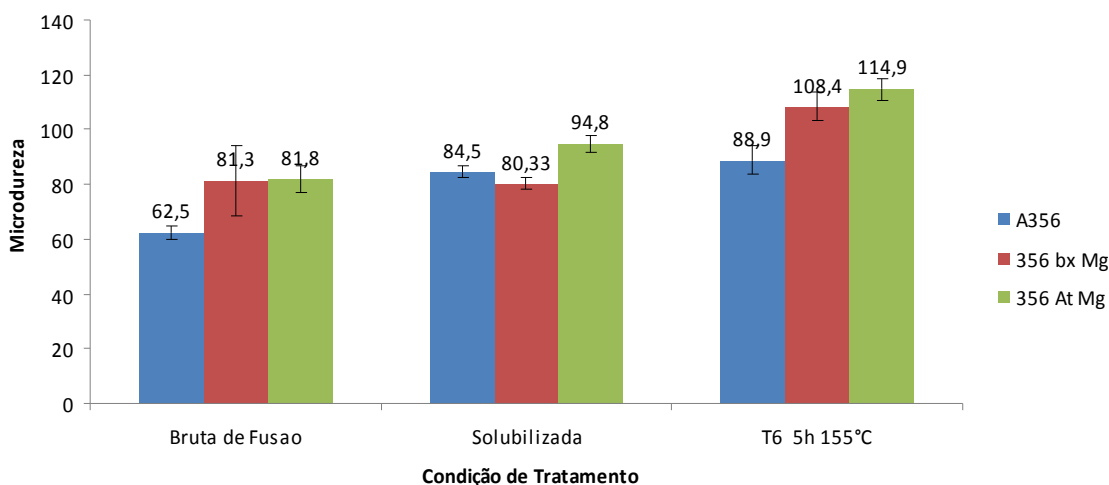


Figura 6. Variações na microdureza nas ligas 356 e A356 para diferentes condições experimentais.

Os resultados de microdureza confirmam o efeito do tratamento T6 no endurecimento por precipitação destas ligas, os incrementos na microdureza foram semelhantes para as três ligas investigadas.

Os maiores valores de resistência da liga 356 em comparação com a A356 estão relacionados com os maiores percentuais de elementos tipo Cu, Zn e Fe que formam intermetálicos que aumentam a resistência das ligas 356. Observações experimentais feitas por Ronsani⁽¹⁵⁾ usando MEV e análises por micro-sonda demonstraram a presença de intermetálicos de Fe e de Cu em amostras da liga 356. Análises da fratura de amostras da liga 356 nas condições bruta de fundição e tratadas térmicamente mostram alteração significativa no comportamento da fratura, observando-se a ocorrência de fatura frágil na liga bruta de fundição e de fratura mista (dúctil-frágil) nas amostras solubilizadas e envelhecidas.

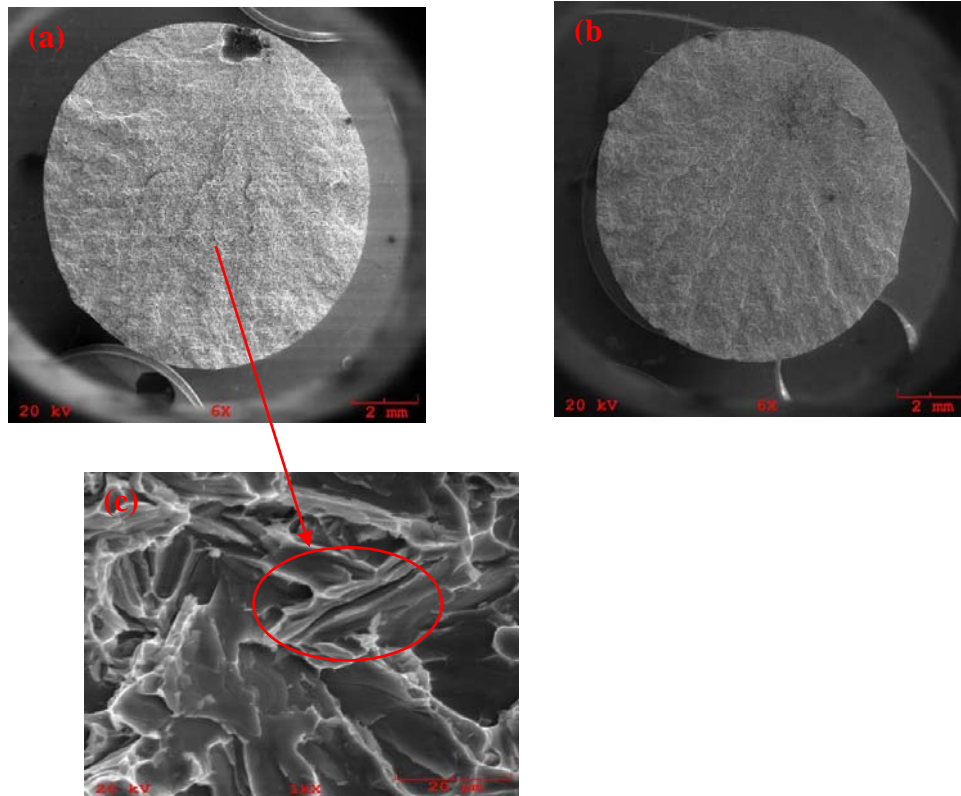


Figura 7. Fractografias da liga 356 bruta de fundição (a) com baixo Mg; (b) com alto Mg; e (c) observação por MEV da amostra bruta de fusão com baixo Mg.

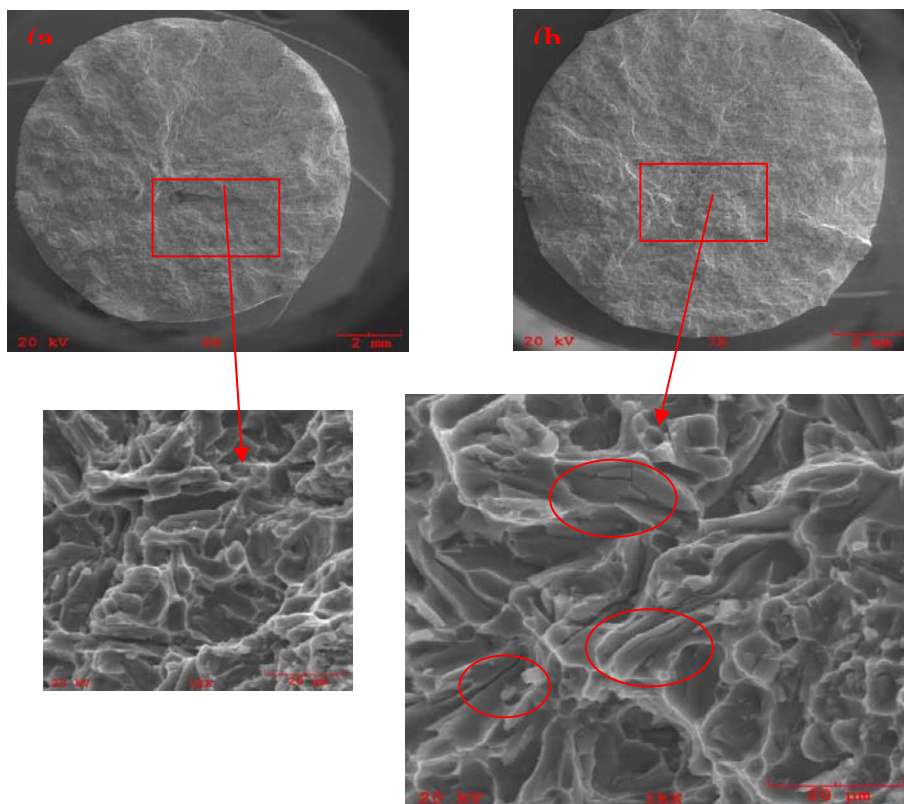


Figura 8. Fractografias da liga 356 baixo Mg envelhecida 5 horas a 155°C (a); e 356 alto Mg envelhecida 2 horas a 155°C (b).

Fractografias das amostras brutas de fusão da liga 356 com alto e baixo Mg mostraram que para a condição bruta de fusão, independente do teor de magnésio, a fratura se deu de forma frágil ao longo das partículas de silício, observando – se que a propagação da trinca se inicia em regiões com presença de defeitos, onde se tem uma maior concentração de tensões. Este mecanismo pode ser evidenciado pelas marcas de sargento apontando para a região de início de propagação da trinca e também pela presença de degraus. As trincas se propagam ao longo das partículas de silício como evidenciado no aumento na Figura 7c.

Observações das amostras envelhecidas (Figura 8) mostram que a fratura ocorre de forma dúctil na matriz e frágil nas partículas de eutético de silício. Nas amostras tratadas por duas horas (Figura 8b) ainda pode – se perceber a presença de várias trincas ao longo das partículas de silício evidenciadas pelos círculos vermelhos. Este mecanismo pode ser explicado, pois a matriz se deforma formando alvéolos e tensionando o Si, o que gera trincas no Si e deslocamento da interface matriz – partícula de Si.⁽¹³⁾

4 CONCLUSÕES

Os melhores valores de resistência ocorreram para tratamentos de envelhecimento a 155°C durante 8 h ou a 175°C durante 5 h, evidenciando as influências das combinações ótimas de temperatura e tempo de envelhecimento sobre o desempenho mecânico destas ligas.

As propriedades mecânicas apresentaram alterações significativas em função das variações no tempo e na temperatura, bem como com no teor de Mg, sendo que para maiores tempos e temperaturas de tratamento térmico os valores indicam a possível ocorrência do fenômeno de superenvelhecimento. Maiores percentuais de Mg resultaram em maiores valores de resistência em todas as condições experimentais investigadas.

Comparando as ligas 356 e A356 verificou – se que a liga 356 apresentou propriedades mecânicas superiores, o que se deve a presença de elementos endurecedores como o Cu, Fe e Mn em maiores concentrações.

As fractografias indicaram predominância de fratura frágil para as amostras brutas de fundição, evidenciadas pelas marcas de sargento apontando para a direção do início de propagação da trinca. Nas amostras tratadas, a fratura se deu de forma predominantemente dúctil, evidenciada pelo formato taça e cone.

REFERÊNCIAS

- 1 SHENEFELT, J.; GAYLES, S.; LUCK, R.; BERRY, J.T.; ANDRIANO, R. Effects of Applied Pressure During Feeding on Fatigue Properties of Critical Cast Aluminum Alloy Components. **AFS Transactions**, v. 124, p. 1-12, 2001.
- 2 ASM Metals Handbook: Properties and Selection Nonferrous Alloys, v.2, 1992.
- 3 HEIBERG, G.; NOGITA, K.; RAANES, M.; DONS, A.L.; DAHLE, A.K.; ARNBERG, L. Effect of magnesium, iron and copper on eutetic solidification of hypoeutectic aluminum-silicon alloys. **AFS Transaction**, v. 088, p. 1-12, 2002.
- 4 ASM, Casting Metals Handbook, v.15, 1992.
- 5 SAMUEL, A.M.; SAMUEL, F.H.; DOTY, H.W.; VALTIERRA, S. Effect of Iron and Cooling Rate on Tensile Properties of B319.2 in Non-modified and Sr-modified Conditions. **AFS Transactions**, 2004.V.007, p.1-10.

- 6 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. **Metalurgical and Materials Transactions A**. 1999.V.30A, p.2611-2618.
- 7 PURDON, L.; MAJOR, J.F.; T5 Aging Response of A356/357 Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys Under Conditions of Varying Quench Rate from the Mould. **AFS Transactions**, v. **089**, p. **1-11**, 2004
- 8 CHO, J.; LOPER JR, C.R.; YAN, X. Microsegregation Effect of Copper in Aluminum-Silicon Casting Alloys. **AFS Transaction**, v. **087**, p. **1-14**, 2004.
- 9 CHO, J.; YAN, X.; LOPER JR, C.R. Microsegregation of Cooper in Cast Aluminum Alloys. **AFS Transaction**, v. **124**, p. **1-17**, 2003.
- 10 OUELLET, P.; SAMUEL, F. H. Effect of Mg on the ageing behavior of Al-Si-Cu 319 type aluminum casting alloys. **Journal of Materials Science**, v. **34**, p. **4671-4697**, 1999.
- 11 HERNÁNDEZ-PAZ, J.F.; PARAY, F.; GRUZLESKI, J.E. Natural Aging and Heat Treatment of A356 Aluminum Alloy, **AFS Transaction**, v. **009**, p. **1-10**, 2004.
- 12 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.
- 13 [13] 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, **64º Congresso Anual da ABM**, 2009, Belo Horizonte/MG/Brasil.
- 14 ASM Metals Handbook, Heat Treating. v. 4, 1991.
- 15 RONSANI, G. S. Tratamento de Envelhecimento Artificial das Ligas 356 e A356: Efeitos da Adição de Magnésio, do Tempo e da Temperatura nas Propriedades Mecânicas. 97 páginas. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS) – PGCEM/UEDESC, Joinville, 2010.