

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FADIGA ROTATIVA DA LIGA A356*

Tatiane Haske¹
Guilherme Ourique Verrari²
Renato Barbieri³
Guilherme Di Bernardi Corrêa⁴

Resumo

A utilização de ligas Al-Si tem se expandido industrialmente principalmente no setor automobilístico. Cabeçotes, blocos de motor, rodas entre outros são exemplos de componentes produzidos com essas ligas. Estes componentes normalmente estão sujeitos a carregamento cíclico. O objetivo desse trabalho foi estudar o comportamento da liga A356 utilizando corpos de provas submetidos à fadiga por flexão rotativa nas condições brutas de fundição e tratadas termicamente por T6. Corpos de prova para ensaios de tração e de fadiga foram obtidos por fundição por gravidade em coquilhas. A comparação dos resultados foi realizada com os resultados do limite de resistência, do limite de escoamento, do alongamento e das curvas S-N. Adicionalmente análises fractográficas foram realizadas para verificar o comportamento de fratura. A liga tratada termicamente apresentou melhores resultados no ensaio de tração e de fadiga na faixa de $10^3 < N < 10^7$.

Palavras-chave: Fadiga; Flexão rotativa; Ligas de alumínio fundidas; Tratamentos térmicos.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES AND ROTATING FATIGUE OF A356 ALLOY

Abstract

The use of Al-Si alloys has expended industrially mainly in the automotive sector. Cylinder heads, engine blocks, wheels and others are examples of components produced for these alloys. These components are usually subjected to cyclic loading. The objective of this work was to study A356 alloy behavior using test samples submitted to fatigue rotating bending in as cast condition and T6 heat treatment. Specimens for tensile and fatigue test were obtained by gravity casting in permanent molds. Comparison of the results was performed using the results of the tensile strength, the yield strength, the elongation and the S-N curves. Additionally fractographics analyzes were performed to verify the fracture behavior. The alloy heat treatment showed better results in the tensile test and fatigue in the range of $10^3 < N < 10^7$.

Keywords: Fatigue; Rotating bending; Cast aluminium alloys; Heat treatment.

¹ Engenheira Mecânica, Mestre Engenharia de Materiais, Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia Mecânica, UDESC, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Doutor Engenharia Metalúrgica, Professor do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia Mecânica, UDESC, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor Engenharia Mecânica, Professor do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia Mecânica, UDESC, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

⁴ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Bolsista de Iniciação Científica da UDESC, Departamento de Engenharia Mecânica, UDESC, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de ligas da série Al-Si como a liga A356 vem se expandindo no mercado e principalmente na indústria automobilística em função das suas excelentes características de fundição, boa resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas após tratamento térmico e por reduzir o peso dos componentes [1-4]. Algumas aplicações dessas ligas estão em cabeçotes, blocos de motor, rodas, transmissores, estrutura de aeronave, peças e bomba de aeronave, acessórios e peças de controle de aeronave e em instalações de energia nuclear [5]. De fato essas ligas são expostas a carregamentos cíclicos na maioria dessas aplicações e por isso é fundamental um melhor conhecimento do seu comportamento em fadiga como um importante parâmetro de projeto.

Muitas pesquisas foram realizadas para verificar o comportamento dessas ligas tratada termicamente por T6 submetidas à tração cíclica [6-14], como também, muitos estudos foram encontrados relacionados à fadiga térmica [15-19] e a propagação de trinca por fadiga [20-22]. Entretanto, poucos são os resultados disponíveis na literatura com relação à flexão rotativa para este tipo de material [23]. O principal objetivo desse trabalho foi estudar o comportamento em fadiga rotativa para corpos de prova obtidos a partir da liga A356 nas condições bruta de fundição e tratada termicamente por T6.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga A356 utilizada neste trabalho apresenta a composição química mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da liga A356 estudada

	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Sr	Al
Composição	7,21		0,0065	0,307	0,049			
(% peso)	-	0,109	-	-	-	0,101	0,0002	Bal.
	7,41		0,0066	0,309	0,0065			

Amostras para ensaio de tração e de fadiga foram obtidas através do processo de fundição por gravidade da liga. Tratamento de desgaseificação com rotor e nitrogênio foi realizado no banho fundido para garantir a sanidade das amostras. Tanto a liga como os fundidos foram produzidos pela empresa Wetzell S.A – Divisão Alumínio.

As geometrias dos corpos de prova utilizadas neste trabalho estão ilustradas nas Figuras 1 e 2. Os corpos de prova de tração seguem as recomendações da norma JISG - 567 e os corpos de prova para fadiga estão de acordo com a norma ASTM E466 - 07. Ainda, o acabamento superficial para os corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga foi obtido utilizando lixas com granulometria de 600 e 1200 mesh, com o objetivo de limitar o valor da rugosidade superficial em $Ra < 0,3\mu\text{m}$.

As amostras para ensaio de tração e de fadiga foram analisadas nas condições brutas de fundição e tratadas termicamente por T6. O tratamento térmico T6 incluiu solubilização a 540°C por 6 h, rápido resfriamento em água a temperatura ambiente e envelhecimento artificial a 155°C por 5 h. A escolha das condições do tratamento térmico foram baseadas nos melhores resultados descritos em [24-25] e todos os ensaios foram realizados com temperatura ambiente.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Universal de Ensaio Mecânico (marca Shimadzu) com velocidade de aplicação da carga igual a 5mm/min. Quatro corpos de prova para cada condição foram utilizados para obter os valores médios do limite máximo de resistência, do limite de escoamento e do alongamento. Os valores para a tensão de escoamento foram obtidos utilizando o limite de 0,2% para a deformação axial.

Os testes de fadiga foram realizados em uma máquina de flexão rotativa com uma frequência de 60 Hz e com $R=-1$ (razão entre a tensão mínima e máxima). Análises da superfície de fratura das amostras de fadiga foram realizadas utilizando microscópio eletrônico de varredura de alta resolução (FEG).

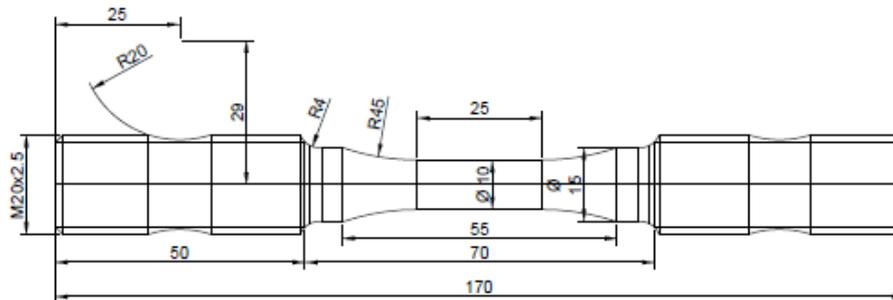


Figura 1. Desenho do corpo de prova para ensaio de tração.

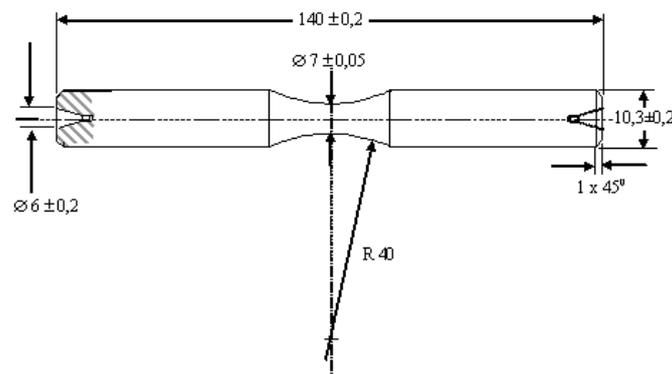


Figura 2. Desenho do corpo de prova para ensaio de fadiga.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios obtidos no ensaio de tração estão apresentados na Tabela 2. Os valores inferiores obtidos com a liga bruta estão diretamente relacionados com a microestrutura do material. Na liga bruta de fundição as partículas de Si se apresentam na forma de placas finas e pontiagudas que fragilizam o material. Na liga tratada por T6 as partículas de Si se apresentam coalescidas e esferoidizadas e isto é um dos fatores que propicia o aumento de ductilidade a liga. O valor maior para o limite de escoamento obtido com a liga tratada termicamente é devido aos pequenos e finos precipitados de Mg_2Si que se formam dispersos na matriz em decorrência do tratamento de envelhecimento artificial durante o T6. O aumento no

limite de resistência é atribuído a estes dois fatores, conforme mencionado em trabalhos anteriores [24-25].

Tabela 2. Valores Médios obtidos no Ensaio de Tração.

Condição	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Bruta	194,154	129,585	5,436
T6	326,630	261,092	7,590

Na Figura 3 estão mostrados os valores obtidos experimentalmente e as curvas ajustadas com lei de potencial. Nota-se no diagrama S-N, Fig. 3, que os resultados obtidos com a liga tratada por T6 são muito melhores do que os resultados obtidos para a liga bruta na região de baixos ciclos. É um comportamento esperado porque o limite de resistência mecânica da liga tratada é muito maior do que o limite de resistência mecânica da liga bruta. Nesta região de baixos ciclos o fenômeno da fadiga é controlado pelas deformações plásticas [26].

As expressões matemáticas para as curvas ajustadas com o Método dos Mínimos Quadrados estão apresentadas pela Equação 1 para liga tratada e pela Equação 2 para liga bruta de fundição:

$$S = 1220,6 \times N^{-0.155} \quad \forall 10^3 \leq N \leq 10^7 \quad (1)$$

$$S = 443,1 \times N^{-0.096} \quad \forall 10^3 \leq N \leq 10^7 \quad (2)$$

onde se nota que a taxa de decréscimo do limite de fadiga para a liga tratada por T6 (-0.155) é superior ao da liga bruta (-0.096). A fadiga na região denominada de VHCF (very high cycle fatigue, $N > 10^7$ ciclos) não foi estudada neste trabalho. Entretanto, se observa que na região próxima de $N = 10^7$ ciclos os resultados para as duas condições da liga estão próximos.

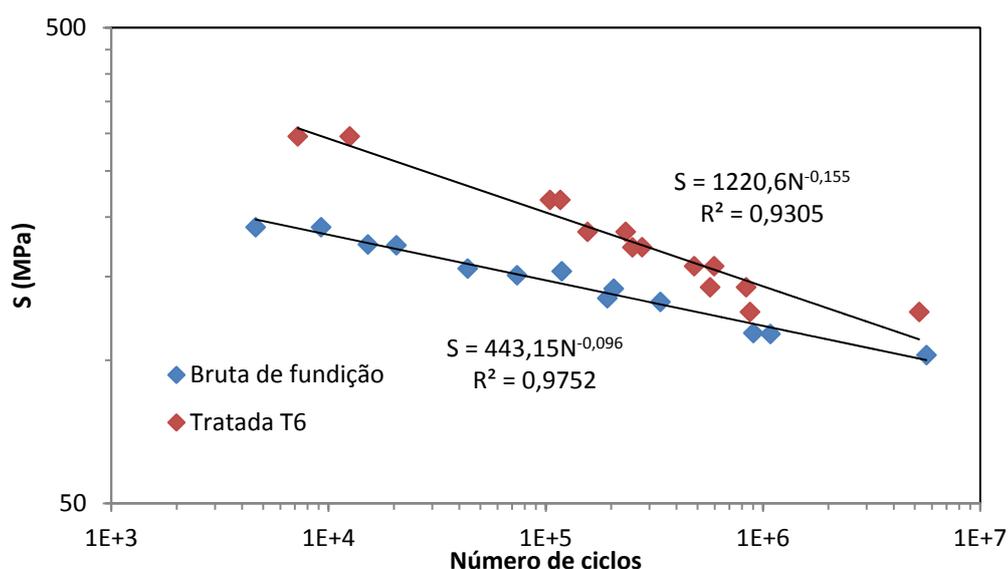


Figura 3. Curvas S-N da liga A356.

A figura 4 mostra as superfícies de fratura das amostras de fadiga para condição bruta de fundição e tratadas termicamente por T6. Na bruta de fundição, Figuras (a) e (c), a superfície de fratura final é maior e tem a característica de fratura frágil, e ainda, é evidenciado que na condição de baixo ciclo (Figura a) essa região de fratura final é maior que na amostra submetida a alto ciclo (Figura c) mostrando que fraturou mais rapidamente. A liga tratada apresentou uma superfície de fratura mais dúctil (figura b) e uma região de propagação de falha maior na condição de alto ciclo (figura d).

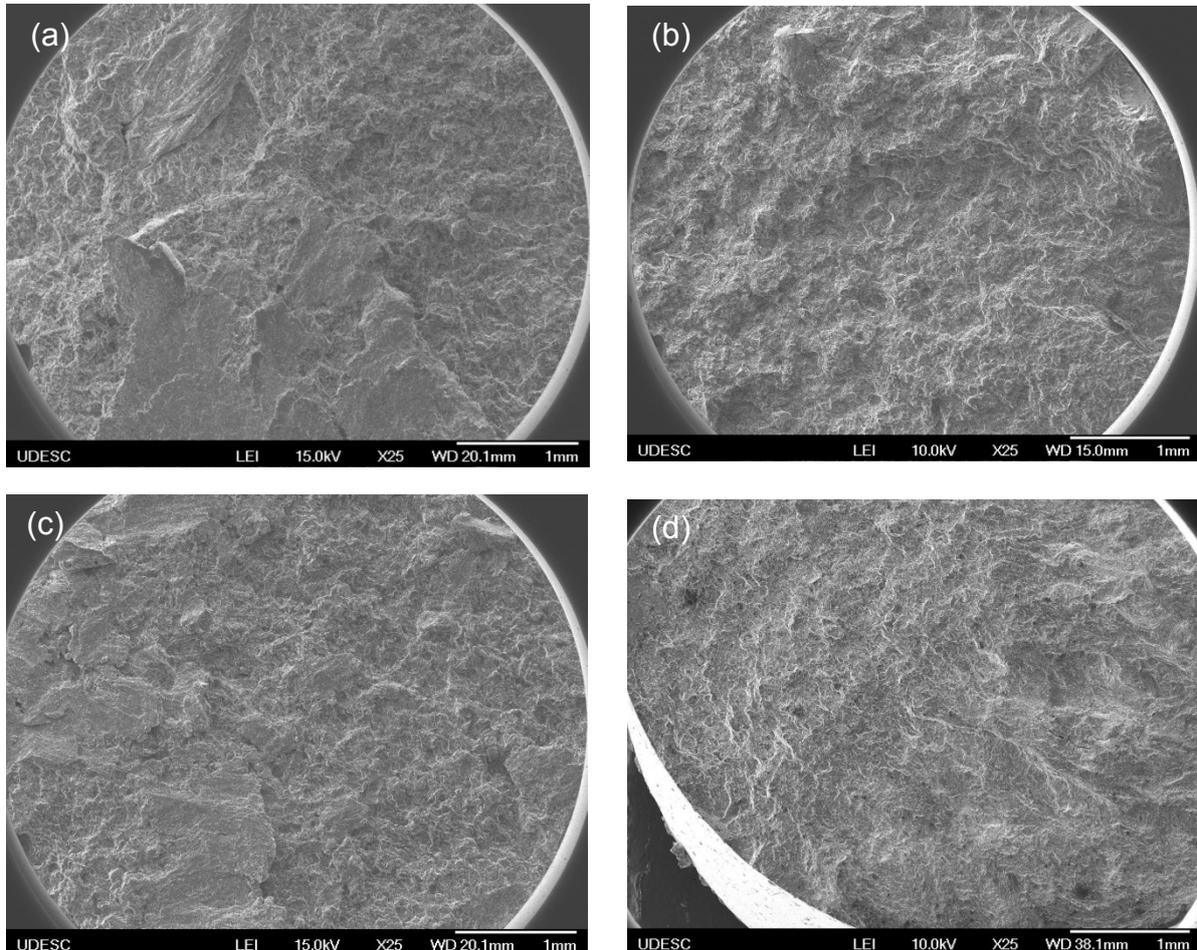


Figura 4. Superfícies de fratura de amostras brutas (a e c) e tratadas por T6 (b e d) nas condições de baixo ciclo (a) 9232 ciclos e (b) 12503ciclos, e alto ciclo (c) 5653109ciclos e (d) 5234888ciclos.

4 CONCLUSÃO

Para a faixa de $10^3 < N < 10^7$ a liga tratada termicamente por T6 apresentou melhores resultados do que a liga bruta. Esta melhoria nas propriedades mecânica e da vida em fadiga é decorrência das alterações microestruturais provocadas pelo tratamento. Entretanto, verificou-se que a taxa de decréscimo do limite de fadiga em função do número de ciclos de carga é muito maior para a liga tratada. A superfície de fratura na liga bruta de fundição apresentou um aspecto frágil enquanto que na tratada termicamente um aspecto dúctil. Em ambas as condições da liga estudada foram observadas uma região de propagação de trincas maior em fadiga de alto ciclo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Wetzel S.A pelo fornecimento da liga e a produção das amostras para a realização desse trabalho, e a Universidade do Estado de Santa Catarina por disponibilizar os equipamentos necessários para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- 1 Hernández-Paz JF, Paray F, Gruzleski JE. Natural aging and heat treatment of A356 aluminium alloy, AFS Transaction, 2004; 04-009(02):1-10.
- 2 Chaudhury SK, Apelin D. Effect of solution heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg (354) Alloy Using a fluidized bed reactor. AFS Transaction. 2005; 05-071(02):1-14.
- 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. 1990; 8(1): 63-70.
- 4 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 Transaction A. 2001; 32A: 525-532.
- 5 ASM. Heat Treating. Metals HandBook.2004;4.
- 6 Pio LY, Effect of T6 heat treatment on the mechanical properties of gravity die cast A356 aluminium alloy. Journal of Applied Sciences. 2011; 11: 2048-2052.
- 7 Song JY, Park JC, Jeong BH, Ahn YS. Fatigue behavior of A356 aluminium alloy for automotive wheels. International Journal of Cast Metals Research. 2012; 25(01): 26-30.
- 8 Elhadari HA, Patel HA, Chen DL, Kasprzak W. Tensile and fatigue properties of a cast aluminium alloy with Ti, Zr e V additions. Material Science and Engineering A. 2011; 528: 8128-8138.
- 9 Mousheng S, Maowu R. Microstructures and Properties of low cycle fatigue of electrolytic A356 alloys. Materials Characterization. 2011; 62: 367-372.
- 10 Dietrich L, Radziejewska J. The fatigue damage development in a cast Al-Si-Cu Alloy. Material and Design. 2011; 32: 322-329.
- 11 Jiang XS, He GQ, Liu B, Fan SJZ, M H. Microstructure-based analysis of fatigue behavior of Al-Si-Mg alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011; 21: 443-448.
- 12 Toda H, Masuda S, Batres R, Kobayashi M, Aoyama S, Onodera M, et al. Statistical assessment of fatigue crack initiation from sub-surface hydrogen micropores in high-quality die-cast aluminum. Acta Materialia. 2011; 59:4990-4998.
- 13 Takahashi T, Sasaki K. Low cycle thermal fatigue of aluminum alloy cylinder head in consideration of changing metrology microstructure. Procedia Engineering. 2010; 2:767-776.
- 14 Li W, Chen ZH, Chen D, Teng, J. Understanding the influence of particle size on strain versus fatigue life, and fracture behavior of aluminum alloy composites produced by spray deposition. Journal Material Sciences. 2010; 46: 1153-1160.
- 15 Nicoletto G, Riva E. Elevated temperature fatigue behavior of cast aluminum alloys used for I.C engine part production. Metallurgia Italiana. 2011; 103(3): 41-48.
- 16 Koeberl H, Winter G, Eichseder W. Lifetime calculation of thermomechanically loaded materials (Al, Cu, Ni and Fe alloys) based on empirical methods. Journal of ASTM International. 2010; 8(1).
- 17 Tabibian S, Charkaluk E, Constantinescu A, Szymtka F, Oudin A, TMF criteria for lost foam casting aluminum alloys. Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures. 2012. 36: 349-360.

- 18 Moridi A, Azadi M, Farrahi GH. Coating thickness and roughness effect on stress distribution of A356.0 under termo-mechanical loadings. *Procedia Engineering*. 2011; 10:1372-1377.
- 19 Azadi M, Shirazabad, MM. Heat treatment effect on termo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy. *Materials and Design*. 2013; 45: 279-285.
- 20 Lados DA, Apelian D. Relationships between microstructure and fatigue crack propagation paths in Al-Si-Mg cast alloys. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008; 75: 821-832.
- 21 Lados DA, Apelian D, Wang, L. Minimization of residual stress in heat-treated Al-Si-Mg cast alloys using uphill quenching: Mechanisms and effects on static and dynamics properties. *Materials Science and Engineering A*. 2010; 527: 3159-3165.
- 22 Li W, Chen ZH, Chen D, Teng J. Growth behavior of fatigue crack in spray-formed SiCp/Al7Si composite,. *Metallurgica Sinica*. 2011; 47(1):102-108.
- 23 Ceschini L, Boromei I, Morri A, Seifeddine S, Svensson IL. Effect of Fe content and microstructural features on the tensile and fatigue properties of the AL-Si10Cu2 alloy. *Materials and Design*. 2012; 36: 522-528.
- 24 Haskel T, Verran GO. Tratamento de solubilização da liga A356: Efeitos do tempo e da temperatura. 65ºABM International Congress. 2010. v único.
- 25 Ronsani GS, Verran GO, Vilella, VMC, Vogel WF. Envelhecimento artificial das ligas 356 e A356: efeitos da composição química e dos parâmetros de processamento. 12º Seminário de Metais Não Ferrosos da ABM. 2011; v. único: 132-142.
- 26 Mattos JJI. Propriedades de fadiga e micromecanismos de fratura da liga de alumínio-silício AlSi7Mg0,6 utilizada em cabeçote de motor diesel. Dissertação de mestrado profissional em engenharia automotiva. UNICAMP/SP. 2009.