

VIDA EM FADIGA DE DUAS LIGAS FUNDIDAS DE ALUMÍNIO USADAS NA FABRICAÇÃO DE RODAS AUTOMOTIVAS¹

Rodrigo Magnabosco²
Renata Cardoso Lopes³
Ricardo Colalillo⁴

Resumo

O presente trabalho teve o objetivo de comparar o comportamento a fadiga de duas ligas de alumínio fundidas, a A356.0 e a A413.0, usadas na fabricação de rodas automotivas. Os corpos-de-prova foram retirados das aletas de rodas fundidas em corridas de produção usuais, apresentando 45 mm de comprimento útil e 6 mm de diâmetro útil. Para a determinação das características mecânicas dos materiais foram realizados ensaios de tração segundo a ASTM E8M-04. Os ensaios de fadiga foram realizados nos corpos-de-prova polidos, controlando-se a amplitude de deformação e mantendo-se a deformação média nula, obtendo assim as curvas deformação-vida para as duas ligas. Os ensaios de tração mostraram que a liga A356.0 apresenta valores de rigidez, tenacidade e resistência maiores do que a liga A413.0. Nos ensaios de fadiga em amplitudes de deformação que geram vida entre 5000 e 8×10^6 ciclos, a liga A356.0 (que apresenta endurecimento cíclico) mostra vida em fadiga maior que a liga A413.0 (que apresenta comportamento misto, inicialmente endurecendo ciclicamente). Na análise de vida em fadiga por amplitude de tensões, a vida em fadiga da liga A356.0 é superior se a amplitude de tensões aplicada for superior a 62 MPa.

Palavras-chave: Vida em fadiga; Ligas de alumínio; A356.0; A413.0.

¹ Apresentado no 60° Congresso Anual da ABM – Internacional – Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.

² Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrmag@fei.edu.br

³ Aluna do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, fei_relopes@yahoo.com.br.

⁴ Mestre, Engenheiro mecânico, rcolalillo@uol.com.br

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve o objetivo de comparar o comportamento a fadiga de duas ligas de alumínio fundidas, a A356.0 e a A413.0, usadas na fabricação de rodas automotivas pela empresa Italspeed Automotive Ltda. A empresa forneceu corpos-de-prova retirados das aletas de rodas fundidas em corridas de produção usuais, caracterizando os produtos típicos por esta produzidos. A seguir encontra-se breve revisão de literatura sobre os temas que serão discutidos.

Ligas Al-Si-Mg. Dentre as ligas de alumínio, as utilizadas em peças fundidas tem como base o sistema binário Al-Si. As ligas Al-Si formam o grupo de ligas 4xx.x da *Aluminum Association*, onde os caracteres x indicam ligas específicas, com variados teores de Si e graus de pureza, e são as mais utilizadas devido à alta resistência a corrosão, alta resistência mecânica específica (relação entre resistência e densidade) e boa ductilidade. Apresentam facilidade de fundição, tanto em moldes de areia quanto em moldes permanentes. As ligas Al-Si-Mg, do grupo 3xx.x, podem ter maior resistência mecânica que as ligas contendo apenas Si por permitirem endurecimento por precipitação de partículas finamente dispersas de fase Mg_2Si , obtidas após tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. As têmperas mais comuns aplicadas a estas ligas são as T6 e T7, combinando os maiores valores de resistência mecânica e à corrosão.^[1]

A microestrutura típica de liga do grupo 4xx.x apresenta células dendríticas e microestrutura interdendrítica formada pelas fases (Al) e (Si), além das fases Fe_3SiAl_{12} e $Fe_2Si_2Al_9$. Ligas do grupo 3xx.x (Al-7%Si-0,3%Mg) também apresentam células dendríticas e microestrutura interdendrítica formada pelas fases (Al) e (Si), além das fases Mg_2Si , $Fe_2Si_2Al_9$ e $FeMg_3Si_6Al_8$. Quando modificadas pela adição de sódio no banho líquido (aproximadamente 0,05%Na), apresentam partículas arredondadas de fase (Si), o que eleva a tenacidade e ductilidade destas ligas, e $Fe_2Si_2Al_9$ em lâminas.^[2]

Defeitos comuns em produtos fundidos destas ligas são inclusões de óxido de alumínio, porosidade interdendrítica e porosidade devido a hidrogênio retido no banho líquido (esta última, de forma arredondada). Estes defeitos levam a redução de tenacidade, ductilidade e vida em fadiga destas ligas, uma vez que são concentradores de tensão nas estruturas.

A literatura^[3,4] pouco comenta sobre o comportamento a fadiga das ligas em estudo neste trabalho, uma vez que estes são dependentes das microestruturas obtidas no processamento. Isto justifica o estudo aqui apresentado, utilizando corpos-de-prova retirados das aletas de rodas fundidas em corridas de produção usuais.

Comportamento mecânico monotônico e cíclico. Quando um metal é carregado monotonicamente podem ocorrer basicamente deformações do tipo elástica e plástica. Sendo assim, é possível caracterizar o comportamento monotônico a tração de um material metálico utilizando a relação de *Ramberg-Osgood*, mostrada na Eq. (1)^[5]:

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_e + \tilde{\varepsilon}_p = \frac{\tilde{\sigma}}{E} + \left(\frac{\tilde{\sigma}}{H} \right)^{1/n} \quad (1)$$

onde $\tilde{\varepsilon}$ é a deformação real total imposta, $\tilde{\varepsilon}_e$ e $\tilde{\varepsilon}_p$ são respectivamente as parcelas elástica e plástica da deformação real total, $\tilde{\sigma}$ é a tensão normal real aplicada, E é o módulo de elasticidade ou de *Young*, H é o coeficiente de resistência e n é o

expoente de encruamento do material. Contudo, o comportamento mecânico de um material metálico solicitado ciclicamente pode diferir do comportamento monotônico. Durante um carregamento cíclico, para um intervalo constante de deformação $\Delta\varepsilon$ (calculado como a diferença entre a máxima e mínima deformação aplicada no carregamento cíclico) o intervalo de tensões $\Delta\sigma$ (calculado como a diferença entre a máxima e mínima tensão aplicada no carregamento cíclico) usualmente se altera. Alguns materiais exibem endurecimento cíclico, o que leva a aumento do intervalo de tensões $\Delta\sigma$ com o progresso do carregamento cíclico, enquanto que, se $\Delta\sigma$ decresce, o material experimenta amolecimento cíclico.

É interessante ressaltar, contudo, que o laço de histerese de um material metálico solicitado ciclicamente sob intervalo de deformação constante tende a estabilizar-se, mesmo após amolecimento ou endurecimento cíclico, resultando num valor estável de $\Delta\sigma$ para um dado $\Delta\varepsilon$ [5]. Isto permite reescrever a Eq. (1), resultando na equação de *Ramberg-Osgood* modificada:

$$\tilde{\varepsilon}_a = \frac{\tilde{\sigma}_a}{E} + \left(\frac{\tilde{\sigma}_a}{H'} \right)^{1/n'} \quad (2)$$

onde $\tilde{\varepsilon}_a$ é a amplitude de deformação real (metade do valor de $\Delta\tilde{\varepsilon}$) resultante do carregamento cíclico, $\tilde{\sigma}_a$ é a amplitude de tensão real (metade do valor de $\Delta\tilde{\sigma}$), E é o módulo de elasticidade ou de *Young*, H' é o coeficiente de resistência cíclico e n' é o expoente de encruamento cíclico do material.

As deformações e tensões cíclicas produzidas no carregamento de metais produzem defeitos físicos microscópicos, e isto conduz a nucleação de microtrincas e sua conseqüente propagação até a ruptura final. Este processo de falha, muito comum em metais e ligas, é chamado *fadiga*. O primeiro trabalho sobre fadiga de metais é creditado a Albert, em 1938, mas os trabalhos de Wöhler em 1860 e de Basquin em 1910 são considerados o início dos testes de fadiga controlados por tensão [6].

Nota-se que o aumento da amplitude de tensões (σ_a) resulta em decréscimo do número de ciclos necessários para a fratura (N_f) de acordo com a relação de Basquin [7]:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (3)$$

onde σ_f' é o coeficiente de resistência a fadiga e b é o expoente de resistência a fadiga, ou expoente de Basquin. A tensão média aplicada no ciclo para que a Eq. (3) seja válida é zero.

O estudo de fadiga só é completo se dois fatores forem considerados: i) materiais metálicos experimentam amolecimento e/ou endurecimento cíclicos, e ii) a falha mecânica produzida no carregamento cíclico é resultado de deformação plástica localizada, através do escorregamento de discordâncias. Assim, constata-se que o estudo da vida em fadiga de materiais metálicos através de ensaios controlados pela amplitude de tensão negligencia a deformação plástica presente no processo de falha.

Deste modo, usando o conceito de amplitude de deformação total desenvolvido na Eq. (2), assumindo que a Eq. (3) descreve a parcela elástica da deformação imposta no carregamento cíclico e usando os trabalhos de Coffin e Manson (1954), é possível escrever a relação básica de estudo de vida em fadiga sob carregamentos controlados por amplitude de deformação, sob tensão e deformação médias nulas [7]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

onde ϵ_f' é o coeficiente de ductilidade a fadiga e c é o expoente de ductilidade a fadiga (ou expoente de Coffin). A principal norma para ensaios de vida em fadiga sob carregamentos controlados por amplitude de deformação é a ASTM E 606-92^[8].

2 MATERIAL E MÉTODOS

A composição química dos materiais em estudo é apresentada na Tabela 1. Os corpos-de-prova para ensaios de tração e fadiga foram retirados das aletas de rodas automotivas fundidas em corridas de produção usuais, apresentando 45 mm de comprimento útil e 6 mm de diâmetro útil. A liga A413.0 foi estudada na condição bruta de fusão, enquanto que a liga A356.0 foi solubilizada a 535°C por 8 horas e envelhecida artificialmente a 145°C por 3,5 horas, obtendo as propriedades mecânicas de utilização típicas em rodas fabricadas com este material.

Tabela 1. Composição química (% em massa) dos materiais em estudo.

material	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Al
A413.0	10,94	0,17	0,08	0,12	0,03	balanço
A356.0	7,44	0,14	0,32	0,13	0,02	

A microestrutura das duas ligas foi analisada por microscopia óptica de corpos-de-prova metalográficos, polidos com sílica coloidal. Ensaios de tração e fadiga foram realizados em equipamento servo-controlado MTS de 250 kN de capacidade máxima, com o auxílio de extensômetros de comprimento útil inicial de 25 mm.

Os ensaios de tração foram conduzidos segundo a norma ASTM E8M-04^[9], com o intuito de se determinar a rigidez, a resistência mecânica (limite de escoamento, de resistência e real de fratura) e a ductilidade (alongamento total em 25) dos materiais em estudo, traçando os limites para os ensaios de fadiga, além de obter os coeficientes de resistência e os expoentes de encruamento da equação de Ramberg-Osgood (Eq. 1).

Os ensaios de fadiga foram conduzidos em corpos-de-prova polidos (até a condição superficial de 1 μm), variando-se as cargas máxima e mínima para obtenção de ensaios com diferentes valores de amplitude de deformações, mantendo-se a deformação média nula. A frequência utilizada nos ensaios foi de 1 a 3 Hz, e a temperatura média dos corpos-de-prova durante os ensaios foi de 22 \pm 2°C. Destes ensaios obteve-se o coeficiente de resistência e o expoente de encruamento cíclicos da equação de Ramberg-Osgood modificada (Eq. 2) e os valores dos expoentes e coeficientes de resistência e ductilidade na fadiga (Eq. 4). Os corpos-de-prova não respeitaram as dimensões estabelecidas na ASTM E606-92^[8], fato que limitou a máxima amplitude de deformação a 0,25% (0,0025 mm/mm) para evitar a flambagem durante a compressão imposta nos ciclos de carregamento.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 1 mostra a microestrutura típica das duas ligas, compostas por dendritas de fase α envoltas por microestrutura eutética, com a fase (Si) modificada. Poucos vazios interdendríticos são observados na liga A413.0, sendo estes no entanto mais comuns na liga A356.0.

As propriedades mecânicas típicas das duas ligas estão mostradas na Tabela 2, onde se nota a ductilidade semelhante das duas ligas e a maior resistência mecânica da liga A356.0.

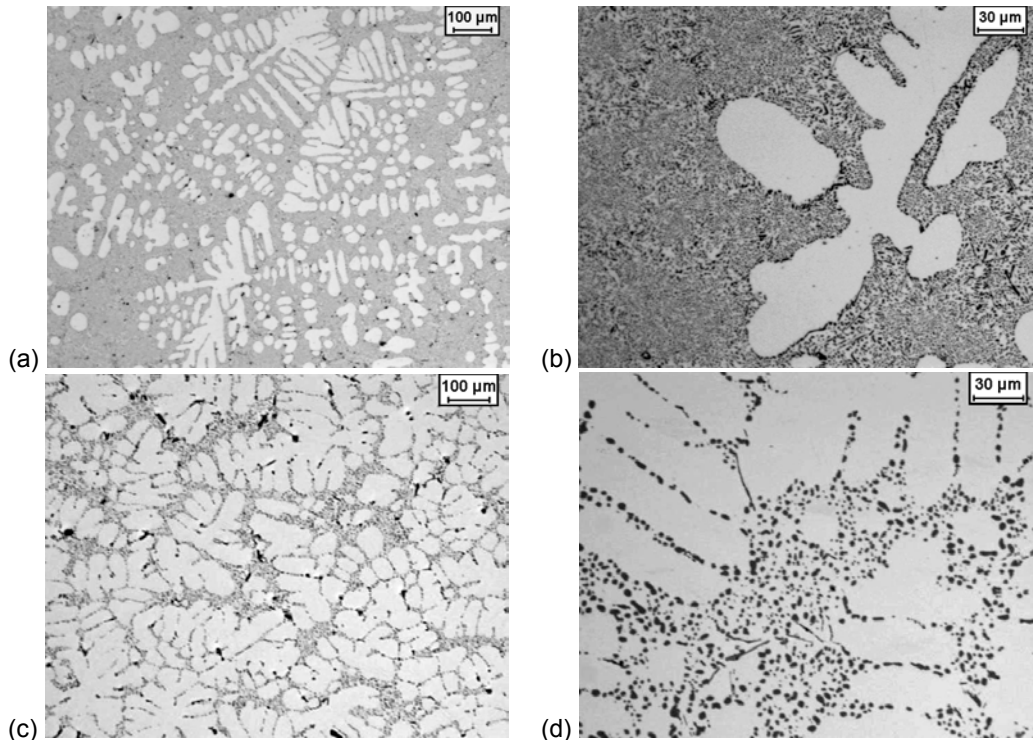


Figura 1. Microscopia óptica das ligas em estudo após polimento com sílica coloidal. (a) e (b): liga A413.0; (c) e (d): liga A356.0. Dendritas de fase α envolvidas por microestrutura eutética. Em (c) notam-se vazios interdendríticos (regiões em preto).

Tabela 2. Propriedades mecânicas monotônicas dos materiais em estudo.

	A413.0		A356.0	
módulo de elasticidade (GPa)	65	± 1	70	± 2
limite de escoamento (MPa)	73	± 16	220	± 20
limite de resistência (MPa)	169	± 21	292	± 16
limite real de ruptura (MPa)	178	± 16	325	± 18
alongamento total em 25mm (%)	11,8	± 3,1	10,8	± 2,0
coeficiente de resistência, H (MPa)	373	± 46	351	± 37
expoente de encruamento, n	0,247	± 0,017	0,088	± 0,007

As Figuras 2 e 3 trazem as curvas de amplitude de deformação em função do número de ciclos para falha para as duas ligas em estudo. Como os corpos-de-prova não respeitaram as dimensões estabelecidas na ASTM E606-92^[8], limitando a máxima amplitude de deformação a 0,25% (0,0025 mm/mm) para evitar a flambagem durante a compressão imposta nos ciclos de carregamento, nota-se que os ensaios da liga A356.0 são muito próximos ao comportamento de fadiga de alto ciclo, onde a amplitude de deformação total imposta no ensaio é muito próxima à amplitude de deformação elástica. Destes resultados puderam ser calculados os parâmetros da Equações (2) e (4), que caracterizam o comportamento das ligas a esforços cíclicos; tais parâmetros são mostrados na Tabela 3.

Para todos os ensaios de fadiga realizados com a liga A413.0 pode ser constatado que as fraturas se originam em regiões dos corpos-de-prova onde existe porosidade devido a hidrogênio retido no banho líquido, como mostra a Figura 4(a). Já a liga

A356.0 apresentou superfícies de fratura próximas as regiões com maior incidência de vazios interdendríticos, como pode ser constatado na Figura 4(b).

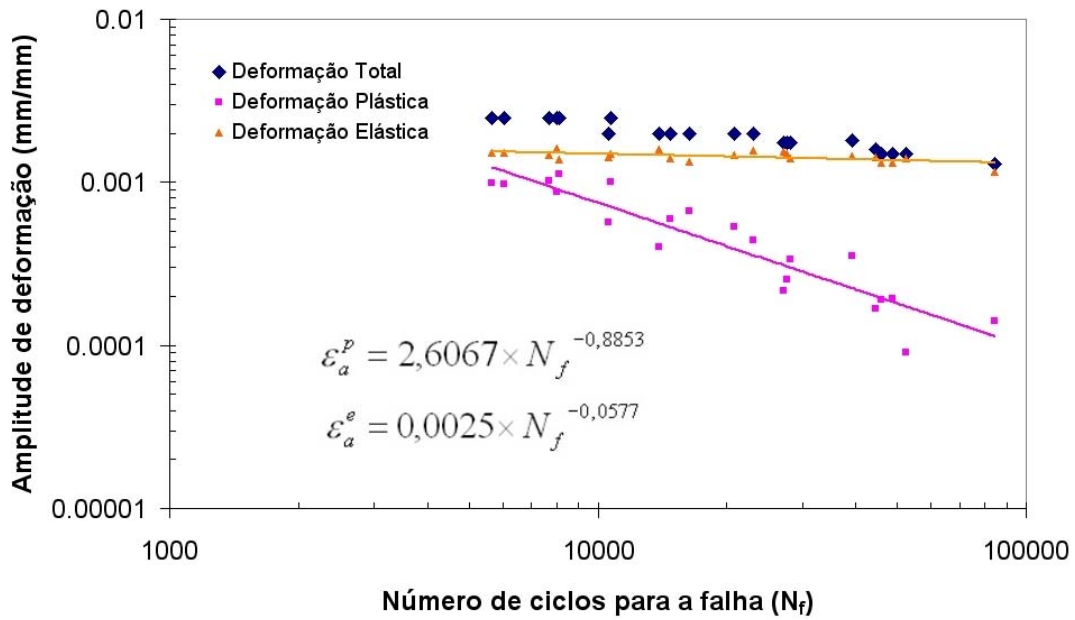


Figura 2. Curva de amplitude de deformação em função do número de ciclos para falha da liga A413.0.

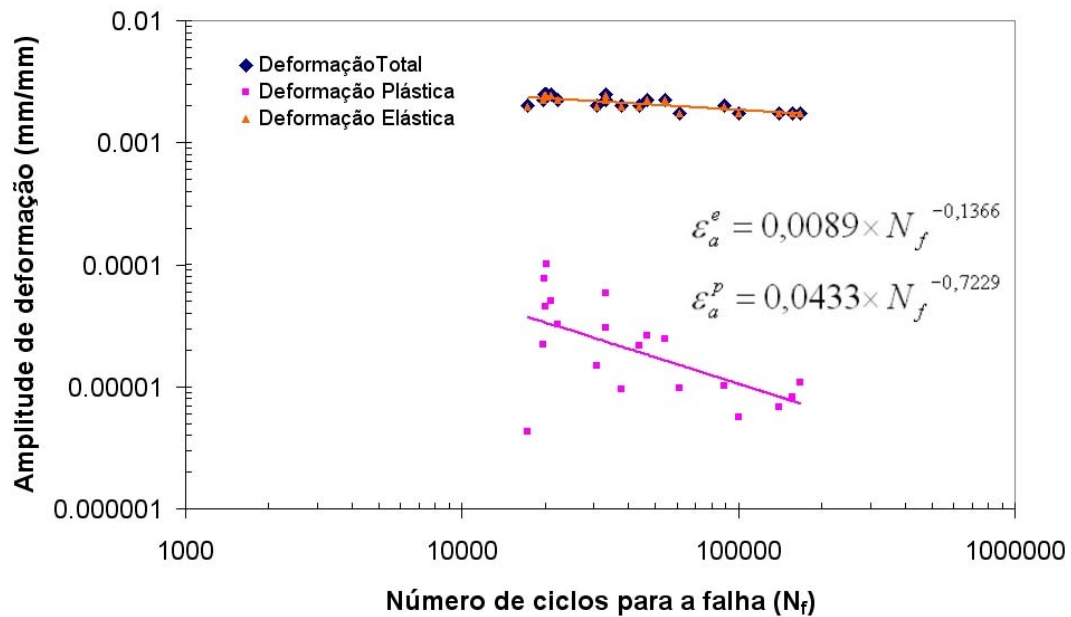


Figura 3. Curva de amplitude de deformação em função do número de ciclos para falha da liga A356.0.

Tabela 3. Propriedades mecânicas cíclicas dos materiais em estudo.

	A413.0	A356.0
coeficiente de resistência cíclico, H' (MPa)	128	676
expoente de encruamento cíclico, n'	0.028	0.137
coeficiente de resistência a fadiga, σ_f (MPa)	169	685
coeficiente de ductilidade a fadiga, ϵ_f (mm/mm)	4.87	0.07
expoente de resistência a fadiga, b	-0.057	-0.137
expoente de ductilidade a fadiga, c	-0.887	-0.723

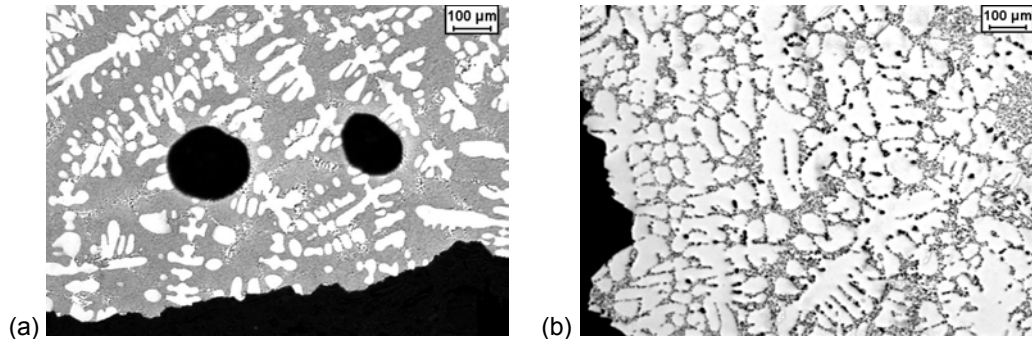


Figura 4. Microscopia óptica das regiões adjacentes à superfície de fratura por fadiga das ligas em estudo, após polimento com sílica coloidal. (a) Liga A413.0, mostrando porosidade arredondada devido a hidrogênio retido no banho líquido. (b) Liga A356.0, mostrando vazios interdendríticos.

4 DISCUSSÃO

Utilizando as Eq. (1) e (2) e os dados das Tabelas 2 e 3 pode-se construir as curvas tensão-deformação reais monotônicas e cíclicas das ligas em estudo, mostradas na Figura 5. Nota-se que a liga A356.0 apresenta endurecimento cíclico, e a liga A413.0 apresenta comportamento misto, endurecendo ciclicamente até deformações de 0,007 mm/mm.

Na Figura 6 tem-se o comparativo das curvas de amplitude de deformação em função do número de ciclos para falha das ligas em estudo, obtido com os dados da Tabela 3 e utilizando a Eq. (4). Pode-se concluir que a liga A356.0 apresenta maior vida em fadiga em amplitudes de deformação que geram vida entre 5000 e 8×10^6 ciclos. No entanto, se análise de vida em fadiga por amplitude de tensões for realizada, utilizando-se a Eq. (3), obtém-se a Figura 7, que indica vida em fadiga superior para a liga A356.0 se a amplitude de tensões for superior a 62 MPa, onde a vida em fadiga é de 2×10^7 ciclos para as duas ligas.

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- As ligas A413.0 e A356.0 apresentam ductilidade semelhante, mas a liga A356.0 apresenta resistência mecânica superior.
- A liga A356.0 apresenta endurecimento cíclico, e a liga A413.0 apresenta comportamento misto, inicialmente endurecendo ciclicamente.

- Realizando análise de vida em fadiga por amplitude de deformações, constata-se que a liga A356.0 apresenta maior vida em fadiga em amplitudes de deformação que geram vida entre 5000 e 8×10^6 ciclos.
- Na análise de vida em fadiga por amplitude de tensões, a vida em fadiga da liga A356.0 é superior se a amplitude de tensões aplicada for superior a 62 MPa.

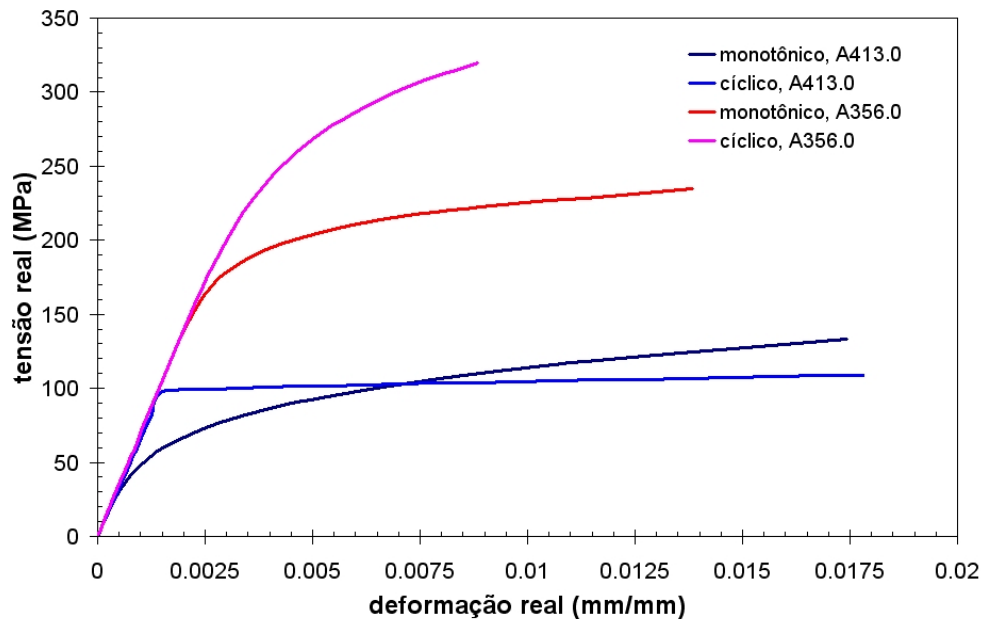


Figura 5. Comparativo das curvas tensão-deformação reais monotônicas e cíclicas das ligas em estudo.

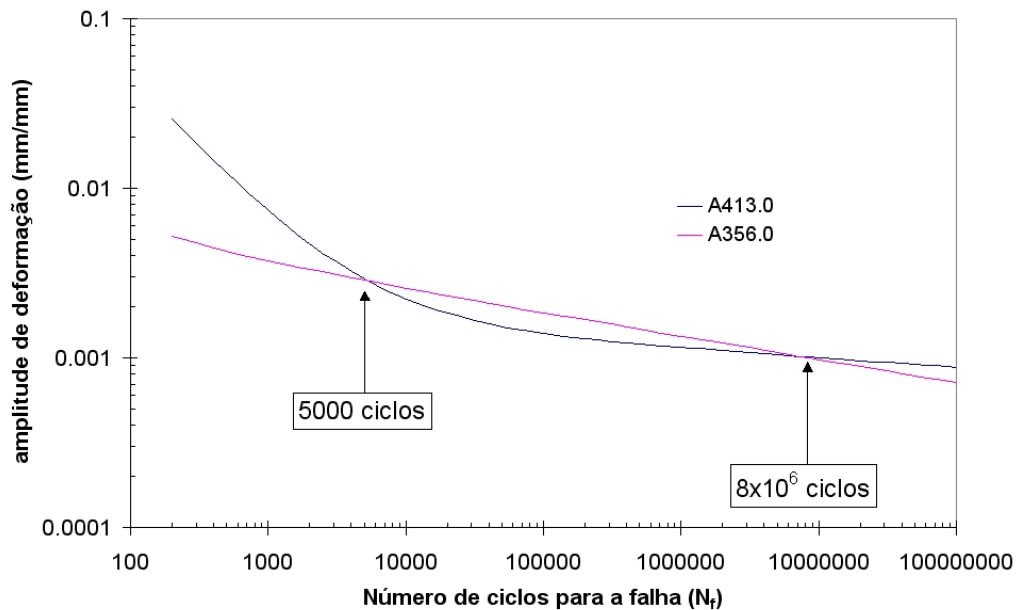


Figura 6. Comparativo das curvas de amplitude de deformação em função do número de ciclos para falha das ligas em estudo.

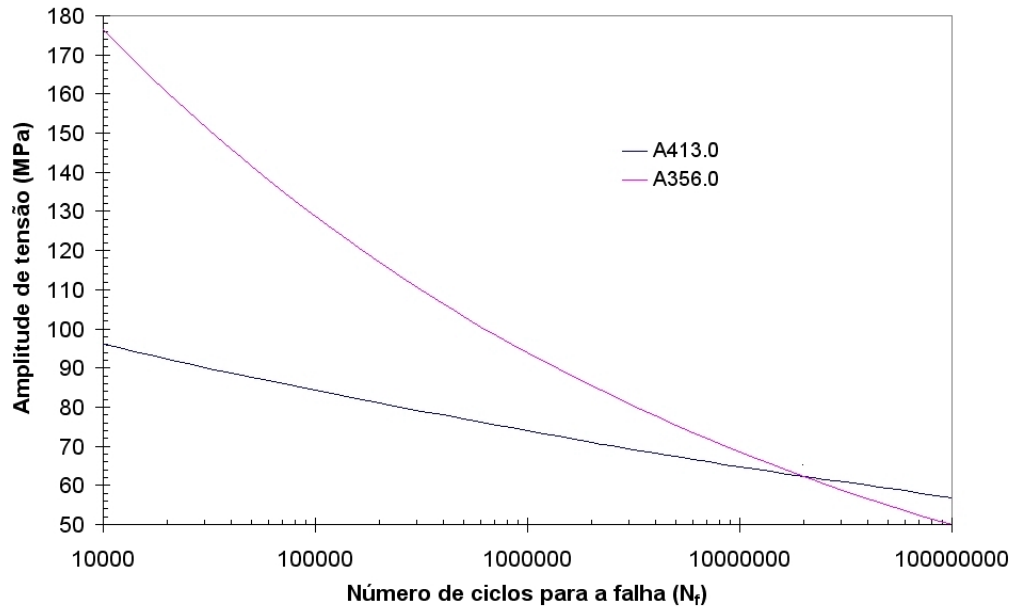


Figura 7. Comparativo das curvas de amplitude de tensão em função do número de ciclos para falha das ligas em estudo.

Agradecimento

Os autores agradecem a Italspeed Automotive Ltda. pela doação dos corpos-de-prova utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MANGONON, P.L., "The principles of materials selection for engineering design". Prentice Hall:New Jersey, 1999, p. 540-563.
2. LAMPMAN, S. (ed), "Fatigue and fracture" IN: ASM Handbook, ASM, Metals Park, USA, Vol. 19, 1996, p. 964-979.
3. Microstructure of aluminum alloys. IN: Metals Handbook, ASM, Metals Park, USA, Vol. 7, 1972, p. 258-259.
4. <http://www.matweb.com>, consultado em 11 de janeiro de 2005.
5. DOWLING, N. E., "Mechanical behaviour of materials", Prentice Hall, New Jersey, USA, 2. ed., 1999, pp. 559-597.
6. SCHÜTZ, W., "A history of fatigue", Engineering fracture mechanics, Vol. 54, No. 2, 1996, pp. 263-300.
7. SURESH, S., "Fatigue of materials", Cambridge Press, Boston, USA, 2. ed., 1998, pp.221-279.
8. ASTM E 606-92, "Standard practice for strain-controlled fatigue testing", ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1993, Committee E-8, pp. 525-539.
9. ASTM E 8M-04, "Standard test methods for tension testing of metallic materials[Metric]", ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2004, Committee E-28, pp. 1-24.

FATIGUE LIFE OF TWO CAST ALUMINUM ALLOYS USED IN AUTOMOTIVE WHEELS¹.

*Rodrigo Magnabosco²
Renata Cardoso Lopes³
Ricardo Colalillo⁴*

Abstract

This work compares the fatigue behavior of two cast aluminum alloys, A356.0 and A413.0, used in the fabrication of automotive wheels. Monotonic mechanical behavior of the two alloys was determined following ASTM E8M-04, and cyclic mechanical behavior was determined in strain-controlled fatigue tests, using specimens obtained from cast wheels, with 45 mm length and 6 mm diameter. A356.0 aluminum alloy showed higher rigidity, strength and toughness than A413.0 alloy. In the fatigue tests with strain amplitudes that caused fatigue life between 5,000 e 8×10^6 cycles, A356.0 alloy (which presented cyclic hardening) showed higher fatigue life than A413.0 (which presented mixed behavior, with an initial cyclic hardening). In stress controlled fatigue analysis, A356.0 alloy presented higher fatigue life if the stress amplitude applied was higher than 62 MPa.

Key-words: Fatigue life; Aluminum alloys; A356.0; A413.0.

¹ Paper presented at 60th Annual International Congress of ABM – São Paulo, July 25th to 28th, 2005.

² Assistant Professor, Mechanical Engineering Department – FEI, rodrimagn@fei.edu.br

³ Student, Mechanical Engineering Department – FEI, fei_relopes@yahoo.com.br

⁴ Master in mechanical engineer, rcolalillo@uol.com.br