

RESISTÊNCIA À FADIGA DE AÇOS PARA USO EM TANQUE DE COMBUSTÍVEL DE APLICAÇÃO AUTOMOTIVA

Marley de Souza Lemos⁽¹⁾
Bráulio Viegas da Silva⁽²⁾
José Antônio Nunes de Carvalho⁽³⁾
Luiz Cláudio Cândido⁽⁴⁾
Leonardo Barbosa Godefroid⁽⁴⁾

Resumo

O presente trabalho procurou caracterizar comparativamente, através de simulação laboratorial da vida em fadiga, o desempenho de dois aços inoxidáveis, bem como um aço livre de interstícios, e um aço baixo carbono. Destes materiais, o último já é aplicado em tanques de combustível para automóveis, e os outros três são candidatos a sua substituição. Os aços estudados foram os seguintes: aço inoxidável austenítico – tipo AISI 304; aço inoxidável ferrítico – tipo AISI 439; aço carbono com revestimento de chumbo mais pintura e PVC; aço livre de interstícios (IF) com revestimento de alumínio. Corpos-de-prova foram confeccionados nos sentidos longitudinal e transversal de conformação mecânica, e posteriormente ensaiados de acordo com as Normas ASTM E 466/468, para o traçado das curvas tensão alternada versus vida em fadiga. Os ensaios de fadiga foram realizados com amplitude constante de carregamento, numa razão $R = 0,3$. Os ensaios foram realizados ao ar e também após imersão por 30 dias em álcool combustível. Com relação aos ensaios sem ataque químico prévio, os resultados indicaram que o aço inoxidável austenítico apresenta melhor desempenho em fadiga, na região de fadiga de baixo ciclo, mas perde rapidamente sua resistência, à medida que se diminui o carregamento cíclico. Para a região de fadiga de alto ciclo, o aço inoxidável ferrítico teve o melhor desempenho. O ataque químico com álcool combustível chegou a influenciar a vida de todos os aços estudados, mas a resistência do aço inoxidável austenítico ainda se manteve superior aos demais aços.

Palavras-chave: Fadiga; Aços inoxidáveis; Aplicação automobilística.

Contribuição técnica a ser apresentada no 60^o Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte / MG, julho de 2005

⁽¹⁾ Engenheiro Metalurgista da AETHRA, M.Sc. - REDEMAT/UFOP

⁽²⁾ Engenheiro Metalurgista, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto/MG

⁽³⁾ Engenheiro Metalurgista e M.Sc. da ACESITA, Timóteo/MG

⁽⁴⁾ Professor, M.Sc., D.Sc., Escola de Minas, REDEMAT/UFOP, Ouro Preto/MG;
leonardo@demet.em.ufop.br

INTRODUÇÃO

Atualmente as empresas vivem fortes reformulações em processos e produtos, sejam por “inputs” internos e/ou externos, tais como necessidades de redução de custo, melhoria da qualidade intrínseca do produto, adequações a processos ditos ecologicamente corretos. Em relação a esse último item são notórias as crescentes cobranças e penalidades aplicadas às empresas que não se adaptam as essas exigências, não só pelas entidades governamentais como também pela própria sociedade, que em tal momento se apresenta mais consciente. Exemplo atual que se evidencia em nosso segmento, é o retorno à fabricação de tanques em chapas, que eram fabricados em plástico, devido às dificuldades de reciclagem dos polímeros termo – rígidos (“multi-layers”). Tais dificuldades poderão se apresentar futuramente nas chapas de aço baixo carbono revestidas de chumbo e mais deposição de pintura e aplicação do PVC. A utilização do chumbo, a reciclagem e/ou aproveitamento do resíduo gerado no processo de pintura e a própria reciclagem dos tanques pintados são fatores de forte impacto na questão ambiental e de gerenciamento complexo e dispendioso. Devido a questões como estas é que a AETHRA, como grande produtor nacional de componentes automotivos, teve como iniciativa a busca de um material alternativo, que permita dar uma grande contribuição técnica - ambiental à sociedade, e obviamente tendo informações de interesse das grandes montadoras no assunto.

Este estudo buscou caracterizar comparativamente, através de simulação laboratorial da vida em fadiga, de aços inoxidáveis das classes austeníticos e ferríticos, bem como um aço baixo carbono revestido em chumbo mais pintura e PVC utilizado no processo atual, e um aço livre de interstícios (IF). Os aços estudados foram os seguintes: aço inoxidável austenítico – tipo AISI 304; aço inoxidável ferrítico – tipo AISI 439; aço carbono com revestimento de chumbo, chamado aqui de aço-Pb; aço livre de interstícios IF com revestimento de alumínio, identificado como aço-IF. Os materiais, no âmbito geral do projeto, foram observados em relação ao seu comportamento frente à fadiga mecânica, de acordo com as Normas ASTM E 466/468^(1,2), isto é, traçado de curvas tensão alternada versus vida em fadiga. Em outras palavras, estudou-se o comportamento destes materiais em função de curvas de Wöhler, tensão alternada versus vida em fadiga.

Os corpos-de-prova foram ensaiados em fadiga ao ar, e também após imersão por 30 dias em álcool combustível. Com esta metodologia procurou-se ter uma idéia sobre o comportamento em uso dos materiais, e verificar o possível efeito deletério do meio agressivo na formação de “pites” de corrosão e conseqüente degradação em fadiga dos materiais.

MATERIAIS E METODOLOGIA

A composição química dos aços utilizados neste trabalho está apresentada na Tabela 1. Esta análise foi fornecida pela empresa ACESITA, fabricante dos aços.

A metodologia experimental envolveu inicialmente a caracterização de todos os materiais que foram ensaiados em fadiga. Esta caracterização consistiu nos seguintes itens: microestruturas, perfis de microdureza e ensaios de tração.

Tabela 1. Composição química dos aços estudados (% em peso).

Elemento	AISI-304	AISI-439	Aço-IF	Aço-Pb
S	0,001	0,001	0,009	0,007
W	0,002	0,010	---	---
Ti	0,003	0,256	0,067	0,002
Nb	0,005	0,202	0,002	0,001
Sn	0,009	0,003	0,009	0,003
P	0,027	0,020	0,008	0,013
V	0,033	0,053	0,002	---
Mo	0,035	0,011	0,003	0,002
C	0,052	0,011	0,005	0,035
Cu	0,070	0,022	0,035	0,009
Co	0,076	0,027	0,003	0,003
Si	0,402	0,398	0,010	0,016
Mn	1,376	0,215	0,109	0,220
Ni	8,050	0,169	0,025	0,018
Cr	18,16	17,20	0,018	0,027
N	345	142	0,005	35,000
Pb	---	---	0,001	0,022
Al	---	---	0,027	0,046

Após esta caracterização, procedeu-se aos ensaios de fadiga. Para tal, utilizou-se uma máquina servo-hidráulica MTS de 10 toneladas, com controle computacional. Os ensaios foram realizados na atmosfera ambiente, na temperatura de 25°C, com umidade relativa de 70%.

Os corpos-de-prova para os ensaios de fadiga foram confeccionados na empresa AETHRA, através de corte por laser e posterior retífica. O acabamento superficial final correspondeu ao estado de aplicação nos tanques de combustível. Foram retirados corpos-de-prova nos sentidos longitudinal e transversal à direção de conformação das chapas originais. A Figura 1 apresenta um corpo-de-prova utilizado neste trabalho, com geometria de acordo com a Norma ASTM E-468⁽²⁾.



Figura 1. Corpo-de-prova utilizado nos ensaios de tração e de fadiga. Comprimento total de 200mm, espessura de 1mm, largura mínima de 12,7mm.

Cada curva de Wöhler foi traçada com 20 corpos-de-prova. Os ensaios foram projetados a partir de níveis elevados de carregamento, com subsequente decréscimo de carregamento, até se atingir um nível de carregamento correspondente a 10^7 ciclos de carregamento. Nesta região foram utilizados até três corpos-de-prova para cada nível de carregamento. A razão R entre tensões foi sempre de 0,3.

Uma vez conhecida a curva de Wöhler de cada material, foi escolhido um nível de carregamento, correspondente a uma vida em fadiga de aproximadamente 1×10^6 ciclos. Neste nível foram realizados três ensaios de fadiga para cada corpo-de-prova (sentido transversal) previamente imerso em álcool combustível, no período de 30 dias. Estes ensaios foram realizados para se determinar a sensibilidade dos materiais à corrosão no ambiente de trabalho dos mesmos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação à microestrutura, todos os aços apresentaram grãos equiaxiais, sem diferença significativa entre os sentidos longitudinal e transversal. Percebe-se que o aço AISI 304 apresentou traços de transformação martensítica/maclação em conjunto com a fase austenítica, proveniente do trabalho de conformação mecânica do material. Após os ensaios de fadiga, apenas a microestrutura do aço AISI-304 foi alterada. Para este aço, quanto maior foi a carga máxima da ciclagem, maior foi a quantidade de transformação martensítica/maclação observada.

A Figura 2 mostra a variação de dureza encontrada em alguns corpos-de-prova fadigados, em comparação com corpos-de-prova no estado de entrega. Observa-se claramente que o aço AISI 304 apresenta uma grande variação de dureza, conforme o nível de sollicitação. Este fato está relacionado com a transformação martensítica que ocorre com este material, além do tradicional encruamento. Os outros aços apresentaram também variação de dureza em função do nível de carregamento, porém somente devido ao encruamento.

A Tabela 2 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas mais importantes obtidas a partir do ensaio de tração. O aço AISI 304 é o que possui os maiores valores para limite de resistência e para deformação total, seguido pelo aço AISI 439. Os outros dois aços têm um comportamento inferior, e muito semelhante um do outro. Deve-se comentar que os resultados de tração são um pouco diferentes (mas não mais de 10%) em relação aos padrões da ACESITA, uma vez que os corpos-de-prova utilizados para os ensaios de tração tiveram a mesma geometria dos corpos-de-prova de fadiga (ou seja, o padrão escolhido não foi o mesmo da empresa). Com relação à anisotropia, não foi observada diferença significativa entre os aços. Todos os aços apresentaram um comportamento dúctil, com fratura por nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades.

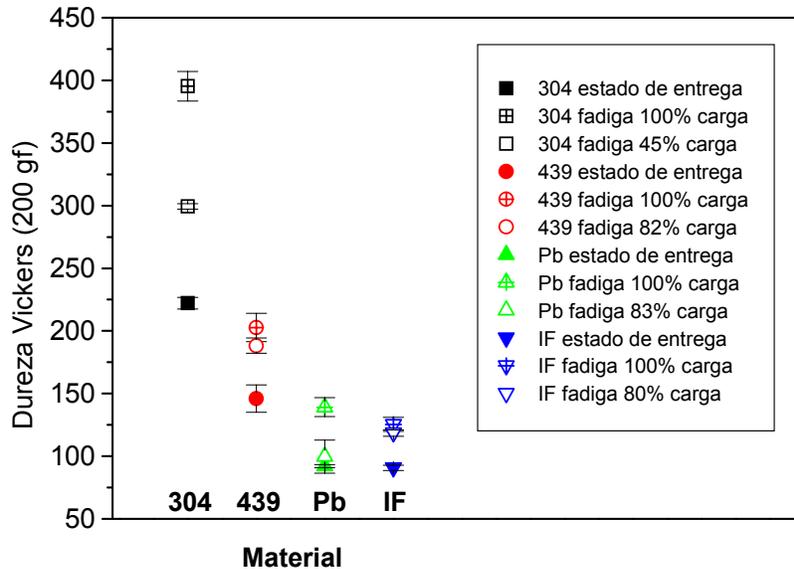


Figura 2. Variação de dureza para os aços estudados, estado de entrega e após fadiga.

Tabela 2. Propriedades mecânicas em tração dos aços estudados.
L = longitudinal; T = transversal.

Amostra	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Deformação total (%)
AISI-304 L	235	582	45,0
AISI-304 T	249	656	40,0
AISI-439 L	272	459	15,8
AISI-439 T	268	431	17,9
Aço-IF L	132	290	25,6
Aço-IF T	130	289	26,4
Aço-Pb L	167	310	24,8
Aço-Pb T	176	301	24,5

Com relação aos ensaios de fadiga, a Figura 3 mostra as curvas de Wöhler, obtidas com todos os materiais estudados, nas direções longitudinal e transversal. Observa-se que os aços inoxidáveis apresentaram comportamento mecânico diferente. O aço AISI-304 possui os maiores valores para vida em fadiga, quando o carregamento cíclico é bastante elevado, mas perde rapidamente a resistência à fadiga à medida que se diminui o nível de carregamento. O aço AISI-439 apresenta um desempenho mais estável, sendo inferior ao aço AISI-304 na região de fadiga de baixo ciclo, mas superior na região de fadiga de alto ciclo. Os outros dois aços têm um comportamento muito semelhante um do outro, mas bem inferior aos aços inoxidáveis.

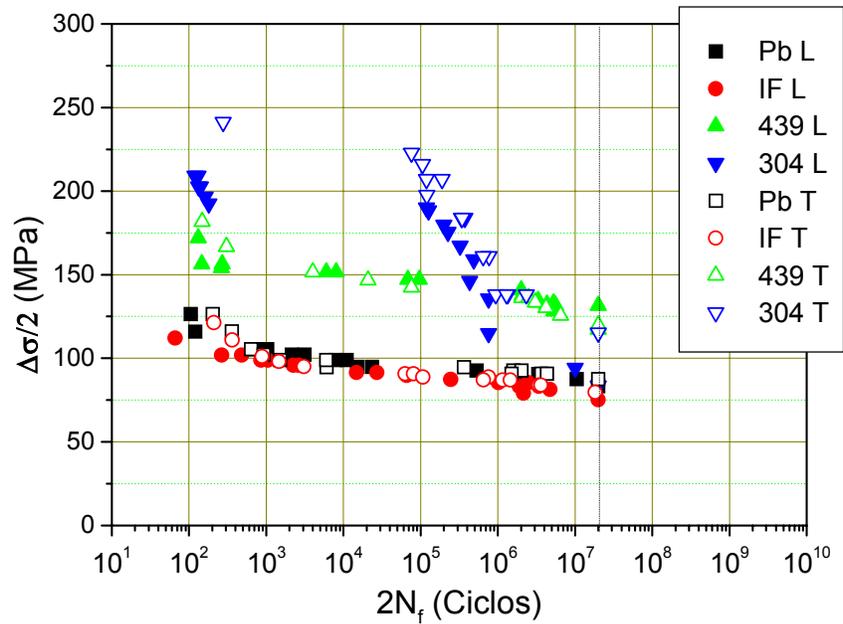


Figura 3. Curvas de Wöhler obtidas com todos os materiais estudados. L = longitudinal; T = transversal.

A Figura 4 ilustra a superfície de fratura por fadiga dos aços estudados, para um nível fixo de carregamento. Observa-se que a iniciação de trinca se dá sempre em uma das extremidades da seção transversal do corpo-de-prova, local de concentração de tensões. Nota-se também que o aço AISI-304 apresentou uma propagação estável de trinca, assim como o aço AISI-439, enquanto que os outros aços se romperam imediatamente por tração. Esta característica confirma o melhor desempenho em fadiga dos aços inoxidáveis.

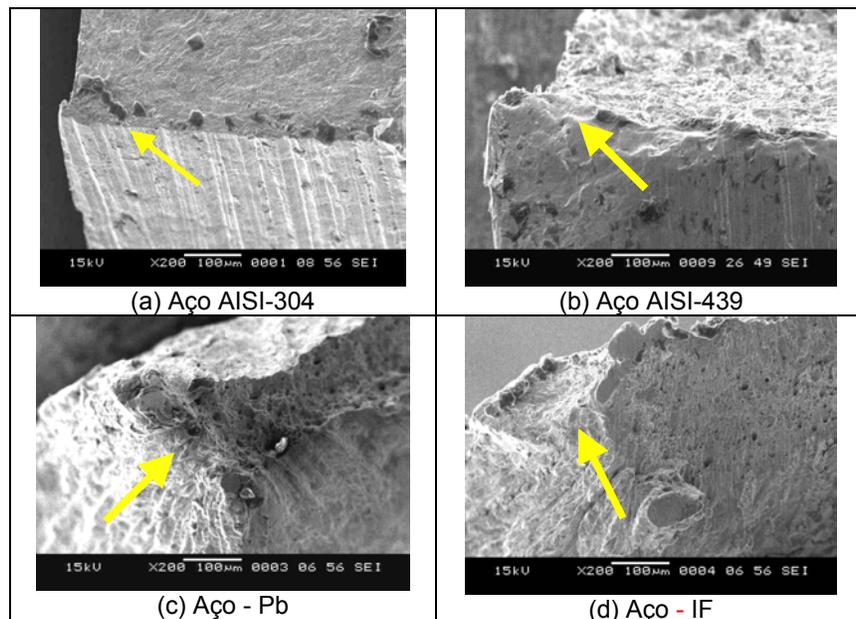


Figura 4. Superfície de fratura por fadiga dos aços estudados. A seta indica o local de iniciação de trinca; 200X.

Diversos autores têm observado⁽³⁻⁸⁾ que a transformação austenita em martensita confere aos aços austeníticos propriedades mecânicas mais elevadas, no que se refere a resistência em tração e tenacidade à fratura. Com relação à fadiga, os mesmos autores mostraram que a resistência à iniciação de trinca de fadiga é prejudicada com a transformação de fases, mas que a resistência à propagação de trinca de fadiga é aumentada. No caso do presente trabalho, como a iniciação de trinca sempre vai ocorrer em uma das extremidades desta seção, a maior resistência à iniciação de trinca vai depender diretamente da dificuldade de se promover deformação plástica, isto é, seu encruamento, como é o caso do aço AISI-304. Por outro lado, a propagação da trinca nucleada vai depender da microestrutura presente. No caso do aço AISI-304 a resistência à propagação de trinca é elevada quando se tem uma elevada quantidade de austenita transformada em martensita (fadiga de baixo ciclo). A resistência vai diminuindo, à medida que a transformação de fases também vai diminuindo. No caso dos outros aços estudados, como não existe a transformação de fases, o comportamento em fadiga torna-se mais estável. A resistência do aço AISI-439 ainda é superior à dos outros dois aços, devido ao maior encruamento deste material.

A Tabela 3 apresenta a variação da vida em fadiga para todos os materiais ensaiados ao ar com corpos-de-prova no estado de entrega e com corpos-de-prova previamente imersos em álcool combustível por 30 dias. Para a obtenção destes resultados, fixou-se um único nível de carregamento em fadiga, correspondente a uma vida em fadiga de aproximadamente 1×10^6 ciclos. Foram ensaiados apenas corpos-de-prova no sentido transversal. Observa-se que todos os aços estudados sofreram efeito degradante do meio corrosivo prévio, sendo que o aço AISI-304 conseguiu suportar melhor este meio agressivo.

Tabela 3. Variação da vida em fadiga de corpos-de-prova no estado de entrega e de corpos-de-prova previamente imersos em álcool combustível. Nível de carregamento constante; T= transversal.

Amostra	ΔN_f (%)
AISI-304 T	30
AISI-439 T	55
Aço-IF T	80
Aço-Pb T	90

A Figura 5 ilustra a superfície lateral (segundo a espessura) dos corpos-de-prova dos aços pré-corroídos, posteriormente fadigados para um nível fixo de carregamento. Todos os aços apresentaram pites de corrosão, mas em menor intensidade e tamanho para o aço AISI-304. Esta característica confirma o melhor desempenho deste aço.

O efeito degradante de corrosão na resistência à fadiga tem sido observado por diversos autores⁽⁹⁻¹²⁾. O meio agressivo pode provocar o aparecimento de pites de corrosão, que funcionam como sítios nucleadores de trinca de fadiga. No caso do presente trabalho, nota-se a maior resistência do aço AISI-304 à formação destes pites. Nota-se também que nem os revestimentos de chumbo e de alumínio, presentes, respectivamente, nos aços ao Pb e IF, conseguiram resistir ao meio agressivo.

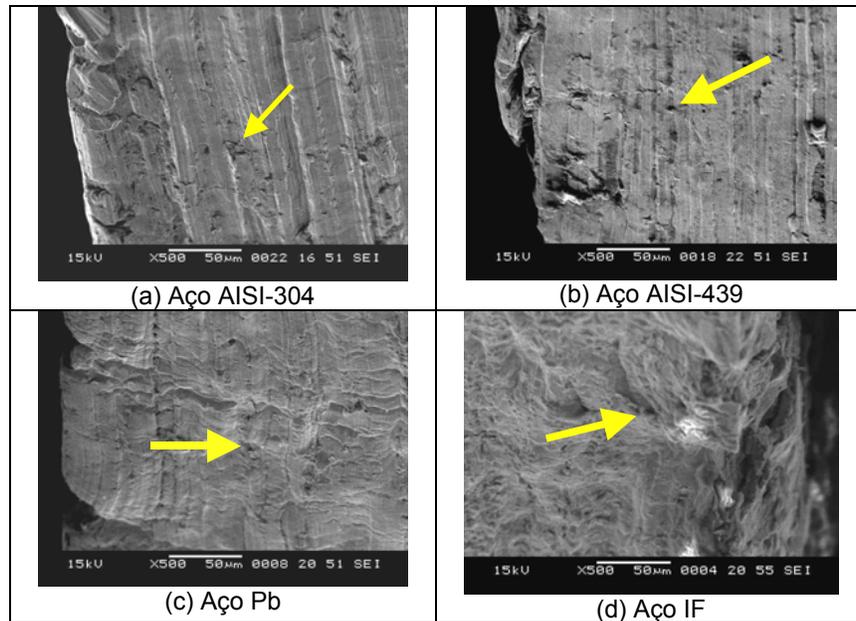


Figura 5. Superfície lateral dos aços pré-corroídos e fadigados. A seta indica a presença de pites de corrosão. 500X.

CONCLUSÕES

- 1) Todos os aços estudados apresentaram uma microestrutura normal, com grãos equiaxiais, sem indícios de anisotropia. A microestrutura só é alterada após os ensaios de fadiga no aço AISI-304, que mostrou transformação martensítica/maclação, em menor proporção no estado de entrega, e intensa nos corpos-de-prova ensaiados.
- 2) Os aços inoxidáveis apresentaram valores de microdureza mais elevados do que os outros aços. Todos os aços endureceram após os ensaios de fadiga, sendo que o aço AISI-304 foi o que apresentou uma maior variação de dureza.
- 3) Com relação aos ensaios de tração, os aços inoxidáveis apresentaram comportamento mecânico diferente. O aço AISI-304 é o que possui os maiores valores para limite de resistência, para deformação total e encruamento, seguido pelo aço AISI-439. Os outros dois aços têm um comportamento inferior, e muito semelhantes um do outro. Não foi detectado nenhum efeito significativo de anisotropia. Todos os aços estudados se comportaram de maneira dúctil, através do mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades.
- 4) Sobre os ensaios de fadiga com corpos-de-prova no estado de entrega, verificou-se que o aço AISI-304 possui os maiores valores para a vida em fadiga, na região de fadiga de baixo ciclo. Já na região de fadiga de alto ciclo, o aço AISI-439 apresentou um desempenho superior. Os outros dois aços tiveram um comportamento inferior em qualquer região, e muito semelhantes um do outro. Não foi detectado nenhum efeito significativo de anisotropia. A análise fratógráfica mostrou sempre a iniciação de trinca por fadiga na superfície externa do corpo-de-prova, próximo a uma de suas extremidades (concentrador de tensões).
- 5) Sobre os ensaios de fadiga com corpos-de-prova previamente imersos em álcool combustível, observou-se que todos os aços sofreram efeito deletério do meio corrosivo, sendo que o aço AISI-304 conseguiu suportar de forma mais efetiva

este meio agressivo. A análise fratógráfrica indicou uma quantidade maior de danos na superfície lateral dos corpos-de-prova nos aços ao Pb e IF.

- 6) De todos os aços estudados, o que possivelmente apresenta melhor desempenho para ser utilizado em tanque combustível é o aço inoxidável AISI-304. Por outro lado, devido à sua instabilidade microestrutural em função do carregamento cíclico, existe a alternativa de utilização do aço AISI-439. Certamente, deve ser considerada a resistência à corrosão dos materiais no combustível. Os outros dois aços estudados não apresentaram desempenho satisfatório.

Agradecimentos

À ACESITA, pelo fornecimento de todos os aços estudados. À AETHRA, pela bolsa de estudos para o autor B.V.S.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASTM E-466-82, *2000 Annual Book of ASTM Standards*.
- 2 ASTM E-468-82, *2000 Annual Book of ASTM Standards*.
- 3 G.R.Chanani, S.D.Antolovich e W.W.Gerberich, *Met. Trans.*, 3(1972)2661-2672
- 4 G.R.Chanani e S.D.Antolovich, *Met. Trans.*, 5(1974)217-229
- 5 D.Hennessy, G.Steckel e C.Altstetter, *Met. Trans.*, 7A(1976)415-424
- 6 G.Baudry e A.Pineau, *Mater. Sci. Engng.*, 28(1977)229-242
- 7 M.Bayerlein, H.J.Christ e H.Mughrabi, *Mater. Sci. Engng.*, A114(1989)L11-L16
- 8 H.J.Maier, B.Donth, M.Bayerlein, H.Mughrabi, B.Meier e M.Kesten, *Z.Metallkd.*, 84(1993)820-826
- 9 A.J.Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, 1996.
- 10 C.S.Scheerder, *Master Thesis, Delft Univ. of Technology*, 1992, conforme citado em J.Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Acad. Publ., 2002.
- 11 S.Zhou e A.Turnbull, *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, 22(1999)1083-1093
- 12 S.H.Spence et al., *Proc. of the 8th. Intl. Fatigue Congress*, EMAS, Vol.1, 2002, pp.701-708.

FATIGUE BEHAVIOR OF STEELS FOR USE IN FUEL TANKS IN AUTOMOTIVE APPLICATION

Marley de Souza Lemos⁽¹⁾

Bráulio Viegas da Silva⁽²⁾

José Antônio Nunes de Carvalho⁽³⁾

Luiz Cláudio Cândido⁽⁴⁾

Leonardo Barbosa Godefroid⁽⁴⁾

Abstract

In this paper, the fatigue behavior of two stainless steels - AISI-304 and AISI-439 - used in the automotive industry has been studied, and compared with the performance of an interstitial free steel and a Pb-steel. These steels are candidates for use in fuel tanks. Constant load amplitude fatigue testing were performed under a stress ratio of $R = 0,3$. Specimens were tested in air and after 30 days of immersion in an alcohol solution. The fatigue resistance of the austenitic stainless steel was superior to the other steels in the two conditions analyzed, in the region of low cycle fatigue. On the other hand, in the region of high cycle fatigue the ferritic stainless steel is the best selection.

Key-words: Fatigue; Stainless steels; Automotive application.

⁽¹⁾ *Engenheiro Metalurgista da AETHRA, M.Sc. - REDEMAT/UFOP*

⁽²⁾ *Engenheiro Metalurgista, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto/MG*

⁽³⁾ *Engenheiro Metalurgista e M.Sc. da ACESITA, Timóteo/MG*

⁽⁴⁾ *Professor, M.Sc., D.Sc., Escola de Minas, REDEMAT/UFOP, Ouro Preto/MG;
leonardo@demet.em.ufop.br*