

ANÁLISE COMPORTAMENTAL EM CORROSÃO-FADIGA DE AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS EMPREGADOS EM SISTEMAS DE EXAUSTÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTIVOS¹

*Nemer Saib Neto²
Ricardo Augusto Faria³
Luiz Cláudio Cândido⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁴*

RESUMO

Estudou-se o comportamento em corrosão-fadiga de cinco aços inoxidáveis ferríticos – 409A, 430E, 439A, 441A e F17T – utilizados na indústria automotiva no sistema de exaustão. A diferença relevante entre os aços é a presença dos elementos de liga Nb e Ti. Os ensaios de corrosão-fadiga foram realizados em dois níveis de carregamento axial com amplitude constante numa razão de carga de $R = 0,1$. A frequência utilizada nos ensaios foi de 30Hz. Os experimentos foram realizados num meio corrosivo, onde foi utilizado um condensado sintético de $pH \cong 3,0$ simulando os gases do sistema de exaustão. A temperatura dos ensaios foi de 70°C. O comparativo entre os aços foi desenvolvido através da análise das curvas de Wöhler. Os resultados mostraram que a resistência à fadiga do aço 430E, estabilizado com Nb, foi a mais elevada dos aços estudados, enquanto que a resistência à fadiga-corrosão do aço 409A foi a mais elevada.

Palavras-chave: corrosão-fadiga; aço inoxidável ferrítico; sistema de exaustão

¹ 6º ENEMET – julho / 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduando em Eng. Metalúrgica - UFOP, Praça Tiradentes, 20, 35400-000 Ouro Preto – MG. nemersaib@yahoo.com.br

³ Eng.º Metal.; M.Sc.; Doutorando REDEMAT-UFOP, ACESITA S.A., rafaria@acesita.com.br

⁴ Membro da ABM; M.Sc.;D.Sc. - REDEMAT-UFOP, Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; candido@em.ufop.br; leonardo@demet.em.ufop.br

INTRODUÇÃO

A indústria automobilística tem sempre procurado materiais com excelente desempenho e baixo custo, visando à obtenção de produtos com maior valor agregado. Tratando-se do sistema de exaustão de veículos automotores, a redução de peso e o aumento na vida útil fazem com que os aços inoxidáveis ferríticos tenham uma aplicação crescente nesta parte do veículo^(1,2).

Devido às solicitações mecânicas do solo e do próprio motor, as partes integrantes do sistema de exaustão estão submetidas à fadiga, ou seja, esforços mecânicos de naturezas diversas: variação de carregamento, de temperatura e dos dois simultaneamente, bem como influência do meio corrosivo.

Atualmente, o sistema de exaustão dos veículos automotores é constituído, em sua grande maioria, pelos aços inoxidáveis ferríticos. De acordo com o princípio de funcionamento do motor, as partes integrantes do sistema de exaustão estão sempre submetidas a diferentes temperaturas, principalmente sob condições cíclicas e à presença de meio corrosivo causado pelos produtos de combustão do motor e do convertedor catalítico. Falhas por fadiga a alta temperatura e/ou corrosão-fadiga são bastante comuns no sistema de exaustão, levando a uma redução significativa no tempo de vida dos constituintes do mesmo.

A Figura 1 mostra o sistema de exaustão de um veículo automotivo com os seus principais constituintes.



Figura 1: Sistema de exaustão de um veículo automotivo.

O sistema de exaustão pode ser dividido em duas partes:

- Parte quente ($T > 750^{\circ}\text{C}$) – engloba desde o coletor até o catalisador. Os principais tipos de fadiga que podem ser encontrados são a fadiga térmica e a fadiga termomecânica;
- Parte fria ($T < 750^{\circ}\text{C}$) – engloba desde o abafador até o tubo de saída. Os principais tipos de fadiga que podem ser encontrados são a fadiga ao ar e a fadiga-corrosão.

Geralmente, os aços inoxidáveis ferríticos contêm 11 – 30% de Cr, pequenas adições de Ni (às vezes ausente), Mo, Nb, Ti e baixos teores de C, N. Esses aços apresentam boa resistência à corrosão, ao calor e boa conformabilidade⁽³⁾.

Há um grande grupo de aços inoxidáveis ferríticos (da série 400) que apresentam uma variedade de adição de elementos de liga⁽³⁾.

Das adições realizadas, destacam-se o Nb e Ti por serem fortes formadores de ferrita, além de remover C e N da solução sólida na forma de carbetos e nitretos (precipitados estáveis)⁽⁴⁾.

Quando a ferrita é estabilizada e o aço é protegido da sensitização, a remoção de C e N na forma de carbonitretos insolúveis também propicia a melhoria da ductilidade e da resistência ao impacto⁽⁵⁾.

Llewellyn identificou que 80% das falhas em aços do sistema de exaustão foram causadas por corrosão e os 20% restante por fadiga⁽⁶⁾.

Otimizando o desempenho em corrosão, a fadiga torna-se o modo de falha predominante dentre os aços inoxidáveis.

A corrosão-fadiga é um mecanismo encontrado onde existe uma interação de carregamento cíclico e ações químicas/eletroquímicas ocorrendo simultaneamente, sejam elas: água natural, ar úmido (umidade) e outro meio ativo⁽⁸⁻¹¹⁾.

A concentração do agente ativo, a temperatura e as condições eletroquímicas estão entre os fatores mais importantes na corrosão-fadiga, juntamente com o carregamento mecânico cíclico⁽⁸⁾.

Uhlig fez uma análise no aço carbono AISI 1015 e verificou que seu limite de fadiga em um meio corrosivo desaerado em soluções aquosas contendo 3%NaCl (em peso), é o mesmo que o seu limite de fadiga ao ar. Com a aeração, a velocidade de corrosão é 100X mais intensa, levando a uma queda significativa no limite de fadiga⁽⁷⁾.

A presença de um meio gasoso reduz fortemente a duração da vida em fadiga do metal. O motivo deve-se à adsorção de átomos de oxigênio na superfície metálica, reforçando a irreversibilidade do deslocamento. Outra teoria propõe a formação de um filme de óxido impedindo a saída das discordâncias na superfície livre. Sob o carregamento cíclico, as lacunas e os vazios afloram e, finalmente, promovem o aparecimento das trincas⁽⁷⁾.

Para o caso de meio gasoso, os materiais metálicos são susceptíveis à fadiga-corrosão em gases ricos em hidrogênio e vapor d'água⁽⁷⁻¹¹⁾.

As variáveis que caracterizam a atividade das espécies químicas são⁽⁷⁾:

- O pH da solução influencia fortemente na velocidade de propagação da trinca de fadiga-corrosão;
- Meio gasoso: pressão e pureza;
- Eletrólitos: pH, composição, potencial do eletrodo, movimento da solução;
- Temperatura: é um parâmetro importante para o meio corrosivo, uma vez que muitos mecanismos químicos são ativados termicamente;
- Meio aquoso: a aplicação de um potencial catódico equivale a reduzir os íons H_3O^+ sobre o metal, formando desta maneira, átomos de hidrogênio adsorvidos que difundem no material e o fragilizam. No que relaciona a um potencial anódico, sua geração não se produz por densidades de corrente de corrosão inferiores a um valor crítico. Isto é verificado no modelo de ruptura/repassivação de filme de óxido.

A frequência de carregamento influencia o transporte do agente ativo e o processo de acúmulo de danos. Em corrosão-fadiga, é usual trabalhar com os

efeitos inerentes ao trincamento de corrosão sob tensão em um carregamento sustentado e ao dano devido ao carregamento cíclico⁽⁸⁾.

Nesse trabalho, o comportamento em corrosão-fadiga de cinco aços inoxidáveis ferríticos – 409A, 430E, 439A, 441A e F17T – utilizados na indústria automotiva foram estudados. Ensaios de fadiga com carregamentos axiais de amplitude constante foram realizados e os resultados expressados em termos de curvas de fadiga S-N.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais estudados são aços inoxidáveis ferríticos estabilizados com diferentes teores de titânio e nióbio. A Tabela 1 mostra a composição química e a espessura destes aços.

Tabela 1: Composição química e espessura dos aços inoxidáveis ferríticos.

Aço	Cr (%)	Ti (%)	Nb (%)	Mn (%)	C+N (ppm)	ΔTi	ΔNb	Espessura (mm)
P409A	11,35	0,134	0,021	0,131	192	0,06	-	1,535
P439A	17,05	0,196	0,194	0,120	235	0,14	0,14	1,556
P430E	16,23	0,011	0,356	0,239	399	-	0,05	1,563
P441A	18,06	0,133	0,563	0,149	225	0,09	0,49	1,459
F17T	16,18	0,452	0,011	0,339	316	0,34	-	1,408

A nomenclatura “P” indica que os aços foram produzidos na ACESITA S/A (Brasil) enquanto que “F” é associado ao aço da empresa francesa Ungine/ARCELOR.

Os valores de ΔTi e ΔNb representam a quantidade desses elementos em solução sólida e são obtidos através de equações estequiométricas. Dependendo do tipo de estabilização (Ti, Nb ou Ti+Nb), existe uma equação específica:

$\Delta Ti = Ti - 3,42 N - 4 C$	Grau de estabilização Ti (P409A e F17T)
$\Delta Nb = Nb - 7,74 (C+N)$	Grau de estabilização Nb (P430E)
$\Delta Ti = Ti - 3,42 N - (0,30 \times 4C)$	Grau de estabilização Ti+Nb (P439A e P441A)
$\Delta Nb = Nb - (0,70 \times 7,74C)$	Grau de estabilização Ti+Nb (P439A e P441A)

A Figura 2 apresenta uma amostra de corpos-de-prova de corrosão-fadiga que foram confeccionados de acordo com as normas da ASTM E466-96. Estes corpos-de-prova são os mesmos comumente utilizados para ensaios de fadiga ao ar.



Figura 2: Amostra de corpo-de-prova para ensaios de corrosão-fadiga. Comprimento = 200 mm; largura = 12,7 mm.

O meio corrosivo utilizado nos ensaios está apresentado na Tabela 2. Trata-se de um condensado sintético que simula os gases do sistema de exaustão do veículo automotivo.

Tabela 2: Composição química do meio corrosivo - condensado sintético (ppm).

SO_4^{2-}	NH_4^+	NO_3^-	Cl^-	pH
740	450	60	270	3,0

Os ensaios de corrosão-fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica INSTRON de 25 toneladas (Figura 3). A frequência de trabalho nos experimentos foi de 30Hz. O fator R utilizado foi igual a 0,1.

A montagem feita para simular a atmosfera corrosiva foi composta dos seguintes equipamentos:

- Uma bomba de circulação do condensado sintético da marca MOTRON (modelo: MR210 – Ver 240; 240RPM; P = 144 W; V = 24 Vcc);
- Uma resistência da marca QUIMIS (modelo: Q321A25; V 220; W 315) para aquecimento do condensado (temperatura de ensaio = 70°C);
- Um condensador para minimizar a perda do condensado e da sua qualidade (mudança de pH pela evaporação da solução).

O condensado circulava numa célula de PVC que continha o corpo-de-prova. A célula foi totalmente vedada para otimizar as condições de ensaio.

Para realizar os ensaios foi determinado à priori o número de CPs para cada aço e seus respectivos níveis de carregamento. Foram realizados dez ensaios por aço sendo que cinco deles foram em níveis de 75% do limite de resistência (σ_{UTS}) e o restante em níveis de 90% do σ_{UTS} .



Figura 3: Máquina servo-hidráulica Instron, 25t; sistema para ensaios de corrosão-fadiga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar as propriedades mecânicas dos aços estudados foram realizados ensaios de tração. As curvas de tensão-deformação obtidas dos ensaios de tração para os aços na direção longitudinal estão apresentadas na Figura 4.

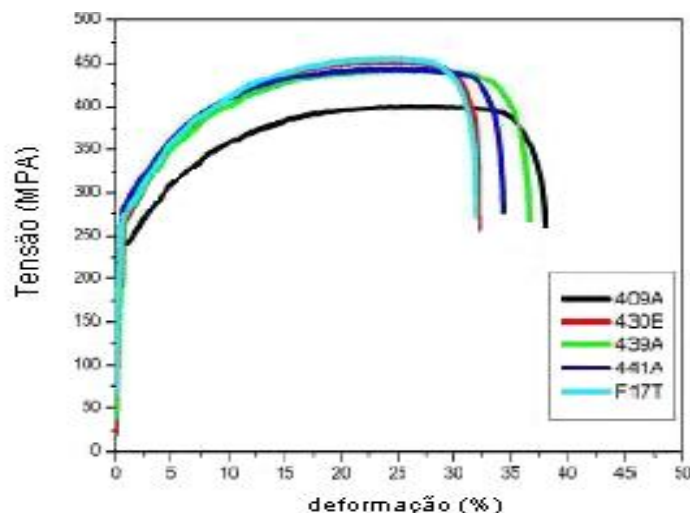


Figura 4: Curvas de tensão *versus* deformação dos aços inoxidáveis ferríticos.

A Tabela 3 apresenta algumas propriedades mecânicas obtidas dos aços.

Nota-se através da Figura 4 e a Tabela 3 que os aços apresentam comportamento mecânico semelhante, com exceção do aço P409A que é menos resistente.

A Tabela 4 apresenta o tamanho de grão médio dos cinco aços inoxidáveis ferríticos estudados. A medida foi feita no sentido de laminação.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis estudados.

Aço	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	$\Delta L/L_0$ (%)
P409A	240	401	34
P439A	278	437	34
P430E	259	449	31
P441A	284	443	35
F17T	275	453	30

σ_{YS} – limite de escoamento; σ_{UTS} – limite de resistência

Tabela 4: Medida do tamanho de grão dos aços inoxidáveis ferríticos (μm).

P409A	P439A	P430E	P441A	F17T
30,5	49,4	14,5	64,3	16,5

Foram realizadas análises microestruturais no sentido longitudinal e transversal. Os resultados obtidos indicaram a ausência de uma maior tendência à anisotropia. A Figura 5 (a,b,c,d,e) mostra os aços estudados vistos na direção transversal. Foi utilizado o reativo Vilela para revelar as microestruturas.

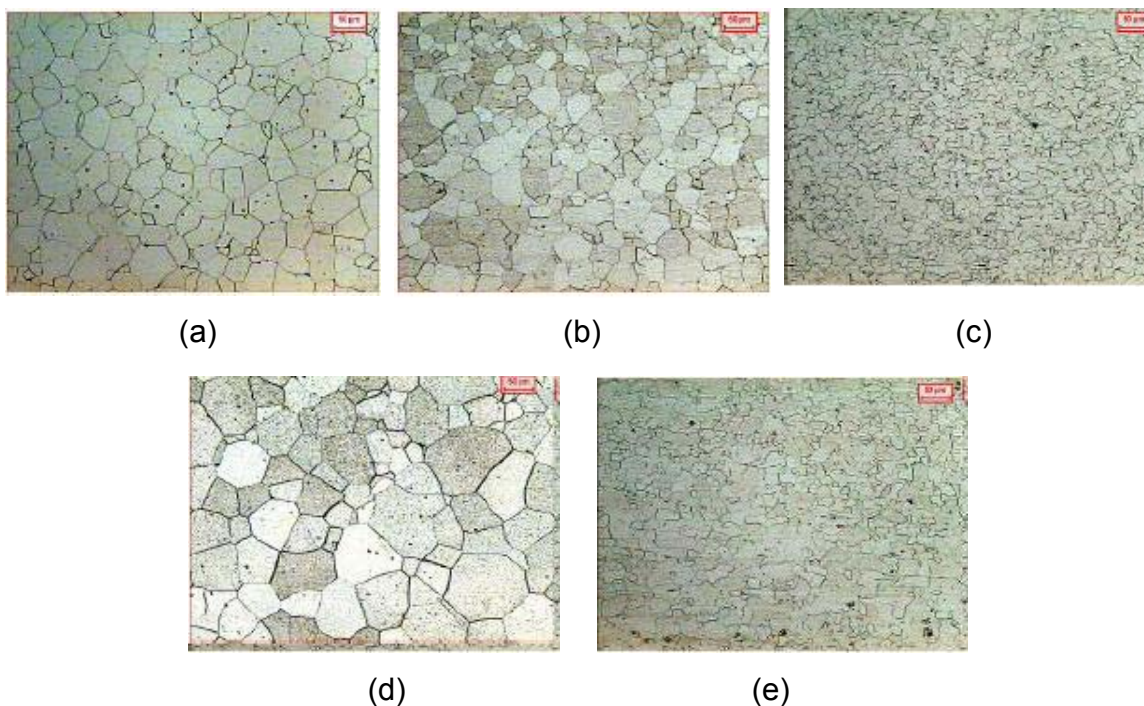


Figura 5: Microestruturas dos aços inoxidáveis ferríticos, direção transversal, reagente Vilela. 200X. (a) P409A; (b) P439A; (c) P430E; (d) P441A; (e) F17T.

As Figuras 6-9 mostram resultados dos ensaios de fadiga ao ar e de corrosão-fadiga, através de Curvas de Wöhler.

As curvas das Figuras 6 e 7 indicam duas tendências distintas, colocadas desta forma para evidenciar a diferença de comportamento por fadiga entre os aços. Destaca-se o melhor comportamento para os aços P430E e P441A. Embora a composição química e a resistência mecânica à tração pudessem indicar um melhor desempenho por fadiga também para o aço P441A, tal fato não ocorreu, devido ao maior tamanho de grão deste aço.

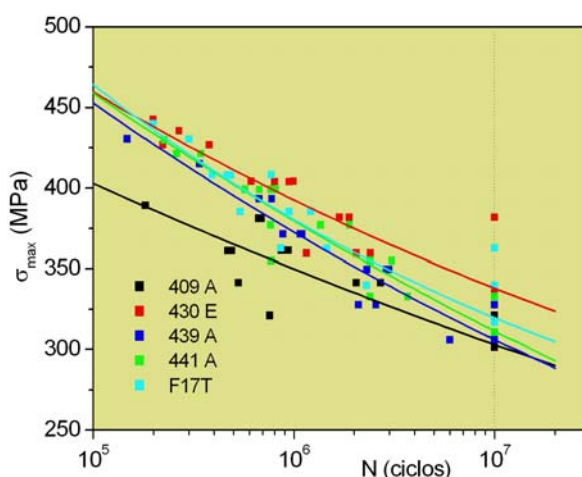


Figura 6: Curvas de Wöhler para os aços inoxidáveis com ajustes logarítmicos; ensaios ao ar, R = 0,1.

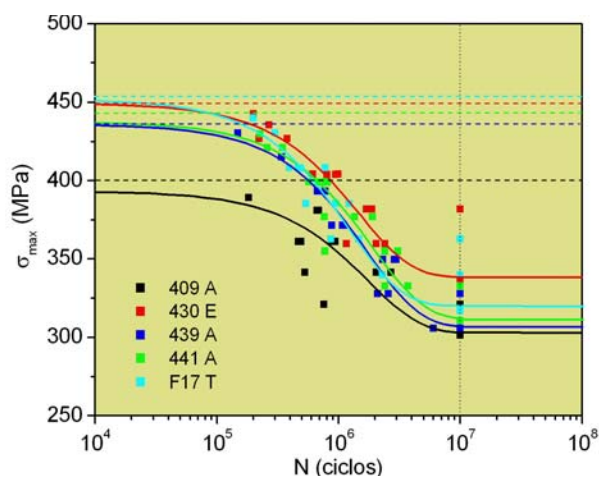


Figura 7: Idem à Figura 6, mas com ajustes exponenciais nas curvas.

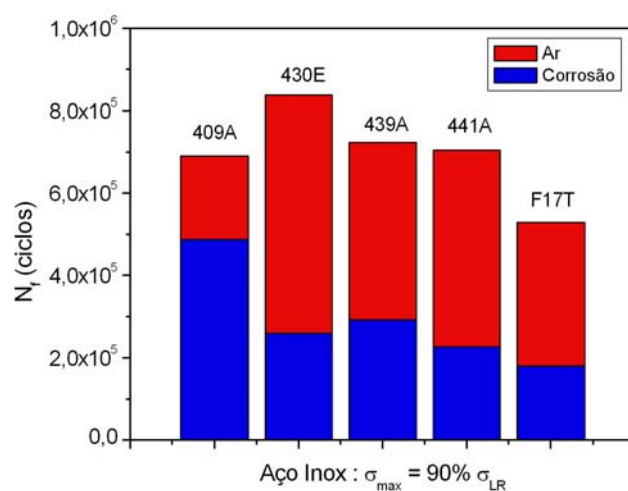


Figura 7: Vida em fadiga para os aços inoxidáveis analisados ensaiados numa tensão máxima correspondente 90% do limite de resistência.

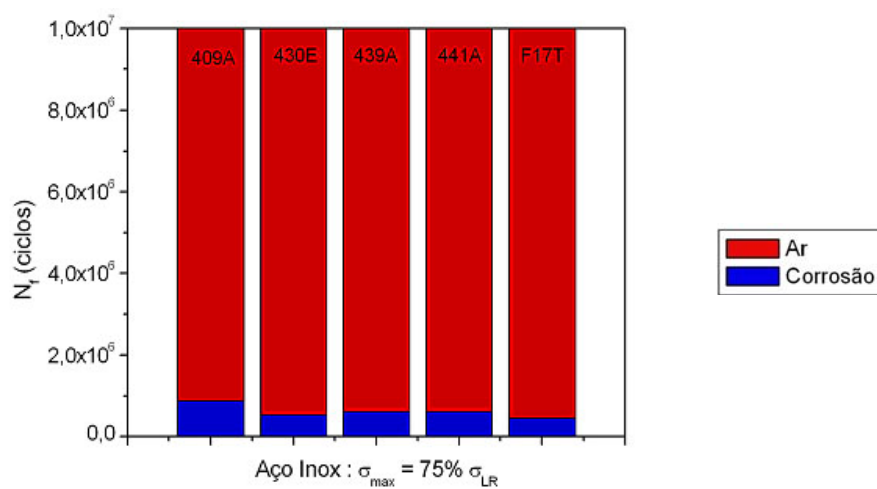


Figura 8: Idem à Figura 7, mas com 75% do limite de resistência.

Nota-se na Figura 7, para níveis de carregamento relativamente elevados, surpreendentemente o aço P409A apresentou maior vida em corrosão-fadiga, embora seja uma liga mais simples. Este comportamento também foi observado para carregamento máximo de 75% do limite de resistência.

CONCLUSÕES

- Os aços inoxidáveis analisados apresentaram comportamento mecânico semelhante em tração, exceto o aço P409A;
- As Curvas de Wöhler mostraram tendências de comportamento dos diferentes aços, com melhores desempenhos para os aços P430E e P441A;
- Embora o aço P441A seja mais nobre em relação aos demais aços, em decorrência do maior tamanho de grão, o mesmo apresentou relativamente baixo desempenho em fadiga. O maior tamanho de grão deve ser em função do tratamento térmico aplicado;
- O aço P409A apresentou melhor desempenho em corrosão-fadiga para os dois níveis de carregamentos empregados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a ACESITA S/A e Ungine &ALZ pelas doações dos aços inoxidáveis ferríticos e pelo suporte técnico e financeiro, além da Fundação Gorceix.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) DOUHETT, J. A., "Designing stainless exhaust systems", Automotive Engineering, Novembro de 1995, pp. 45-49.
- 2) SCHMITT, J.H., 2002, "Some examples of stainless steel use in the automotive industry", Key Engineering Materials, Vols. 230-232, pp. 17-22.
- 3) KAWASAKI STEEL, 2001, "An introduction to iron and steel processing, www.kawasaki-steel.co.jp
- 4) GORDON, W.; BENNEKOM, A., 1996, "Review of stabilization of ferritic stainless steels", Materials Science and Technology, Vol.12, pp. 126-131.
- 5) PICKERING, F.B., 1979, "The physical metallurgy of 12% chromium steels", The Metallurgical Evolution of Stainless Steels, ASM, pp. 1-42.
- 6) LIEWELLYN, D.T., 1994, "Steels – Metallurgy and Applications", Butterworth-Heinemann Ltd., pp. 295-297.
- 7) BATHIAS, C.; BAÏLON, J. P. Influence de l'environnement. La fatigue des matériaux et des structures. Pág. 387-423. Editora Hermes. Volume 2. 1997.
- 8) BOLOTIN, V. V. Environmentally affected fatigue and related phenomena. Mechanics of Fatigue. Pág. 317-350. Editora CRC Press. Volume I. 1999.

- 9) ALVES, H. J. B. et al Development of ferritic stainless steels for automotive exhaust systems. 4TH European Stainless Steel. Junho de 2002. Paris, França.
- 10) CHASSAGNE, F. et al Development of a Nb stabilised 15% Cr ferritic stainless steel for the hot part of automotive exhaust system. 4TH European Stainless Steel. Junho de 2002. Paris, França.
- 11) MATIAS, A. et al Desenvolvimento de técnica para ensaio de corrosão fadiga em tubos de aço inoxidável. 57^o Congresso Anual ABM 2002. Julho de 2002. São Paulo – SP.

CORROSION-FATIGUE BEHAVIOR OF FERRITIC STAINLESS STEELS USED IN EXHAUST SYSTEMS

ABSTRACT

In this research, the fatigue behavior of five ferritic stainless steels – 409A, 430E, 439A, 441A and F17T – used in the automotive industry has been studied. These steels are candidates for use in exhaust systems. The main difference of the steels is the content of Nb and Ti as alloy elements. Constant axial load amplitude fatigue tests were performed under a stress ratio of $R = 0.1$. Testing frequency was 30Hz. The experiments were performed in a corrosion atmosphere, where a sintetic condensate (pH = 3,0) simulating the automotive's exhaust system gases was used. A comparative between the five ferritic stainless steels was made using the Wöhler's curves (S-N). Results showed that the fatigue resistance of the 430E steel stabilized with Nb was superior among the other steels. The fatigue-corrosion resistance of the 409A steel was superior among the other steels.

Key-words: Fatigue-corrosion; ferritic stainless steels; exhaust systems.