

ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE FADIGA EM MATERIAIS PARA DUTOS API 5L X60

Bruno Allison Araújo¹ (UFCG), Antonio Almeida Silva² (UFCG), Marconi Andrade Farias³ (UFCG)

¹ UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: bengmec@hotmail.com

² UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br

³ UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: marconiaf@yahoo.com.br

Resumo. O processo de corrosão aliada à fadiga, decorrente de esforços repetitivos de várias naturezas, é um dos responsáveis pelos danos em dutos e estruturas “offshore”, que podem trazer como consequência grandes prejuízos financeiros e/ou ambientais. Este fenômeno conhecido como corrosão-fadiga, porém, é bastante complexo, e apresenta um quadro com mais dúvidas que explicações, principalmente, no que diz respeito à forma como este se desenvolve na estrutura. No ensaio convencional de fadiga, geralmente, se utilizam máquinas servo-hidráulicas ou máquinas de flexão rotativa que ensaiam somente um corpo-de-prova por vez. Para os ensaios de corrosão-fadiga, seriam necessários vários ensaios simultâneos para se ter uma massa crítica de resultados, o que resultaria em altos custos com a aquisição destas máquinas e um longo tempo de realização dos ensaios. Portanto, foi desenvolvida uma concepção de máquina que realiza ensaios de fadiga em múltiplos corpos-de-prova simultaneamente, com a possibilidade de se integrar um meio agressivo (ex. ambiente marinho) através de células-de-corrosão, a fim de obter resultados consistentes, menos sujeitos a erros de dispersão e com baixo custo. O objetivo deste trabalho é apresentar alguns resultados de ensaios realizados em materiais de dutos (Aço API 5L X60) e extrair parâmetros de fadiga que servirão de base para estimativa da vida-útil de estruturas sob cargas cíclicas, sujeitas às condições de corrosão-fadiga. São apresentados resultados de testes de fadiga em corpos-de-prova sob flexão repetida onde se apresentam curvas de fadiga sem e com corrosão, visando comparar com resultados da literatura bem como verificar até onde é aplicável para ensaios de longa duração.

Palavras-chave: Ensaios de fadiga, corrosão-fadiga, corpos de prova, dutos e estruturas.

1. INTRODUÇÃO

A realização de ensaios de materiais sob fadiga em condições ideais, simulando fenômenos acoplados de corrosão de baixo ciclo, demandam tempos longos, podendo ultrapassar dois anos para frequências de carregamento da ordem 0,2 a 4 Hz (situação mais crítica do efeito corrosivo em estruturas *offshore*). Também a utilização de máquinas servo-hidráulicas apresenta diversas limitações como custo elevado de operacionalização, contaminação pelo meio corrosivo, além de só permitir ensaiar um corpo de prova por vez. Considerando estas limitações e a necessidade de desenvolvimento de uma máquina de baixo custo operacional para ensaiar múltiplos corpos de prova, foi desenvolvida uma nova concepção baseada num protótipo anterior (Farias e Strohaecker, 1998) que permite realizar ensaios de flexão repetida em até 12 corpos de prova, simultaneamente, com boa flexibilidade para ajuste de cargas e frequência de carregamento e a possibilidade de simular ambiente agressivo através de células de corrosão.

O presente trabalho apresenta uma concepção de máquina com o objetivo de realizar ensaios e testes experimentais de corrosão-fadiga em múltiplos corpos de prova obtidos de estruturas de dutos ou plataforma *offshore*, onde busca-se avaliar o desempenho da máquina em várias condições e regimes de trabalho e avaliar os resultados de testes experimentais preliminares de corpos de prova sujeitos ao processo de fadiga visando testar a sua robustez e flexibilidade em ensaiar corpos de prova sob condições adversas tais como flexão repetida e ação do ambiente corrosivo (Silva, 2006; Araújo, 2007).

2. REVISÃO SOBRE O PROCESSO DE FADIGA E CORROSÃO-FADIGA

2.1. Fadiga

Fadiga corresponde a mudança estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre em matérias sujeitos a tensões e deformações flutuantes, as quais resultam em trincas após um número de suficiente de ciclos de carregamento.

Para que a falha por fadiga aconteça é necessário a ação simultânea de tensões tratativas, tensões cíclicas e deformação plástica. As tensões cíclicas iniciam as trincas e as tensões tratativas promovem o seu crescimento ou a sua propagação (Albuquerque, 2004).

2.2. A Curva S-N

O método básico de apresentação de dados experimentais de fadiga dos materiais metálicos é através da curva S-N, onde é lançada em gráfico a tensão S contra o número de ciclos N necessários para a fratura. Normalmente emprega-se uma escala logarítmica para N, conforme ilustra a Figura 1. Pode-se notar que estas curvas estão relacionadas principalmente com falhas de fadiga para números grandes de ciclos ($N > 10^5$ ciclos). Para tensões maiores, a vida em fadiga decresce progressivamente, mas a deformação generalizada torna difícil a interpretação em termos de tensão. Para a região de fadiga em baixo ciclo ($N < 10^4$ ciclos), os ensaios são conduzidos com ciclos controlados de deformação elástica mais plástica, em vez de ciclos de tensão ou cargas controlados.

Um procedimento usual para determinação de uma curva S-N consiste em se testar o primeiro corpo de prova a uma tensão na qual se espera que ocorra fratura num número de ciclos bastante pequeno, por exemplo, cerca de dois terço do limite de resistência estático do material. A tensão do ensaio é diminuída gradativamente para cada corpo de prova que se sucede, até que uma ou duas amostras não se rompam no número de ciclos especificado, geralmente 10^7 ciclos. A maior tensão para a qual não se verifica fratura é considerada o limite de fadiga do material.

Geralmente, a curva S-N é determinada com 10 ou 12 corpos de prova, observando-se uma dispersão razoável nos resultados experimentais, embora seja possível o traçado de uma curva suave abrangendo os pontos obtidos. No entanto, se vários corpos de prova forem ensaiados à mesma tensão, poderá ocorrer grande dispersão nos valores observados do número de ciclos para a fratura, dispersão esta que chega a atingir uma ordem de grandeza na escala logarítmica entre os valores máximos e mínimos.

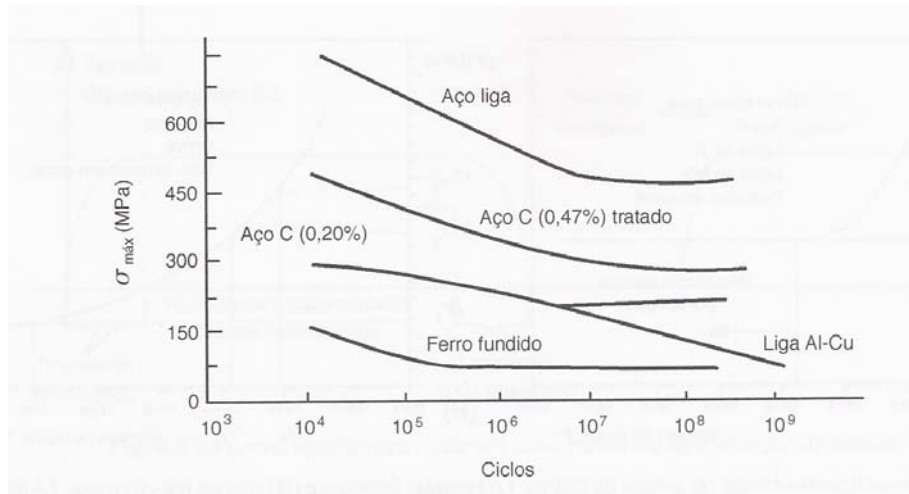


Figura 1. Curvas S-N do ensaio de fadiga para metais ferrosos e não-ferrosos. Fonte: Garcia et al. (2000).

2.3. Fadiga de Baixo ciclo

Embora os estudos de fadiga estejam relacionados com condições de serviço nas quais a falha ocorre para ciclos de tensão superiores a 10^4 , existe um crescente interesse quanto a falhas por fadiga que ocorrem para tensões relativamente altas e baixo número de ciclos. Este tipo de problema deve ser considerado nos projetos de vaso de pressão para a indústria nuclear, turbinas a vapor e na maioria dos outros equipamentos da maquinaria mecânica. As condições para ocorrer fadiga de baixo-ciclo são frequentemente criadas quando as tensões repetidas são de origem térmica. Uma vez que as tensões térmicas devem-se à expansão e à contração térmica do material, podemos verificar facilmente que neste caso a fadiga resulta de deformação cíclica em vez de tensão cíclica (Ramos et al, 2002).

2.4. Corrosão-Fadiga

A ação simultânea de tensões cíclicas e ataque químico é conhecida como fadiga por corrosão ou corrosão-fadiga. O ataque corrosivo sem tensão imposta produz, muitas vezes, o aparecimento de pites nas superfícies dos metais. Os pites atuam como entalhes e causam a redução da resistência à fadiga. No entanto quando o ataque corrosivo ocorre simultaneamente com o carregamento em fadiga, há uma redução das propriedades do material, redução esta que é maior do que a produzida pela corrosão prévia da superfície (Figura 2).

Quando corrosão e fadiga atuam simultaneamente, o ataque químico acelera muito a taxa de propagação das trincas de fadiga. Os materiais que apresentam um limite de fadiga definido quando ensaiados ao ar na temperatura ambiente não apresentam a mesma indicação do limite de fadiga quando o ensaio é realizado em meio corrosivo. Uma vez que o ataque corrosivo é um fenômeno que depende do tempo, quanto mais rápido for o ensaio menor será o dano devido à corrosão. Os ensaios de fadiga por corrosão podem ser realizados de duas maneiras. O método usual consiste em submeter o corpo de prova, continuamente, às influências combinadas de corrosão e tensão cíclica, até que ocorra ruptura. No ensaio de duplo-estágio, o ensaio de fadiga é interrompido após um determinado período e o dano introduzido é avaliado através da determinação da vida restante, ao ar.

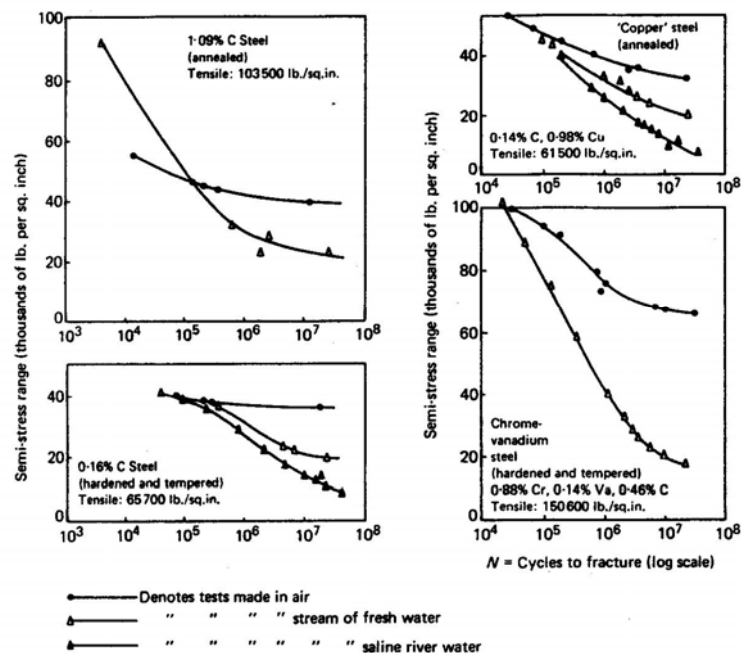


Figura 2. Curvas de corrosão-fadiga para diferentes aços em diferentes ambientes. Fonte: Boyer (1986).

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais e instrumentação utilizados

Para a realização dos ensaios de fadiga, utilizou-se a concepção de máquina desenvolvida na UFCG (Figura 3a). Esta possui um sistema de acionamento por motor elétrico e ajuste de velocidades por polias sincronizadas, que aciona o eixo principal montado em mancais de rolamentos contendo 06 (seis) cames cilíndricas ajustáveis que permite selecionar as flechas e/ou carregamento a serem aplicadas aos corpos de prova, conforme detalhes do sistema de ajuste da deflexão por came rotativo e verificação das flechas por relógio comparador (Figura 3b).

Os corpos de prova são fixados numa de suas extremidades através de suportes aparafusados em 02 (dois) conjuntos de torres inferior e superior, o que permite testar até 12 (doze) amostras simultaneamente. Também possui um contador de horas de funcionamento e todo o processo é monitorado por um sistema de aquisição de dados para o controle das cargas e deformações (SPIDER8 e Catman 4.5) acoplado a um microcomputador.

Além da máquina desenvolvida, para os procedimentos de calibração e testes de fadiga foram utilizados neste trabalho os seguintes materiais e instrumentos abaixo relacionados:

- 13 corpos de prova de Aço API 5L X60, obtidos a partir de um tubo na direção longitudinal;
- 10 blocos padrões com pesos de cerca de 3,0 kgf cada um;
- Um tirante para sustentação dos blocos com massa de 1,6 kg;
- Um relógio comparador MITUTOYO com precisão de 0,01mm;
- Um foto-tacômetro digital MINIPA, para monitoramento da rotação do eixo;
- Um sistema de aquisição de dados de 8 canais - SPIDER (HBM) 600 Hz;
- Um programa para processamento dos dados - CATMAN 4.5;
- Strain gages (Excel PA-06-250BA-120LEN) - gage resistance: 120 ohm, gage factor: 2.09;
- Ferramentas diversas de bancada e acessórios.



Figura 3. Máquina de fadiga desenvolvida. (a) Vista geral do conjunto; (b) Detalhes do sistema de acionamento e ajuste das cargas de flexão por came cilíndrica rotativa. Fonte: Silva (2006).

3.2. Medidas da deformação no ponto de tensão máxima do corpo de prova (com extensometria).

A tensão máxima que surge numa viga engastada (Figura 4), é dada pela equação: $\sigma_{\max} = M c / I_z$

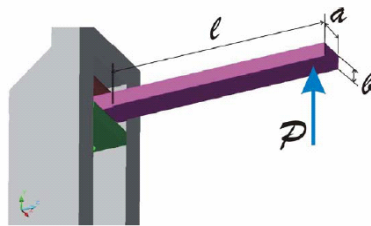


Figura 4. Detalhe da fixação do corpo de prova - barra engastada.

Considerando que os corpos de prova apresentam as seguintes dimensões:

$$a = 19,5 \text{ mm}; b = 10 \text{ mm}; l = 122 \text{ mm}; c = b/2.$$

Através de modelos matemáticos clássicos (Beer & Johnston, 1995), obtém-se o momento fletor e o momento de inércia do corpo de prova em estudo.

$$M = Pl \text{ (momento fletor);}$$

$$I_z = a b^3 / 12 \text{ (Momento de inércia).}$$

Sabe-se que a tensão pode ser dada por: $\sigma = \varepsilon E$. Como se considera que o material trabalha no regime elástico, pode-se fazer a seguinte dedução:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \sigma_{\max} \Rightarrow E \cdot \varepsilon = \frac{M \cdot c}{I_z} \Rightarrow E \cdot \varepsilon = \frac{P \cdot l \cdot \frac{b}{2}}{\frac{1}{12} a \cdot b^3}, \text{então; } P = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot a \cdot b^2}{6 \cdot l}$$

Portanto, de posse das deformações obtidas através do sistema de aquisição de dados, pode-se calcular o carregamento. Neste caso também se verifica se o sensor está com adequada configuração, para medir as cargas e estimar a tensão atuante pela lei de Hooke.

3.3. Ensaio de fadiga

Como metodologia para escolha do nível de tensões aplicadas deve-se seguir as recomendações de fabricantes e normas. Souza (1982), recomenda que os carregamentos de fadiga não devem ultrapassar cerca de 2/3 do limite de resistência à tração do material. Se espera que numa primeira fase os corpos de prova possam iniciar o processo de fadiga com um número de ciclos pequeno. Em seguida, diminui-se gradativamente as cargas até que se atinja um número de ciclos razoável e compatível com os ensaios convencionais de fadiga.

Para fins de planejamento experimental, e visando obter resultados satisfatórios sobre o limite de resistência à fadiga do AÇO API X60, foi utilizada a seguinte expressão:

$$N^{\circ} \text{ de ciclos} = \text{freqüência de carregamento} \times 60(\text{segundos}) \times 60(\text{minutos}) \times \text{total de horas}$$

Como o número de ciclos que se deve atingir é de 10^7 e a freqüência de carregamento é de 10,28 Hz, isso dá um tempo de experimento da ordem de:

$$\text{Total de horas} = 10^7 / (10,2833 \times 60 \times 60) = 270,1243447 \text{ horas}$$

Portanto, com o equipamento funcionando 24 h/dia, seriam necessários cerca de 11,255 dias para atingir esta meta. Porém, na prática o funcionamento médio diário foi da ordem de 12 h/dia o que duplicou o tempo de ensaios nestas condições de testes.

4. RESULTADOS

4.1. Propriedades e especificações dos materiais

Antes de realizar os ensaios de fadiga dos materiais faz-se necessário conhecer propriedades importantes para o domínio de qualquer atividade sobre o mesmo. As propriedades mecânicas do aço API 5L X60 foram obtidas de comunicação Técnica do CENPES (Pope *et al.*, 1995) e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades e especificações dos materiais (Aço API 5L-X60).

Tensão de escoamento à tração	459,9 MPa
Tensão de ruptura à tração	604,56 MPa
Módulo de elasticidade	207 GPa
Alongamento (%)	37,33

4.2. Verificação da deformação do material para o controle das cargas

Na metodologia adotada as deformações foram obtidas através de *strain-gages* e de posse delas, calculadas as máximas tensões que surgem durante o carregamento, usando uma fórmula de conversão no ambiente de tabelas Excel. A Tabela 2 apresenta alguns resultados das deformações teóricas e medidas em ensaios de calibração estáticos, utilizando-se um carregamento crescente das massas, seguido de descarregamento gradual.

Tabela 2. Deformações obtidas no ponto de tensão máxima, comparadas com a teórica.

Cargas (Kg)	Tensões (MPa)	Deformação teórica (micros)	Deformação medida (micros)	Erro percentual %
4,73	17,64	83,85	60	28,45
7,77	29,00	137,84	110	20,20
10,85	40,48	192,40	162	15,80
13,92	51,94	246,87	214	13,32
17,00	63,43	301,50	268	11,11
19,99	74,57	354,44	318	10,28
23,08	86,10	409,26	374	8,62
26,08	97,28	462,38	428	7,44
29,21	108,97	517,93	480	7,32
32,28	120,42	572,35	531	7,22

A partir da Tabela 2 nota-se que os erros apresentados são decrescentes à medida que os carregamentos vão aumentando. Na condição de carga máxima, que simula uma tensão da ordem de 120 MPa, obteve-se erros da ordem de 7%. Como as cargas previstas para as condições reais de teste estão em níveis superiores aos testados (300 a 500 MPa), é de se esperar que esse erro seja minimizado para ordem de 5% ou menos.

Deve-se observar que para se manter o controle das cargas a que os corpos de prova estarão sendo submetidos, é preciso que se tenha um bom sistema de aquisição de dados e que se tenha domínio dos parâmetros e condições impostas nos ensaios. Para a calibração do sistema, foram feitos ensaios estáticos já se conhecendo as deformações resultantes (através de expressões matemáticas) a fim de compará-las, como ilustrado na Figura 5, para se ter certeza sobre a configuração do programa e outros parâmetros envolvidos.



Figura 5. Ensaio de deformação do corpo de prova (calibração estática).

4.3. Resultados de Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram divididos em 2 etapas, sendo que na primeira foram ensaiados 6 corpos de prova sob carregamentos mais elevados, e na segunda mais 6 corpos de prova sujeitos a carregamentos gradualmente decrescentes. Outros dois corpos de prova foram ensaiados separadamente, apenas para dá maior consistência nos resultados. Na Tabela 3 encontram-se os valores das flechas e deformações médias que os corpos de prova foram submetidos, para fins de estimativa da vida útil dos corpos de prova testados.

Tabela 3. Flechas adotadas e deformações medidas para os corpos de prova testados.

Corpos de prova	Flechas (mm)	Deformação (micros)
cp1	5,12	1960
cp2	5,10	1850
cp3	5,82	2605
cp4	5,00	1650
cp5	5,10	2332
cp6	5,12	1960
cp7	3,73	1442
cp8	4,30	1492
cp9	4,26	1467
cp10	4,05	1398
cp11	5,00	1726
cp12	5,10	1776
cp13	5,12	2368
cp14	5,10	1960

A partir destes dados, obtém-se as tensões calculadas através da lei de Hooke, juntamente com o número de ciclos atingidos pelos corpos de prova até a fratura (Tabela 4).

Tabela 4. Número de ciclos suportados pelos corpos de prova sem corrosão até a fratura.

Corpos de prova	Tensões (MPa)	Nº de Ciclos até a fratura	Nº de ciclos (arredondado)
cp1	490,17	116983,16	$1,16 \times 10^5$
cp2	467,40	1041868,76	$1,04 \times 10^6$
cp3	539,23	207200,00	$2,072 \times 10^5$
cp4	409,03	1335469,76	$1,33 \times 10^6$
cp5	482,72	302000,00	$3,02 \times 10^5$
cp6	410,25	359934,90	$3,59 \times 10^5$
cp7	297,17	3964464,00	$3,96 \times 10^5$
cp8	294,99	10100000,00	$1,01 \times 10^7^*$
cp9	312,07	10100000,00	$1,01 \times 10^7^*$
cp10	304,46	10100000,00	$1,01 \times 10^7^*$
cp11	355,69	3389542,00	$3,38 \times 10^6$
cp12	365,85	2458042,00	$2,45 \times 10^6$
cp13	490,17	240000,00	$2,40 \times 10^5$
cp14	467,40	272000,00	$2,72 \times 10^5$

A Figura 6 mostra alguns corpos de prova rompidos por fadiga, onde pode-se perceber que as fraturas ocorreram sempre na região de maior tensão, e na direção perpendicular ao carregamento, conforme esperado. Observa-se ainda através da Tabela 4 que alguns corpos de prova* atingiram um limite de 10^7 ciclos e não romperam por fadiga. Isto significa que para estes níveis de tensões a curva tende a se manter constante, e abaixo destas, teoricamente, os corpos de prova não romperiam nestas condições de testes.



Figura 6. Corpos de prova rompidos após os ensaios de fadiga.

4.4 Resultados de Ensaios de Corrosão-Fadiga

Os ensaios de corrosão-fadiga foram realizados nas mesmas condições de tensões que os ensaios de fadiga, porém com frequência de carregamento reduzida para cerca da metade. Nas células de corrosão utilizou-se uma solução salina de água destilada com 3%, em peso, de NaCl, condição esta em que a taxa de corrosão é mais intensa (Gentil, 2003).

A Figura 7 mostra alguns corpos de prova rompidos, onde nota-se que mesmo para os ensaios em laboratório com duração mais curta o efeito da corrosão foi bastante pronunciado.



Figura 7. Corpos de prova que romperam durante os ensaios de corrosão-fadiga.

A Tabela 5 mostra os números de ciclos suportados por cada corpo de prova com corrosão até a sua fratura, e seus respectivos valores aproximados.

Tabela 5. Número de ciclos suportados pelos corpos de prova com corrosão até a fratura.

Corpo de prova	Tensão (Mpa)	Número de ciclos até a fratura	Nº de ciclos (arredondado)
cp1	439,29	123105,60	$1,23 \times 10^5$
cp2	478,95	170011,80	$1,70 \times 10^5$
cp3	496,97	77311,80	$7,73 \times 10^4$
cp4	497,38	77311,80	$7,73 \times 10^4$
cp5	458,45	123105,60	$1,23 \times 10^5$
cp6	430,43	170011,80	$1,70 \times 10^5$
cp7	355,14	1059238,00	$1,06 \times 10^6$
cp8	288,40	1804700,00	$1,8 \times 10^6$
cp9	383,98	922485,20	$9,22 \times 10^5$
cp10	382,54	729851,00	$7,29 \times 10^5$
cp11	268,41	2664135,20	$2,66 \times 10^6$
cp12	320,74	965818,20	$9,65 \times 10^5$

De acordo com os dados obtidos experimentalmente foi possível construir um gráfico que apresenta as curvas S-N de fadiga e de corrosão-fadiga do material (Figura 8), onde os pontos representam os dados obtidos dos corpos de provas, enquanto a curva contínua de tendência foi construída a partir destes dados.

Analisando a curva superior dos ensaios de fadiga (pontos em tons rosa), e observando a parte final do gráfico como uma reta, pode-se concluir que o limite de fadiga para as condições de testes do Aço API 5L X60 ficou em torno de 310 MPa. Este resultado pode ser considerado satisfatório, pois segundo a literatura (Souza, 1982) o limite de fadiga de aços se encontra entre 35 e 50% do limite de resistência à tração. Neste caso, considerando o limite de resistência do material na Tabela 1 (604,56 MPa) o valor obtido foi de 51%, para as condições de testes impostas. Por outro lado, atingiu-se um total de 1×10^7 ciclos sem que 3 corpos de prova tenham se rompido.

Analisando a curva inferior dos ensaios de corrosão-fadiga (pontos em tons de azul), nota-se que foi possível verificar a severidade do efeito da corrosão. Pode-se perceber ainda, que quanto mais o tempo de ensaio aumenta, mais o efeito da corrosão vai se acentuando, já que em, aproximadamente, 1×10^5 ciclos a diferença de tensão de quebra entre um corpo de prova submetido ao ensaio de fadiga e outro submetido ao ensaio de corrosão-fadiga foi de 65 MPa e em, aproximadamente, 2×10^6 a diferença de tensão foi de 70 MPa entre um corpo de prova submetido ao ensaio de fadiga e outro submetido ao ensaio de corrosão-fadiga. Este fato já era esperado, pois a ocorrência de corrosão-fadiga deve-se à perda de resistência mecânica, provocada inicialmente pela redução localizada da espessura da parede (Margarido e Santos, 2002).

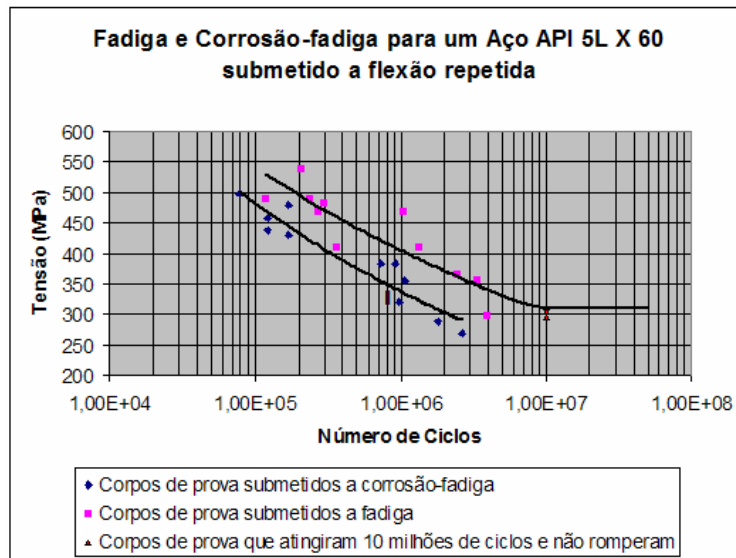


Figura 8. Curva comparativa de fadiga e de corrosão-fadiga de um Aço API 5L X60.

5. CONCLUSÕES

Podemos concluir que após os ensaios experimentais realizados com os corpos de prova o limite de fadiga por flexão repetida do aço API 5L X60 ficou em torno de 310 MPa, sendo considerado satisfatório pois se encontra na faixa prevista entre 35 e 50% do seu limite de resistência à tração conforme literatura (Souza, 1982).

Com relação aos corpos de prova que sob determinado carregamento quebraram antes de um corpo de prova com um carregamento menor, possivelmente, estes apresentavam algum defeito superficial (ex. pequenos riscos devido a imperfeições no acabamento superficial das amostras) o que acelerou o processo de fadiga. No entanto, em geral, os corpos de prova quebraram na ordem esperada, ou seja, os de maiores carregamentos suportaram um menor número de ciclos.

Com relação aos ensaios de corrosão-fadiga, podemos concluir que os números de ciclos suportados foram inferiores aos suportados no ensaio de fadiga, conforme curvas previstas na literatura (Boyer, 1986), mesmo considerando que o tempo de ensaio em laboratório tenha sido relativamente curto. Pode-se concluir ainda, que nos ensaios de corrosão-fadiga não se existe um limite de tensão ao qual o material nunca venha a falhar, pois a degradação do material e de suas propriedades é contínua nos ensaios de corrosão-fadiga.

Quanto ao desempenho da máquina que foi desenvolvida na UFCG (Silva, 2006), esta vem se comportando de forma bastante robusta e confiável, o que nos dá a garantia de que os próximos ensaios num ambiente mais severo de corrosão-fadiga, a mesma irá suportar de forma adequada. Alguns erros que podem ter ocorrido durante o processo de monitoramento são justificáveis, devido a fatores diversos como longo tempo dos ensaios e necessidade de pequenos ajustes nos carregamentos dos corpos de prova.

No tocante ao controle de cargas considera-se que foi realizado de forma satisfatória, ou seja, os carregamentos foram mantidos constantes durante a realização dos ensaios. Deve-se enfatizar que sempre que necessário, eram realizados pequenos ajustes para a manutenção dos mesmos níveis de carregamento original.

6. AGRADECIMENTOS

- À UAEM/UFCG através do uso dos Laboratórios de Instrumentação e Vibração, Ensaios Mecânicos de Materiais e Oficina mecânica;
- A colaboração da equipe do Prof. Dr. Carlos José de Araújo, da UAEM/UFCG.
- A colaboração do Engenheiro Neto e empréstimo do Sistema de Aquisição de dados SPIDER, gentilmente cedido pelo Prof. Dr. José Wallace B. Nascimento, da Engenharia Agrícola - UFCG.
- A ANP/PRH-25(UFCG) pelos recursos de bolsas e taxa de bancada disponibilizada.

7. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. C. S. **Comportamento à fadiga de juntas soldadas de tubulações marítimas tratadas pela técnica TIG dressing**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2004, 190p.

- ARAÚJO, B. A. **Resultados experimentais de ensaios de fadiga e corrosão-fadiga em aços API 5L X60**. Monografia de graduação (ANP/PRH-25/UFCG), Campina Grande-PB, 2007.
- BEER, F. P.; JOHNSTON JR, R. **Resistência dos materiais**. Tradução e revisão técnica - Celso Pinto Morais Pereira, 3ª edição. - São Paulo: MAKRON books, 1995.
- BOYER, E. H. **Atlas of Fatigue Curves**. Ohio, American Society for metals, 1986.
- CADAC - Cadastro de Acidentes Ambientais da CETESB (São Paulo). Disponível em www.cetesb.sp.gov.br
- EXCEL SENSOR. Disponível em www.excel.com.br
- FARIAS, M. A.; STROHAECKER, T. R. Desenvolvimento - concepção, viabilização e construção de uma máquina de ensaios, para múltiplos corpos de prova, em fadiga assistida pelo meio ambiente – Água do mar. **Anais do CONEM 2000**, Natal-RN, 2000.
- GARCIA, A., SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**, LTC – Editora, Rio de Janeiro-RJ – 2000.
- GENTIL, V. **Corrosão**, LTC Editora, Rio de Janeiro-RJ, 2003.
- HIPPERT JR, E. **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação das curvas de resistência $J\text{-}Ia$ para previsão de colapso em dutos**. Tese de Doutorado, USP - Escola Politécnica de São Paulo, 2004.
- MARGARIDO, M; SANTOS, F. A. **Influência da grafitação e fadiga-corrosão no rompimento de tubo de caldeira**. 6ª Conferência sobre tecnologia de equipamentos, 2002.
- POPE, A. M; SANTOS, V. R.; TEIXEIRA, J. C. G. et al.. Comunicação técnica nº111, Resistência à fratura do aço API 5L X60 e avaliação preliminar de trincas de Oleoduto PCE-1/Ponto A. **Serviço Técnico nº130/95-CENPES**, 1995.
- RAMOS et al.. **Curso de Análise de Falhas**. XXIII Semana da Engenharia Mecânica – Unesp – Ilha Solteira – 26 a 31/08/2002.
- SILVA, J. A. S. **Desenvolvimento e construção de uma bancada de testes para ensaios sob corrosão-fadiga em dutos e estruturas metálicas**. Monografia de graduação (ANP/PRH-25/UFCG), Campina Grande-PB, 2006.
- SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSIS OF FATIGUE TESTING SPECIMENS IN PIPELINES MATERIALS API 5L X60

Abstract. The process of allied corrosion to the fatigue, due to repetitive efforts of several natures, is one of responsible for the damages in pipeline structures and "offshore" can results a financial and environmental damage. This phenomenon calls corrosion-fatigue, or stress-corrosion however, it is relatively complex, and it presents a kind of situation wich results with more doubts than explanations, mainly, in what it concerns the form as this it grows in the structure. In the conventional tests of fatigue, usually, it is used machines servant-hydraulics or machines of rotative flexing that test only a specimen per time. For tests of corrosion-fatigue they would be several necessary simultaneous tests to obtain a critical mass of results, what would result in high costs with the acquisition of these machines and a long time of accomplishment of the tests. Therefore, it was developed a machine conception that accomplishes tests of fatigue simultaneously in multiples specimens, with the possibility to integrate an aggressive way (example, sea atmosphere) through cell-of-corrosion, in order to obtain solid results, less subjects to dispersion mistakes and with low cost. The objective of this work is to present some results of tests accomplished in pipeline materials (Steel API X60) and to extract parameters of fatigue that will serve as base for estimate of the life-useful of structures under cyclical loads, subject to the conditions of corrosion-fatigue. Results of tests of fatigue are presented in specimen on repeated flexing where it show curves S-N of fatigue without and with corrosion, seeking to compare with results of the literature as well as to verify up to where it is applicable for tests of long duration.

Keywords: *Fatigue testing, corrosion-fatigue, specimens, structures and pipelines.*

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.