

VERIFICAÇÃO DA FADIGA SUBAQUÁTICA DO AÇO A-36 EM AMBIENTES DIFERENTES¹

Carlos Alberto Carvalho Castro²
Alexandre Queiroz Bracarense³

Resumo

A fadiga é a forma mais comum de falha estrutural e, ao longo do tempo, tem sido um problema desafiador devido às solicitações impostas e ao tipo de carga aplicada. Nesse trabalho é feito um estudo sobre os efeitos da fadiga do aço SAE A-36 em dois ambientes: refrigerado e dentro da água na presença de pressão hidrostática com 5 atm. Para isso, foi desenvolvida e construída uma máquina de fadiga flexo-rotativa voltada para condições específicas, com a finalidade de ensaiar em ambientes distintos e simular as condições de trabalho do aço. Isso é importante, pois não há confirmação da resistência à fadiga subaquática. Os testes de fadiga subaquática são realizados, normalmente, ao ar e não na água. Com os resultados dos ensaios de fadiga foram levantadas as curvas S-N. Esses dados possibilitaram a construção das curvas de probabilidade de falha para verificar o limite de resistência à fadiga para os ambientes. A metodologia empregada foi o modelo de regressão para dados de testes de vida acelerados. Pelos resultados foi possível verificar a influência do ambiente no fenômeno da fadiga.

Palavras-chave: Fadiga; Ensaio flexo-rotativo; Curva S-N.

VERIFICATION OF THE SUBAQUATIC FATIGUE STEEL A-36 IN DIFFERENTS ENVIRONMENTS

Abstract

The fatigue is the most common way of structural imperfection and, over the time, it has been a problem to the imposed requests and the type of applied load. In this paper, there is a study of the way the resistance fatigue SAE A-36 is made among two environments: refrigerated and immersed into water at 5 atm hydrostatic pressure through bending tension fatigue tests. After that, some analyses and comparative results with the tested material were carried out. For this study, a mechanism was developed to test fatigue for bending tension to be used inside and outside hyperbaric chamber for the hydrostatic pressure simulation. This study is worth because any resistance confirmation does not exist in immersed fatigue of virgin materials; in other words, all the tests of fatigue were or have being accomplished in materials done in the air. Curves S-N were determined for each atmosphere. The methodology used for verification of resistance to the fatigue was the regression model from a data originated from accelerated life tests and it was possible to verify the environment influence in the phenomenon of the fatigue.

Key words: Fatigue; Bending tension; Fracture; Curve S-N.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Doutor CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais).*

³ *PhD UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).*

1 INTRODUÇÃO

Devido à expansão das usinas hidrelétricas e petrolíferas, estudos relacionados à vida útil dos componentes metálicos estão em constante desenvolvimento nas universidades e indústrias para aperfeiçoar as tecnologias existentes.⁽¹⁾ Essa medida busca garantir uma maior durabilidade das estruturas, para aumentar a competitividade das empresas e evitar acidentes que prejudiquem o meio ambiente e a economia.

As plataformas petrolíferas modernas são projetadas para suportar exposições aos esforços provocados por tempestades, furacões e grandes quantidades de ondas. Esses esforços aplicam um carregamento na estrutura favorecendo a falha por fadiga de algum componente da mesma.

Considera-se que a estimativa da vida útil de estruturas submetidas a esse fenômeno é de grande importância no projeto de uma obra ou equipamento para garantir a sua estabilidade.⁽²⁾ Para isso, existe a necessidade de um estudo para a análise de estruturas sujeita a fadiga.

Para a determinação dos cálculos dessas estruturas, as cargas externas são determinadas separadamente para os efeitos locais (estrutura) e globais (ambientais), pois podem ocasionar falhas por fadiga.⁽³⁾ Por exemplo, os efeitos da pressão hidrostática no chapeamento, enrijecedores de uma estrutura semi-submersível, são determinados pela ação direta da pressão na chapa do flutuador.

Além disso, deve-se verificar o colapso hidrostático analisando a possibilidade de um membro tubular ser deformado em face de ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços solicitantes,⁽⁴⁾ que são fatores que contribuem para a ocorrência de fadiga subaquática.

Todas as solicitações que variam em intensidade e/ou direção provocam variações de tensões na estrutura e podem causar falhas por fadiga. As cargas vivas e ambientais são importantes nessa associação, pois possuem a maior parcela da carga na estrutura.⁽⁵⁾ Deve considerar a ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços para a falha por fadiga subaquática.

Em geral, uma estrutura é projetada para desempenhar a sua função com uma adequada segurança e economia. O colapso de uma estrutura sujeita as cargas pode ocorrer de duas formas diferentes:⁽²⁾

- ocorrência de um alto nível de tensões que excede a capacidade de resistência do material, provocando falhas como, por exemplo, ruptura ou instabilidade de um componente estrutural;
- o colapso estrutural causado por dano acumulado produzido pela ação repetitiva de cargas variáveis, mesmo para níveis mais baixos de tensões aplicadas, gerando um processo de fadiga.

O termo fadiga pode ser definido como um processo pelo qual mudanças progressivas e localizadas de natureza irreversível ocorrem no material sujeito a tensões ou deformações flutuantes. Esses esforços podem resultar em trincas ou na falha completa do material.⁽⁶⁾ A fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico;^(7,8) a sua avaliação é realizada por alguns métodos, sendo o principal deles o método S-N.

O método S-N é o estudo de fadiga por meio de diagrama S-N, plotado com a variação da tensão versus o número de ciclos. É denominado de alto ciclo, devido a grande quantidade de ciclos para a ocorrência da falha por fadiga. Os ensaios para determinação do diagrama S-N são feitos em corpos-de-prova ou em componentes

da própria estrutura, conduzidos pela norma ASTM E-466,⁽⁹⁾ com carregamento totalmente reverso.

Uma outra variável no processo de fadiga é a influencia exercida pelo meio ambiente. Geralmente, a realização do ensaio em atmosfera controlada causa a redução ou aumento no limite de fadiga. Por exemplo, um material ferroso ensaiado em atmosfera salina ou ácida, seu limite decresce ao ponto de até desaparecer. Entretanto, no caso de um material ser ensaio em ambiente extremamente básico, esse pode apresentar um aumento de seu limite de fadiga.⁽¹⁰⁾

Steverding⁽¹¹⁾ desenvolveu uma máquina para ensaio flexo-rotativo de fadiga para trabalhar no vácuo e constatou ao ensaiar vários materiais que os valores obtidos, para o limite de resistência à fadiga nesse ambiente, eram maiores que ao ar. Isso foi associado com a presença do oxigênio e da afinidade que o mesmo tem com o metal. Na Figura 1 é possível ver a comparação entre os dois ambientes.

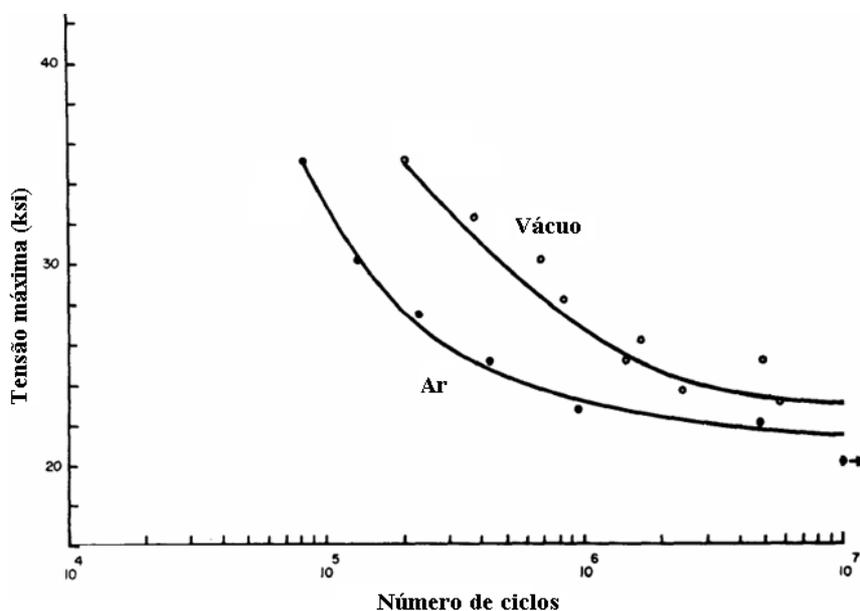


Figura 1. Comparação do ensaio de fadiga no ar e a vácuo no aço SAE 1020.

2 METODOLOGIA

Para este trabalho foi necessário desenvolver uma metodologia baseada em fatores relacionados com o fenômeno da fadiga, bem como os ajustes necessários para a obtenção dos valores. Para o levantamento das curvas foram necessários vários testes relacionados em um plano experimental bem como em análise de confiabilidade dos ensaios do aço SAE A-36 em ambientes distintos.

O Plano Experimental escolhido para a realização dos ensaios foi o Plano de Compromisso.⁽¹²⁻¹⁴⁾ Nesse plano são utilizados três níveis de tensão: alto, intermediário e baixo.

O nível alto é escolhido por considerações práticas. Os níveis intermediário e baixo são escolhidos para minimizar a variância assintótica do estimador 100P%, relativo ao percentil da distribuição do tempo de vida útil do corpo-de-prova. Existe o compromisso de que a proporção de alocação (proporção de corpos-de-prova que deverão ser submetidos a testes em cada nível de tensão) seja sempre na proporção 4: 2: 1, para os níveis baixo, intermediário e alto, respectivamente.

O levantamento tradicional da curva S-N apresenta uma desvantagem em relação ao Plano de Compromisso. Essa desvantagem se deve ao fato dele usar o



mesmo número de corpos-de-prova em todos os níveis de tensão.⁽¹³⁾ Quando se utiliza níveis mais baixos de tensão, a probabilidade de ocorrer uma falha é bem menor. Isto faz com que a precisão dos valores obtidos nos níveis mais baixos seja menor. Ao aumentar o número de corpos-de-prova nos níveis mais baixos, contribui para uma estimativa mais precisa do resultado.

No presente trabalho, utilizou-se cinco níveis de tensões, sendo dois por interpolação linear, com exceção do ensaio refrigerado que foram sete níveis. Para os três ambientes utilizaram-se as mesmas tensões com a finalidade de comparar os resultados.

Os corpos-de-prova foram ensaiados na máquina de fadiga flexo-rotativa para verificar o número de ciclos necessários para ocorrer a sua ruptura. O ensaio ocorreu com o corpo-de-prova girando a uma determinada velocidade e com aplicação de cargas para provocar a fadiga do mesmo.

A tensão aplicada está diretamente relacionada com o peso empregado. Os pesos disponíveis no equipamento são: 44,72; 38,38; 19,43; 18,67; 9,43; 5,29; 3,76; 2,36; 0,79; 0,49 N. Para determinados valores de tensão empregou-se o somatório de alguns dos pesos descritos.

Os ensaios do aço SAE A-36 foram distribuídos da seguinte forma: alta, intermediária e baixa, assim:

- Tensão 1 (alta) – 4 corpos-de-prova.
- Tensão 3 (intermediária) – 8 corpos-de-prova.
- Tensão 5 (baixa) – 16 corpos-de-prova.
- As duas interpolações foram realizadas para compor um maior número de tensões:
- Tensão 2 (interpolação entre alta e intermediária) – 6 corpos-de-prova.
- Tensão 4 (interpolação entre intermediária e baixa) – 10 corpos-de-prova.

Essa metodologia foi usada para levantar as curvas S-N para os ambientes.

No estudo levantou as curvas S-N para os ambientes propostos no trabalho. Nessas curvas são apresentadas as probabilidades de falha distintas, utilizando a distribuição Log-normal.

A determinação do limite de resistência à fadiga, utilizou:

- o levantamento das curvas S-N para os ambientes em estudo;
- e o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados, empregado em estudos de confiabilidade.

Ensaio de laboratório mostram que existe uma considerável dispersão nos resultados obtidos nos ensaios de fadiga. Essa dispersão é tratada estatisticamente, utilizando a distribuição de Weibull ou a distribuição Log-normal, Freitas e Colosimo.⁽¹²⁾

Após a estimativa dos parâmetros, é necessário que utilize algum método para verificar a adequação do modelo. Os procedimentos para estimar os parâmetros do modelo e verificar a adequação do mesmo são encontrados em Freitas e Colosimo⁽¹²⁾ e Mansur,⁽¹³⁾ podendo ser assim descritos:

- obter os dados experimentais de um teste de vida acelerada;
- estimar os parâmetros do modelo, segundo a distribuição de probabilidade log-normal.
- verificar a adequação do modelo, validando-se as hipóteses associadas ao mesmo.
- utilizar a função de confiabilidade $R(T)=P(T \geq t)$ correspondente à distribuição log-normal, encontrado por meio de cálculo inverso, x_0 , correspondendo a um

valor de $R(T) = 50\%$. Onde $R(T) = P(T \geq t)$ é a probabilidade de que o tempo até a falha do material seja maior do que um tempo t determinado.

- o valor obtido no item anterior é o limite de resistência à fadiga do material.

Após a estimativa é necessário fazer um ajuste para verificar o modelo proposto.

Neste trabalho utilizou-se a distribuição log-normal, devido a dois fatores: sistema flexo-rotativo, ou seja, método aplicado para levantar os gráficos S-N e ao modelo estatístico de regressão para dados de testes de vida acelerados.

Para chegar aos resultados deve-se respeitar alguns métodos e ajustes para que o modelo tenha consistência nos resultados encontrados. Para isso é necessário um estudo do Método S-N, formatação de um modelo proposto, bem como o seu ajuste.

2.1 Método S-N

O método S-N é o estudo de fadiga por meio de diagrama S-N, plotado com a variação da tensão versus o número de ciclos. É denominado de alto ciclo, devido a grande quantidade de ciclos para a ocorrência da falha por fadiga. Os ensaios para determinação do diagrama S-N são feitos em corpos-de-prova ou em componentes da própria estrutura, conduzidos pela norma, ASTM E-466,⁽⁹⁾ com carregamento totalmente reverso, conforme Figura 2.

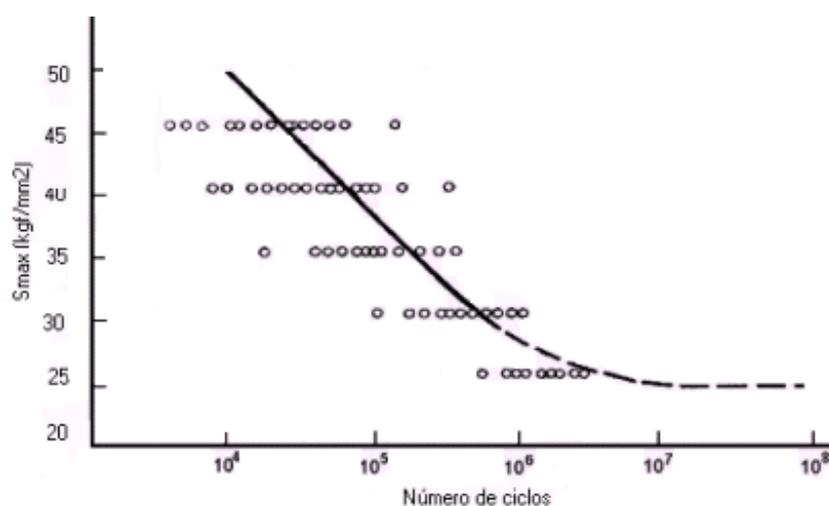


Figura 2. Curva com tensão constante.

Alguns materiais sob condições constantes de carregamento exibem, em seus diagramas S-N, amplitude de tensão abaixo da qual o mesmo não está sujeito à falha por fadiga, independente do número de ciclos. Isso denomina limite de fadiga ou limite de *endurance*, S_e , e varia entre 35 a 50% do limite de ruptura do material, σ_u . Alguns metais, como alumínio e suas ligas, não apresentam esse limite definido, sendo estimado para romper o metal 10^6 a 10^7 ciclos.⁽¹⁴⁾

2.2 Determinação do Limite de Resistência a Fadiga

Os valores obtidos em laboratório para o limite de fadiga, são utilizados como base para o dimensionamento de alguma peça. Contudo, dificilmente o valor de rompimento do material na prática, quando submetido a algum esforço repetitivo, é igual ao obtido em laboratório. Existem inúmeras variáveis que influenciam nos valores práticos de ruptura por fadiga, desde o ambiente exposto, o formato da peça e o tipo de esforço solicitado.

Na literatura são encontrados métodos e modelos para a determinação de resistência à fadiga (S_e) dos materiais, são eles: o método do Prot, o método up-and-down e o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados.⁽¹³⁾

Para o trabalho foi utilizado o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados e ajustes para a determinação do limite de resistência à fadiga.

2.3 Descrição do Modelo de Regressão

Esse modelo requer que sejam feitas algumas hipóteses. Uma delas é que a variabilidade é a mesma para cada nível de tensão, porém isso nem sempre é verdadeiro. Entretanto, muitas vezes quando trabalha em outra escala, por exemplo, na logarítmica, essa suposição torna-se aproximadamente válida.⁽¹³⁾

A distribuição log-normal é a que melhor descreve os tempos de vida cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, encontradas em um processo de corrosão e degradação de contatos. É também indicada para os mecanismos de falha por fadiga em materiais.⁽¹²⁾

A equação matemática que melhor descreve a relação entre a tensão (σ_a) e o número de ciclos até a falha (N) é a de regressão linear (curva de regressão), dada pela Eq.(1) e (2):⁽¹⁵⁾

$$\log(N) = b_0 - b_1 \log(S) \quad (1)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2)$$

Onde, Y_i é o logaritmo de N e x_i é o logaritmo da tensão.

O modelo tem a seguinte forma,⁽¹²⁻¹⁵⁾ como apresentado na Eq.(3).

$$Y = \ln(T) = \beta_0 + \beta_1 x + \Gamma \varepsilon \quad (3)$$

Onde, T representa o tempo de falha, $\beta_0 = \ln(A)$ e $\beta_1 = w$ e A e W são parâmetros que dependem do material utilizado, do método de ensaio, da geometria e da característica dos corpos-de-prova. Γ (parâmetro de escala) corresponde ao desvio padrão, constante para todos os níveis de tensão e ε é um valor aleatório, denominado de erro aleatório ou resíduo padronizado e tem uma distribuição que independe da variável, x .

2.4 Ajuste do Modelo de Regressão

O ajuste para esse modelo considera a distribuição dos valores em log-normal para o cálculo da regressão. Em seguida, é utilizada a função de confiabilidade da distribuição log-normal e feito o cálculo inverso para estabelecer o limite de resistência à fadiga para o aço.

Em análise, um modelo de interesse pode ser a reta de regressão da população (modelo linear da população) que pode não ser conhecida. Portanto, deve ser estimada com base nos dados amostrais, obtendo uma reta de regressão.

O ajuste para esse modelo considera a distribuição dos valores em log-normal. Em seguida, é utilizada a função de confiabilidade da distribuição log-normal e feito o cálculo inverso para estabelecer o limite de resistência à fadiga para o aço.



Existe uma relação entre as distribuições log-normal e normal. Como o nome sugere o logaritmo natural de uma variável com distribuição log-normal, com parâmetro μ e σ , tem uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ . Esses dados da distribuição log-normal podem ser analisados segundo uma distribuição normal, se o trabalho realizado for com o logaritmo natural ao invés de seus valores originais.

A função de confiabilidade da log-normal é dada por: $R(T)=P(T \geq t)$, sendo a probabilidade do tempo até a falha do metal, seja maior do que um tempo t determinado,⁽¹²⁾ e é dada pela Eq.(4).

$$x_0 = \frac{1}{\beta_1} [\Phi^{-1}\Gamma + \ln(t) - \beta_0] \quad (4)$$

Onde, Φ^{-1} é o valor de z (normal padrão) correspondente ao percentil de interesse. O cálculo para o limite de resistência à fadiga é feito utilizando o valor x_0 para o qual se tem $R(T)=50\%$. Essa é a probabilidade de que os corpos-de-prova venham a falhar, após um número de ciclos estimado. Esse valor é usado na verificação das estimativas obtida pelo método cálculo direto utilizando a distribuição log-normal (Método de modelos de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerada).

2.5 Verificação do Modelo

Uma das ferramentas mais significativas para verificação da adequação de um modelo de regressão é a análise dos resíduos. Com essa análise, é possível averiguar se as suposições sobre os resíduos do modelo são satisfatórias, isto é, verificar se as suposições de igualdade de variância, de normalidade e de independência são cumpridas. Essas validades podem ser verificadas por meio de gráficos.⁽¹⁶⁾

Outra forma muito usual de verificar a adequação de um modelo de regressão é por meio do coeficiente de determinação, R^2 . No entanto, a análise dos resíduos deve ser efetuada, pois esta técnica é superior à de R^2 .⁽¹⁵⁾

Portanto, o método de verificação da adequação do modelo ajustado é baseado na análise dos seus resíduos. Portanto, o melhor modelo é o que apresenta, graficamente, pontos alinhados em torno de uma linha reta.⁽¹²⁾

3 RESULTADOS

Para o levantamento das curvas S-N, foram utilizados 5 níveis de tensão alternada para os ensaios em lâmina d'água e em água pressurizado a 5 atm. Para o ambiente refrigerado foram usados 7 níveis de tensão, pois não se conhecia qual era a melhor tensão para fazer os ensaios.

Para o levantamento da curva S-N, os resultados obtidos com os ensaios de fadiga flexo-rotativa para o ambiente refrigerado, estão mostrados na Figura 3.

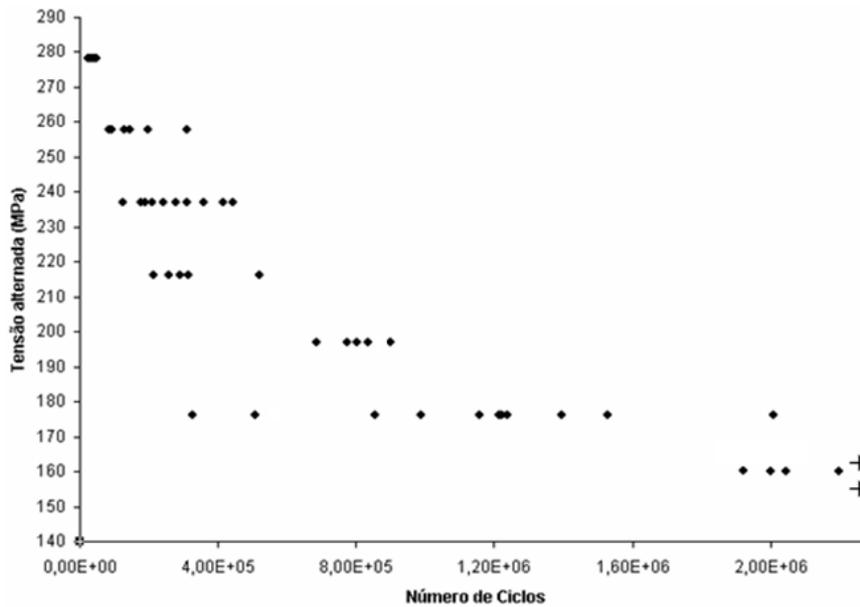


Figura 3. Ensaios em corpos-de-prova refrigerados.

Para o levantamento da curva S-N obteve-se os resultados dos ensaios de fadiga flexo-rotativa dentro da água e pressurizado a 5 atm. Os valores plotados são apresentados na Figura 4.

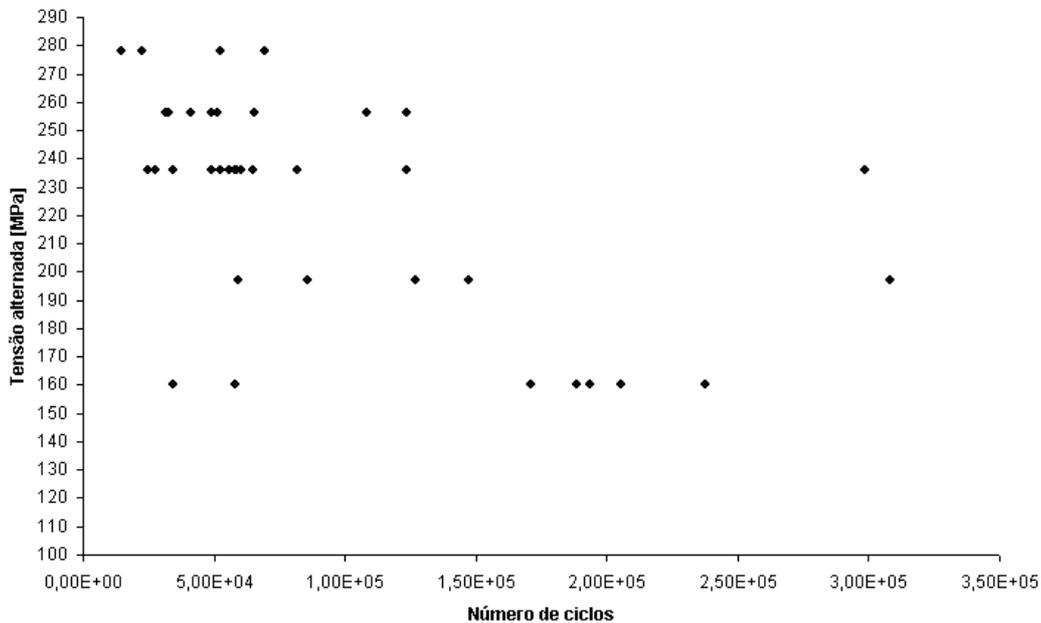


Figura 1. Ensaios em corpos-de-prova em água pressurizado em 5 atm.

3.1 Ajuste do Modelo de Regressão para os Corpos-de-Prova

Para validação dos resultados obtidos foi necessária uma verificação do ajuste do modelo de regressão base. O ajuste foi feito para os corpos-de-prova refrigerados e em água sob pressão hiperbárica de 5 atm. No caso, a distribuição estatística estudada foi a Log-normal.

A estimação dos parâmetros desse modelo e a verificação dos mesmos foram feitas utilizando os softwares MINITAB, versão 13 e Microsoft Excel, 2000. Na Figura 5,

são apresentados os valores dos resíduos padronizados e, em seguida os valores das variáveis.

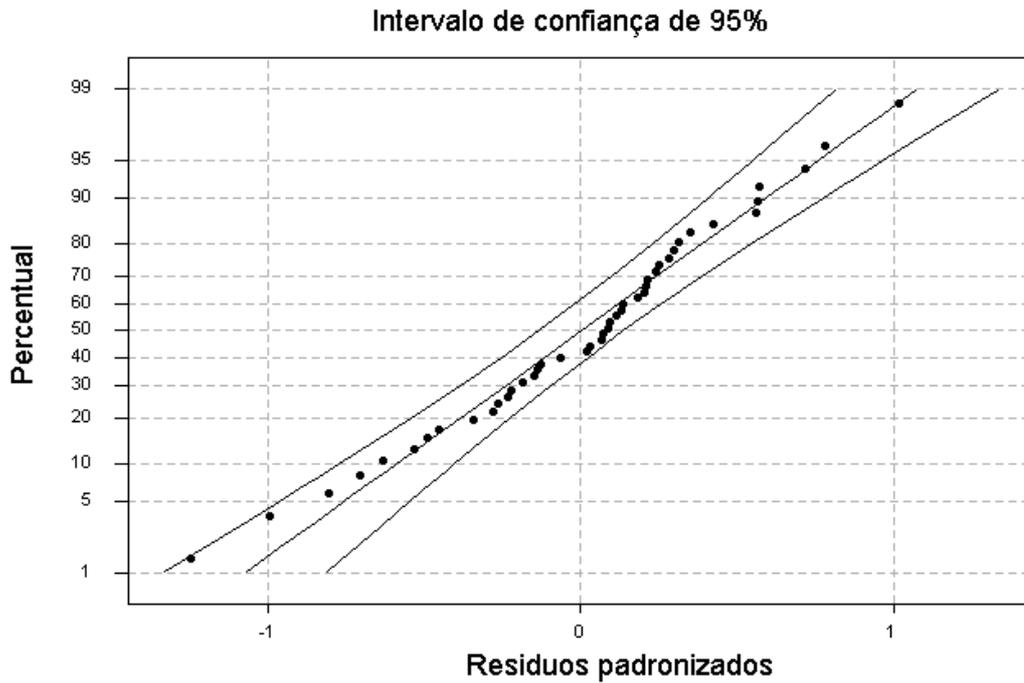


Figura 5. Probabilidades para resíduos padronizados - refrigerados.

Os resultados obtidos pelo gráfico foram:

- intercepto = 19,02899,
- coeficiente da variável preditora = -0,02874,
- parâmetro de escala da distribuição Log-normal = 0,43843.

O modelo obtido é dado conforme a Eq.(4).

$$Y = \ln(T) = 19,02899 - 0,02874x + 0,43843\varepsilon \tag{5}$$

Onde, T tem uma distribuição Log-normal com parâmetros $\mu(x)$ (que depende do valor de x = nível de tensão) e $\Gamma=0,43843$.

O resíduo do modelo para a pressurizado a 5 atm, apresentado na Figura 6.

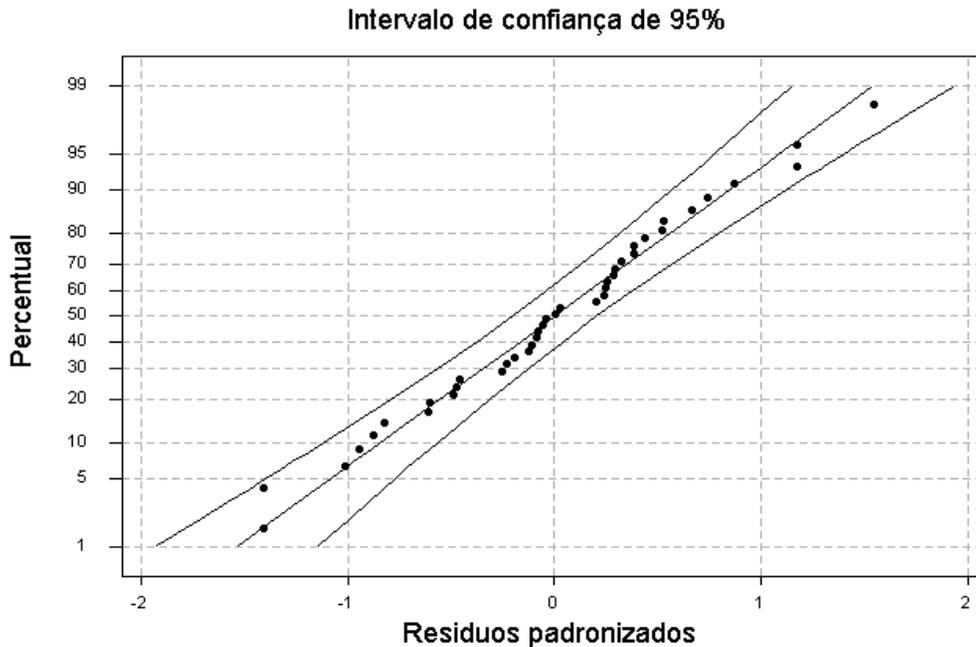


Figura 6. Probabilidades para resíduos padronizados – pressurizado.

Os resultados obtidos foram:

- intercepto = 13,51672,
- coeficiente da variável preditora = -0,01042,
- parâmetro de escala da distribuição Log-normal = 0,73778.

O modelo obtido é dado conforme a Eq.(5).

$$Y = \ln(T) = 13,51672 - 0,01042x + 0,73778\varepsilon \quad (6)$$

Sendo, T tem uma distribuição Log-normal com parâmetros $\mu(x)$ e $\Gamma=0,73778$.

Os resultados obtidos com refrigeração e em água pressurizada a 5 atm indicam que os valores dos resíduos aproximam de uma reta e estão dentro da faixa de 95% de confiança. Portanto, o modelo em estudo foi adequado para o estudo da fadiga em ambientes diferentes.

3.2 Cálculo do Limite de Resistência à Fadiga Utilizando o Modelo de Regressão

Com os dados experimentais obtidos no levantamento da curva S-N calculou-se o limite de resistência à fadiga utilizando o modelo de regressão. Com esses valores, mais a função de confiabilidade da distribuição Log-normal e o cálculo inverso, encontrou-se o valor de x_0 .

Com os valores obtidos nos ajustes das curvas para os ambientes, aplica-se ($\beta_0 = 19,02899$, $\beta_1 = -0,02874$, $\Gamma = 0,43843$, $\phi^{-1} = 0$) para ensaios refrigerados e tem-se:

$$x_0 = \frac{1}{-0,02874} [0 \times 0,43843 + \ln(2 \times 10^6) - 19,02899] = 157 MPa$$

Esse valor é o x_0 , Limite de Resistência à Fadiga, onde se tem $R(T) = 50\%$, ou seja, a probabilidade de falha dos corpos-de-prova após 2.000.000 ciclos é de 50%.

Para o ambiente pressurizado com água a 5 atm, item 4.6.2.3, aplica ($\beta_0 = 13,51672$, $\beta_1 = -0,01042$, $\Gamma = 0,73778$, $\phi^{-1} = 0$), mas devido aos valores obtidos

da curva S-N, adotou 500.000 ciclos como a probabilidade de falha de 50% para os corpos-de-prova.

$$x_0 = \frac{1}{-0,01042} [0 \times 0,73778 + \ln(500.000) - 13,51672] = 38MPa$$

Em relação aos valores obtidos, Hahin⁽¹⁷⁾ fez uma pesquisa e relata que o aço SAE A-36 tem um Limite de Resistência à Fadiga ao ar de 23 Ksi (158,58 MPa) utilizando-se ensaio flexo-rotativo. O valor encontrado no trabalho está de acordo com os valores encontrados na literatura.

Ao se basear nos trabalhos de Sterverding⁽¹¹⁾ e Hudson⁽¹⁸⁾ verifica que o limite de resistência à fadiga é influenciado pela pressão atmosférica aplicada. Isso pode estar associado ao que ocorre no ensaio pressurizado a 5 atm com água.

Ao se plotar as duas curvas verifica-se características muito distintas em cada caso, como observado, a tensão aplicada *versus* o número de ciclos em cada ambiente, conforme Figura 7.

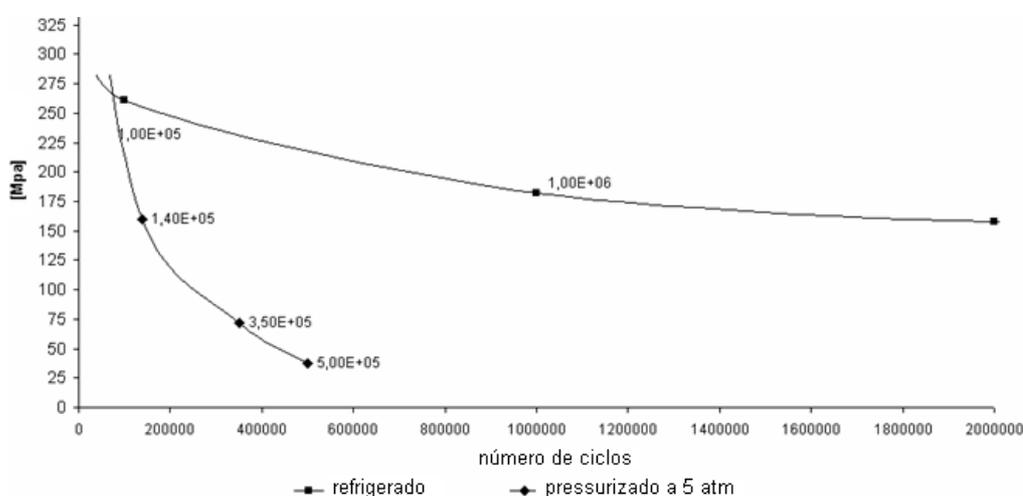


Figura 7. Limite de resistência à fadiga para dois ambientes com probabilidade de falha de 50%.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, em fadiga, para o levantamento das curvas S-N em ensaios refrigerados e pressurizado com água a 5 atm, seguem estatisticamente a mesma distribuição Log-normal.

Para os ensaios pressurizados com água a 5 atm, devido ao número de ciclos baixos obtidos, considerou uma probabilidade de falha de 500.000 ciclos.

No trabalho foram levantadas duas hipóteses para explicar essas diferenças obtidas nos ensaios pressurizados a 5 atm:

- umas delas associada ao ar dissolvido, ou bolhas de ar, na água que poderiam contribuir para a diminuição da resistência à fadiga. Isso foi notado ao final do teste, pois a região da fratura apresentou oxidada, com *pits* reduzindo o número de ciclos para a nucleação da trinca. Verifica-se também que o efeito da tensão tem um efeito na vida à fadiga do material;
- a outra, trata do fenômeno de cavitação que ocorre pela movimentação e turbulência dos fluídos em uma superfície metálica. Isso acontece devido ao colapso das bolhas de ar na superfície do metal, pressão e velocidade do teste. Salienta-se que a cavitação expõe o material ao desgaste corrosivo e auxilia na formação de *pits*.

Constata que a pressão tem um papel importante, pois nos ensaios em ambiente refrigerado não ocorreu às rupturas precoces, mesmo estando na presença da água, ao contrário do ensaio em água pressurizado a 5 atm.

Agradecimentos

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG.
Ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS - UFMG
Ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ

REFERÊNCIAS

- 1 MADDOX, S. J.; RAZMJOO, G. R. **Fatigue Performance of Large Girth Welded Steel Tubes**, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, 1998.
- 2 TAIER, R. Análise de Fadiga em Juntas Tubulares de Plataforma Offshore Fixa Através de Modelos em Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, UFOP, pp. 159, 2002.
- 3 PICCININI, F. C. Um Estudo do Carregamento Hidrodinâmico sobre estruturas Oceânicas Esbeltas, Dissertação de Mestrado, FURG, pp. 107, 2003.
- 4 Pinho, A. L. S. Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, XI, pp.102, 2001.
- 5 Kiepper, B. O. 2004, “Análise Estrutural Estática, Via Elementos Finitos, do Segmento Tubo Flexível-Enrijecedor”, Dissertação de Mestrado, UFRJ, pp 103.
- 6 ASTM, E 1823-96. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing, 1996.
- 7 MEGGIOLARO, M. A., Castro, J. T. P. Fatigue life prediction of oil ducts under service loads. Rio Pipeline, Conference & Exposition, IBP388_03, 2003.
- 8 CASTRO, C. A. C., 2007, “Estudo do Comportamento à Fadiga de Metais Dentro e Fora da Água na Presença da Pressão Hidrostática”, Tese de Doutorado, pp.160, 2007.
- 9 ASTM, E 466-96, 1996. “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials”.
- 10 DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy, Third Ed., pg. 348-431, 1986.
- 11 STEVERDING, B. Vacuum Fatigue Tester, The Review os Scientific Instruments, volume 35, number 5, 1964.
- 12 Freitas, M. A.; Colosimo, E. A. Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados. Volume 12, pp. 309, 1997.
- 13 Mansur, T. R., 2003, “Avaliação e Desenvolvimento de Modelos de Determinação de acúmulo de Danos por Fadiga em um Aço Estrutural”, Tese de Doutorado, UFMG, pp 185.
- 14 JÚNIOR, A. A. Avaliação Experimental dos Efeitos da Fadiga Térmica nas Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Austenítico, Tese de Doutorado, UFMF, pp.129, 2006.
- 15 MALUF, O. Influência do Roleteamento no Comportamento em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular Perlítico, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, pp 154, 2002.
- 16 MARTÍNEZ, E. M. Statistical design and orthogonal polynomial model to estimate the tensile fatigue strength of wooden finger joints, International Journal of fatigue, pp.237-243, june 2002.
- 17 HAHN, C., 1994, “Effects of Corrosion and Fatigue on the Load Carrying Capacity of Structural and Reinforcing Steel”, Physical Research Report No. 108, Illinois Department of Transportation, pp.114.
- 18 HUDSON, C. M., 1972, “Investigation of the Vacuum Environment on the Fatigue and Fracture Behavior of 7075-T6”, J. Vac. Sci. Technol., Vol 9, no 6.