

DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA: COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES ESTATÍSTICAS

Ernani Sales Palma

PUC.Minas, Dep. Eng. Mec., Belo Horizonte, MG, Brasil. E-Mail: palma@pucminas.br

Tanius Rodrigues Mansur

João Mário Andrade Pinto

CNEN/CDTN, B. Horizonte, MG, Brasil. E-Mail: tanius@urano.cdtm.br, jmap@urano.cdtm.br

Enrico A. Colosimo

Bruno Ramos Netto

UFMG, Dep. Estatística, B.H., MG, Brasil. E-Mail: enrico@est.ufmg.br, bruno@est.ufmg.br

Resumo

A resistência à fadiga de um aço foi determinada experimentalmente e através da utilização de simulações numéricas. A simulação foi baseada em parâmetros de distribuição de vida, considerando-se um modelo Log-normal. Os resultados experimentais obtidos são bastante próximos daqueles obtidos através da simulação.

Palavras chaves: Fadiga, Simulação, Resistência à fadiga, Dano por fadiga

1. INTRODUÇÃO

Existem vários tipos distintos de métodos experimentais para determinação de propriedades mecânicas de componentes mecânicos sujeitos a esforços cíclicos [Collins, 1993, Bannantine et al, 1990]. A seleção de um ou outro método depende do objetivo que se quer atingir. Pode-se por exemplo determinar a distribuição de vida para um nível constante de tensão alternada e/ou a distribuição de resistência para uma vida constante. Dentre estas propriedades e/ou parâmetros, o limite de resistência à fadiga (S_e) é uma das informações essenciais para o dimensionamento correto de elementos de máquinas [Fatemi and Yang, 1998].

Um dos ensaios experimentais mais utilizado para a determinação do valor médio do limite de resistência à fadiga de um componente mecânico e sua dispersão é o método do "*Up-and-Down*" ou "*staircase*" [Collins, 1993]. Neste método, um grupo de no mínimo 15 corpos-de-provas é selecionado para determinar o limite de resistência à fadiga para uma vida pré-determinada. O primeiro corpo-de-prova é ensaiado com uma tensão superior à resistência esperada, até que ele falhe ou atinja a vida pré-determinada (aqui chamado de censura). Se o corpo-de-prova falhar antes de se atingir a vida de interesse, a tensão é diminuída de um gradiente pré-selecionado e o segundo corpo-de-prova é ensaiado nesta nova tensão. Caso

contrário, ou seja, se o corpo-de-prova atinge a vida de interesse sem ocorrência de falha (censura), a tensão é elevada do gradiente pré-selecionado e o segundo corpo-de-prova é ensaiado nesta nova e mais elevada tensão. Os ensaios seguintes seguem esta metodologia, onde cada corpo-de-prova é submetido a tensões inferiores ou superiores ao seu predecessor, conforme tenha havido ou não a falha.

Devido ao tempo necessário e aos custos envolvidos, tem-se procurado cada vez mais realizar simulações numéricas que consigam oferecer resultados próximos aos obtidos experimentalmente, aumentando sua confiabilidade. Além disto, estas simulações têm a função de reduzir custos, já que os tempos e equipamentos necessários para sua realização são menores que aqueles necessários aos ensaios experimentais. Assim, o objetivo deste artigo é mostrar uma comparação entre os resultados do limite de resistência à fadiga obtidos experimentalmente e através de simulação de um aço de larga utilização em construção mecânica.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado na fabricação dos corpos-de-prova foi o aço ASTM 8620, com $\sigma_{0,2} = 370$ MPa e limite de resistência à tração $\sigma_R = 432$ MPa. Os corpos-de-prova, cujo desenho esquemático está mostrado na figura 1, foram fabricados com rugosidade superficial $R_A = 0,020 \pm 0,005$ μm .

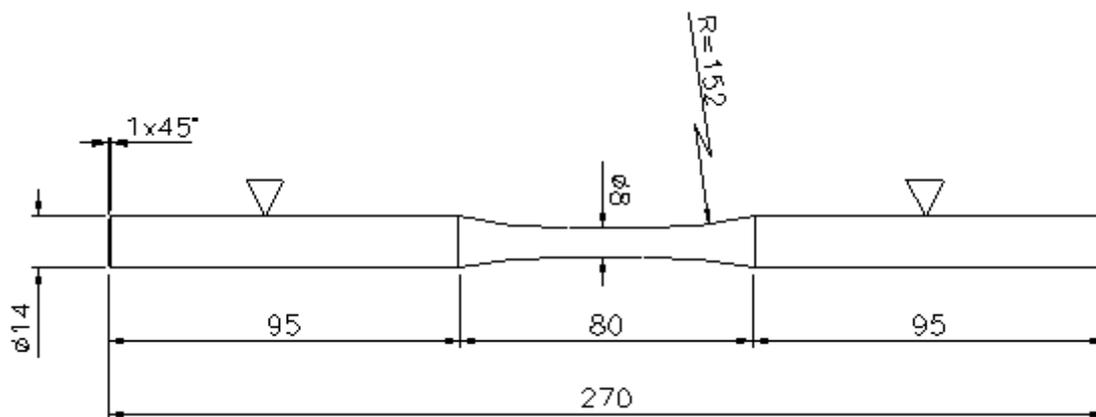


Figura 1. Corpos-de-Prova e respectivas dimensões (em mm)

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de fadiga por flexo-rotação com uma rotação de 3500 rpm e tensão média nula todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (24°C).

2.1 Ensaio experimental de "up-and-down"

O procedimento para este ensaio está detalhado em [Collins, 1993]:

1. Estimar o limite de resistência à fadiga S_e .
2. Estimar o gradiente (d) para se elevar ou diminuir as tensões.
3. O primeiro ensaio deve ser realizado com uma tensão inicial superior ao S_e . Os ensaios posteriores devem seguir o esquema explicado anteriormente, até que se atinja 15 ou mais corpos-de-provas.
4. Após o término dos ensaios, deve-se determinar o número do evento menos freqüente (N): se a falha ou censura.

O limite de resistência à fadiga S_e pode ser determinado pela Equação (1).

$$S_e = S_o + d \left[\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

onde S_o é o valor da menor tensão onde o evento menos freqüente ocorreu, d é o gradiente de de tensões, N é o número total do evento menos freqüente e A é um parâmetro definido em [Collins, 1993]. O sinal (+) na equação (1) é usado quando o evento menos freqüente é a censura e o sinal (-) na equação (1) é usado quando o evento menos freqüente é a falha.

O desvio padrão experimental (S) pode ser estimado através das equações 2a e 2b.

$$S = 1,62d \left[\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,29 \right] \quad \text{se} \quad \frac{NB - A^2}{N^2} \geq 0,3 \quad (2a)$$

$$S = 0,53d \quad \text{se} \quad \frac{NB - A^2}{N^2} < 0,3 \quad (2b)$$

onde B é um parâmetro definido em [Collins, 1993].

2.2 Simulação numérica do ensaio "Up-and-Down"

A simulação numérica dos ensaios "Up-and-Down" foram realizadas utilizando-se os resultados obtidos na determinação das curvas S-N-P. Baseando-se nestes dados e levando-se em consideração que a vida infinita corresponde a 2×10^6 ciclos (aqui designado de censura), utilizou-se o programa MINITAB 12, em teste de vida acelerada, para determinar os parâmetros da distribuição log-normal e para verificar se esta distribuição representa adequadamente os resultados obtidos. Para modelar matematicamente a distribuição de vida, aplicou-se um modelo de regressão nos dados experimentais conforme mostra a equação (3) [Freitas e Colosimo, 1997]:

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

onde T representa o tempo de falha $\beta_0 = \ln(A)$ e $\beta_1 = w$, onde (A) e (w) são parâmetros característicos do tipo de material utilizado, método de ensaio, geometria e fabricação dos corpos-de-prova, Γ é o parâmetro de escala, o qual corresponde ao desvio padrão, constante para todos os níveis de tensão e ε tem uma distribuição que independente da variável x .

A Eq. (3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Y = \mu(x) + \Gamma \varepsilon \quad (4)$$

onde:

$$\mu(x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (5)$$

$\mu(x)$ é o parâmetro de locação da distribuição Y . Na equação (4) x representa o nível de tensão para μ .

Quando existe censura, ou seja, em ensaios nos quais existem corpos-de-prova que não atingem a falha, o modelo da potência inversa Log-normal é adequado. Pode-se definir a função confiabilidade deste modelo através da equação (6).

$$\phi = \Phi^{-1}[R(t)] = -\frac{\ln(t) - \beta_0 - \beta_1 x}{\Gamma} \quad (6)$$

A partir da função de confiabilidade pode-se calcular o valor de (x) através da equação (7).

$$x = \frac{1}{\beta_1} [\Phi^{-1}\Gamma + \ln(t) - \beta_0] \quad (7)$$

Os parâmetros β_0 , β_1 e Γ devem ser calculados usando-se as equações (3) a (5) e $t = 2 \times 10^6$. O parâmetro Φ^{-1} é obtido em tabelas de distribuição normal [Freitas e Colosimo, 1997].

Foram selecionados três níveis de (x) para simular o "Up-and-Down", correspondendo aos níveis de confiabilidade de 10%, 50% e 90%.

3. RESULTADOS

Para servir de base aos ensaios experimentais, o limite de resistência à fadiga foi calculado inicialmente de maneira empírica. Sabe-se que S_e pode ser determinado a partir do limite de resistência à tração dos aços [Bannantine, 1990], considerando-se os fatores de modificação, como mostra a equação (8).

$$S_e = \frac{\sigma_r}{2} C_L C_G C_S C_T C_R \quad (8)$$

onde $C_L = 1$ para flexão (Fator de carga); $C_G = 1$ para diâmetro do corpo-de-prova de 8 mm (Fator de tamanho); $C_S = 0,85$ (Fator de acabamento superficial); $C_T = 1$ para temperatura ambiente (Fator de temperatura) e C_R é o fator de correção para confiabilidade. $C_R = 1$ para 50% de confiabilidade e $C_R = 0,897$ para 90% de confiabilidade. Utilizando-se estes parâmetros determinou-se que $S_E = 183,6$ MPa para 50% de confiabilidade e $S_E = 174,4$ MPa para 90% de confiabilidade.

3.1 Resultados experimentais

A figura 2 mostra os resultados dos ensaios experimentais de "Up-and-Down". O ensaio foi iniciado com uma tensão igual a 285 MPa, bastante superior ao limite de resistência à fadiga esperado. O gradiente foi estimado em d igual a 20 MPa. Utilizando-se as equações (1), (2a) e (2b), cuja seqüência detalhada de cálculos está mostrado em [Collins, 1993] obteve-se o valor de $S_e = 194 \pm 5$ MPa para uma confiabilidade de 50%.

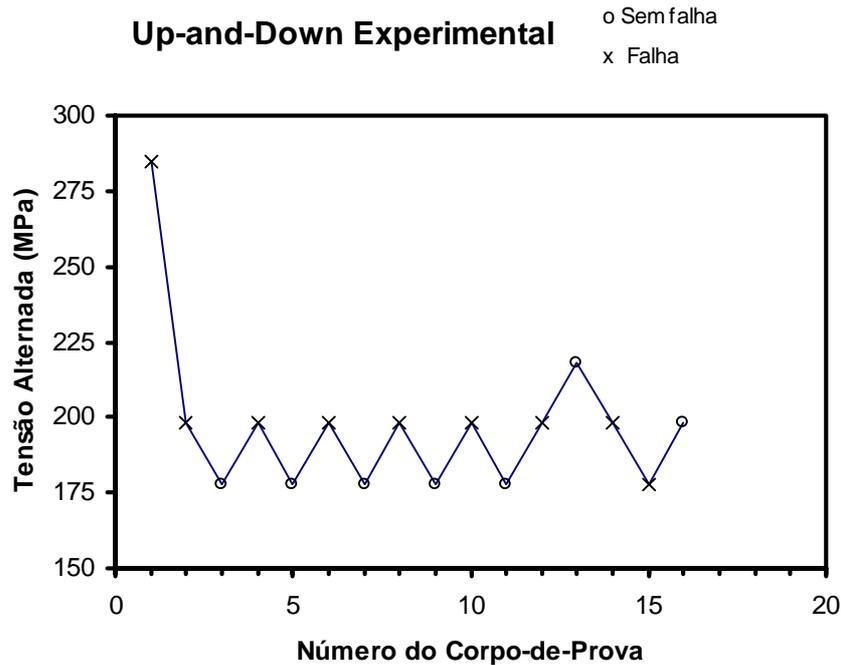


Figura 2. Ensaio experimental de "Up-and-Down"

3.2 Resultados da simulação

Baseando-se na distribuição de vida obtida experimentalmente nas curvas S-N-P, onde foram selecionados os valores correspondentes à confiabilidades de 10, 50 e 90%, foram calculados os parâmetros da distribuição log-normal. A tabela 1 mostra os valores obtidos.

Tabela 1. Parâmetros de simulação "Up-and-Down"

Valor (%)	Φ^{-1}	x (MPa)	$\mu(x)$	Γ
10	-1,28	219	13,4443	0,8817
50	0,00	197	14,5638	0,8817
90	1,28	175	15,6833	0,8817

Para iniciar a simulação do "Up-and-Down" foi selecionado uma tensão inicial igual a 230 MPa. Utilizando-se as equações (3) a (7) obteve-se os seguintes parâmetros da distribuição log-normal para este valor de tensão: $\mu(x) = 12,8845$ e $\Gamma = 0,8817$. Através da utilização do "software" MINITAB 12 foram realizadas 5 simulações dos ensaios "Up-and-Down". A figura 3 mostra o resultado de uma destas simulações. Nesta simulação foi encontrado um valor de $S_e = 205 \pm 8$ MPa para 50% de confiabilidade.

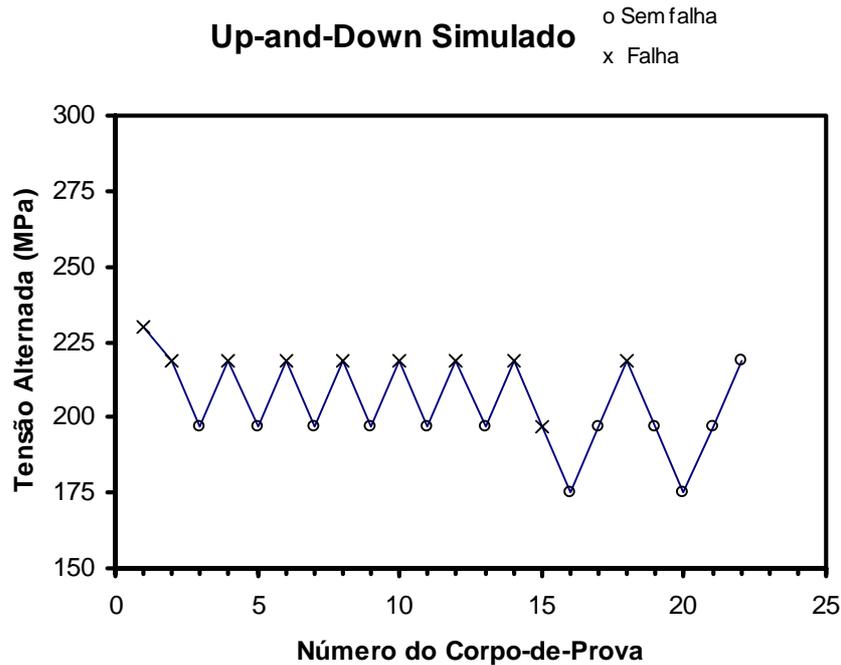


Figura 3. Simulação do ensaio "Up-and-Down"

A tabela 2 mostra os resultados de todas as cinco simulações realizadas. Encontrou-se um valor médio de $S_e = 197 \pm 9$ MPa, o qual foi determinado usando-se a mesma metodologia do item anterior.

Tabela 2. Resultados das simulações realizadas

Simulação	1	2	3	4	5
S_e (MPa)	193 ± 9	205 ± 12	198 ± 9	205 ± 8	186 ± 9

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela 3 mostra uma comparação dos resultados obtidos para o Limite de Resistência à fadiga, com 50% de confiabilidade, para as três maneiras distintas de determiná-los. Observa-se que os valores obtidos experimentalmente são bastante próximos daqueles obtidos através da simulação numérica. O valor da resistência à fadiga obtido empiricamente apresenta valores abaixo dos demais. Isto é explicado pelo fato de se utilizar fatores de correção aproximados e geralmente super dimensionados.

Tabela 3. Comparação entre os valores de S_e

Método	Empírico	Experimental	Simulação
S_e (MPa)	183,6	$194,5 \pm 5$	$197,9 \pm 9$

Deve ser ressaltado que esta simulação tem como objetivo apenas de otimizar os ensaios experimentais de determinação do limite de resistência à fadiga. Para que a simulação seja

eficiente, os seus parâmetros de distribuição devem ser calculados a partir de dados experimentais de curvas S-N-P. Estas curvas, em conjunto com a simulação, têm condições de fornecer os limites de resistência à fadiga para qualquer vida de interesse prático, com economia de tempo e de corpos-de-prova.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que pode-se obter ótimos resultados, quando se utiliza a simulação numérica dos ensaios "*Up-and-Down*", para a determinação do limite de resistência à fadiga de aços. Para que esta simulação seja eficiente, entretanto, é necessário que existam dados experimentais preliminares de distribuição da vida para a determinação da função distribuição.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bannantine, J.A. et al, 1990 "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis:", Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Collins, J.A., 1993, "Failure of Materials in Mechanical Design", Ed. John Wiley & sons, New York, USA, pp. 383-388.
- Fatemi, A. and Yang, L., 1998, Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A survey of the State of the Art for homogeneous Materials", Int. J. of Fatigue, Vol. 20, N° 1, pp. 9-34.
- Freitas, M.A. e Colosimo, E.A., 1997, "Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de vida Acelerados", Ed. Fundação Christiano Ottoni, pp 177-226.