

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA PREVISÃO DO LIMITE DE FADIGA DE MATERIAIS METÁLICOS

*Douglas Vinícius Castro*²
*Iuri Pinto Mascarenhas*²
*Ricardo Augusto Faria*³
*Luiz Cláudio Cândido*⁴
*Leonardo Barbosa Godefroid*⁴

Resumo

Este trabalho procurou avaliar algumas metodologias para previsão do limite de fadiga de materiais metálicos. Foi feita uma comparação entre o método tradicional de traçado da curva S-N sob controle de tensões com uma proposta relativamente recente de uma instituição japonesa, com utilização de um menor número de corpos-de-prova. Para a geração de resultados, foram empregados três aços inoxidáveis ferríticos. Verificou-se a praticidade do método japonês, desde que se atente para alguns cuidados.

Palavras-chave: Fadiga; Limite de fadiga; Aços inoxidáveis.

AVALIATION OF METHODOLOGIES USED TO DETERMINE THE FATIGUE ENDURANCE LIMIT OF METALLIC MATERIALS

Abstract

The purpose of this work is to study two distinct methodologies used to determine the fatigue endurance limit of metallic materials. The first methodology used the traditional decrease of applied stresses until the limit of 10^7 cycles without fracture, with the analysis of a S-N curve. The second methodology was proposed by a Japanese institution, with the use of few specimens. Three ferritic stainless steels were considered to generate the data. Results showed good performance of the Japanese method, if it is used carefully.

Key words: Fatigue; Endurance limit; Stainless steels.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Aluno de Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto – MG.*

³ *Engenheiro Metalurgista, ARCELORMITALL Timóteo, doutorando da REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.*

⁴ *Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.*

1 INTRODUÇÃO

Fadiga é descrita pela ASTM^[1] como um processo de modificação estrutural permanente localizada e progressiva, que ocorre em algum local ou locais de um material submetido a ciclos de tensões/deformações, levando ao seu trincamento e eventual fratura, após certo número de ciclos. As estatísticas mostram que mais de 50% das falhas estruturais é devida a este fenômeno,^[2] daí o grande interesse pelo desenvolvimento de materiais resistentes ao trincamento por fadiga.

A avaliação do desempenho de um material submetido a fadiga é comumente realizada através de ensaios sob controle de tensões.^[3] Neste caso, certo número de níveis de carregamento é escolhido e aplicado em corpos-de-prova padronizados, obtendo-se o correspondente número de ciclos para fratura. Gera-se assim um gráfico com a chamada curva S-N, conforme mostrado na Figura 1.^[4] Observa-se neste gráfico as regiões de fadiga de baixo ciclo, de alto ciclo e de vida infinita.

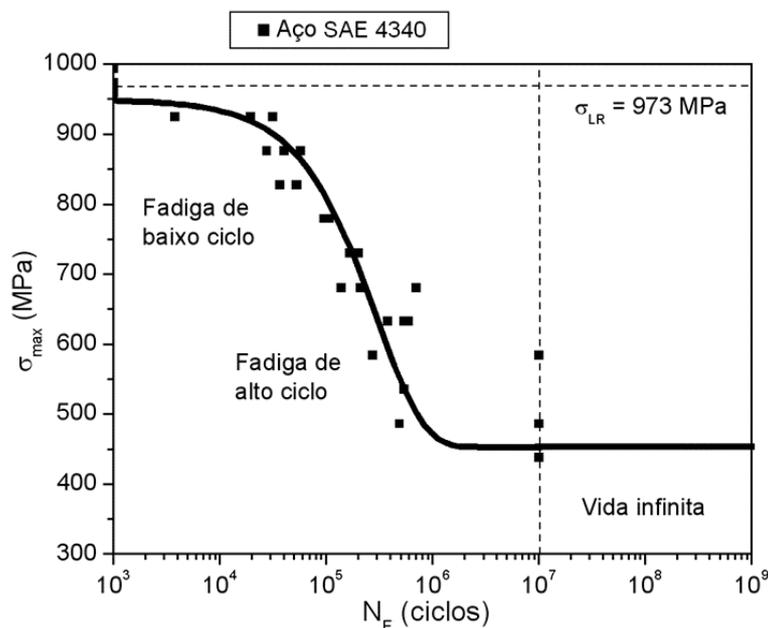


Figura 1 - Curva S-N de um aço do tipo SAE 4340.^[4]

A partir do traçado da curva S-N, uma característica importante é o chamado limite de fadiga, que corresponde ao nível de tensão abaixo do qual danos por fadiga não levam o material à fratura. Em outras palavras, a vida do material seria infinita. O limite de fadiga é muito utilizado no controle de qualidade e na seleção de materiais, assim como no projeto estrutural. Como existem atualmente controvérsias a respeito da existência de uma vida infinita, a ASTM padroniza o limite de fadiga para um número de ciclos fixo, igual a 1×10^7 ciclos.

A determinação de uma curva S-N completa e do limite de fadiga demandam o emprego de um número relativamente elevado de corpos-de-prova e de níveis de carregamento, com conseqüente elevado tempo de uso de laboratório e custos operacionais razoáveis. Posto isto, a *Japan Society of Mechanical Engineers – JSME* – elaborou uma metodologia^[5] a partir de um estudo estatístico e com certo nível de confiabilidade, que utiliza apenas 14 corpos-de-prova.

O método japonês parte do pressuposto que a curva S-N é constituída de duas partes lineares: uma reta com inclinação negativa, representando a região de fadiga

de alto ciclo, e uma reta horizontal, representando a região de vida infinita. A Figura 2 esquematiza a obtenção destas duas retas.^[5,6]

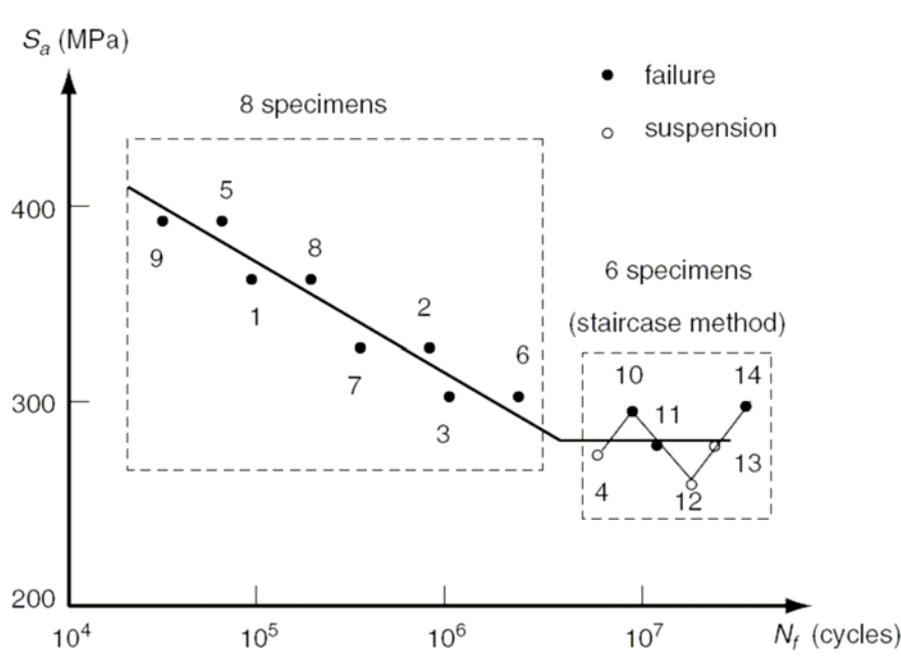


Figura 2 – Obtenção de uma curva S-N, método da JSME. ^[5,6]

Para se determinar a parte inclinada da curva S-N, estima-se inicialmente a resistência à fadiga para $N = 5 \times 10^4$ e $N = 1 \times 10^7$ ciclos, chamados S_a e S_b , a partir da existência de dados para um mesmo tipo de corpos-de-prova sob condições idênticas de tensão com materiais similares. Calcula-se o valor do intervalo entre os níveis de tensões $d_i = (S_a - S_b) / 3$, seguido pelo valor inicial de tensão $S_o = S_a - d_i$. Os próximos níveis de tensão serão $S_i = S_o + id_i$ ($i = \pm 1, \pm 2, \dots$). Neste caso são utilizados 4 níveis de tensões, cada nível com 2 corpos-de-prova, e os corpos-de-prova devem todos fraturar-se. Uma regressão linear vai posteriormente unir os resultados.

A parte horizontal da curva S-N é obtida com apenas 6 corpos-de-prova, através do chamado método *up-and-down*. O primeiro nível de tensão corresponde ao mais elevado nível de tensão onde nenhum corpo-de-prova fraturou-se nos ensaios da parte inclinada da curva S-N (para $N = 1 \times 10^7$ ciclos). O segundo nível de tensão é inferior ao anterior: se o corpo-de-prova fraturou-se, diminui-se novamente a tensão, caso contrário eleva-se a tensão de uma quantidade idêntica, e assim por diante. Gera-se então o zig-zag mostrado na Figura 2, e o limite de fadiga é obtido pela média simples entre os resultados.

O presente trabalho apresenta uma comparação entre os dois métodos descritos anteriormente, com a utilização de 3 aços inoxidáveis ferríticos.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A composição química dos aços inoxidáveis ferríticos utilizados para gerar as curvas S-N está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos aços estudados (% em peso).^[7]

| Aço | Cr | Ti | Nb | Mn | C + N (ppm) |
|------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| 409 | 11.35 | 0.134 | 0.021 | 0.131 | 192 |
| 441 | 18.06 | 0.133 | 0.563 | 0.149 | 225 |
| F17T | 16.18 | 0.452 | 0.011 | 0.339 | 316 |

A Figura 3(a,b,c) apresenta as microestruturas dos aços estudados, após preparação metalográfica, ataque químico com reativo Vilella e observação no microscópio ótico. Pode-se perceber um tamanho de grão menor para o aço F17T, devido a condições de tratamento termo-mecânico.

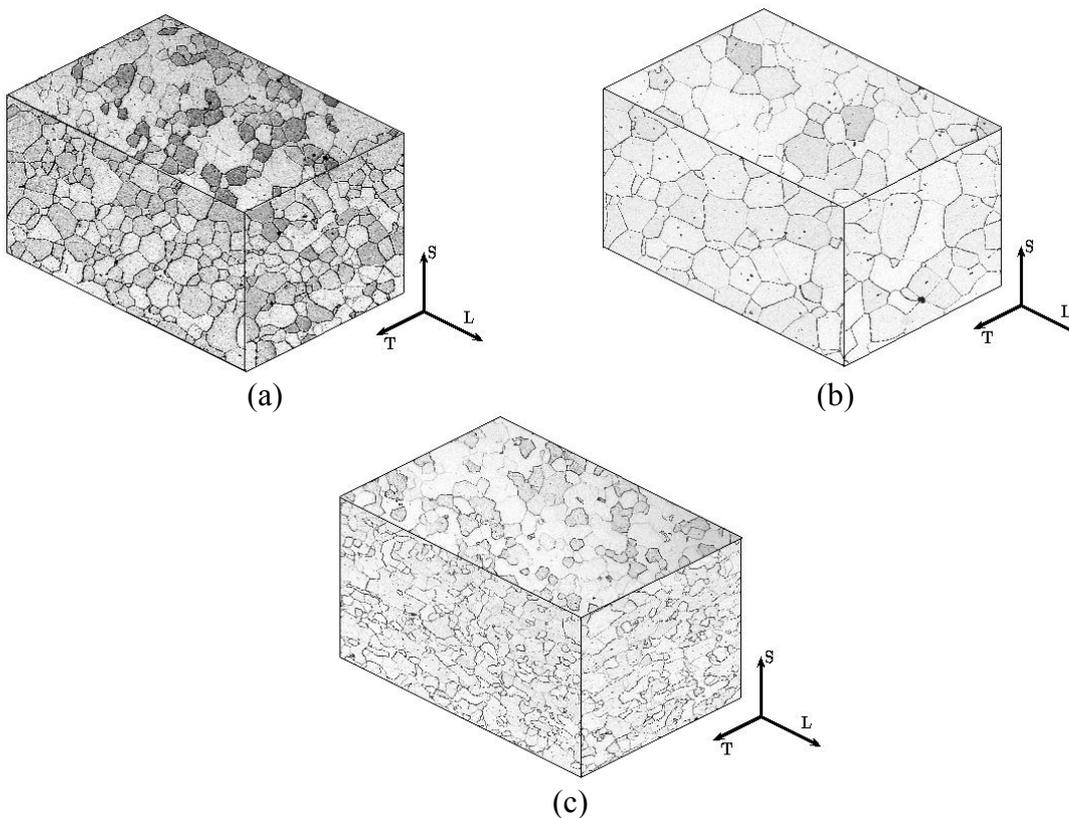


Figura 3: Microestrutura dos aços estudados. Ataque Vilella. 200 X. (a) 409; (b) 441; (c) F17T.⁽⁷⁾

A Tabela 2 mostra algumas propriedades mecânicas destes aços, obtidas através de ensaios de tração na temperatura ambiente. Pode-se observar que o aço F17T apresenta a maior resistência mecânica, devida à sua composição química e ao refino de grão.

Tabela 2 - Propriedades de tração dos aços estudados. Fonte: Faria [7].

| Aço | YS (MPa) | UTS (MPa) | $\Delta L/L_0$ (%) |
|------|----------|-----------|--------------------|
| 409 | 240 | 401 | 38 |
| 441 | 284 | 443 | 34 |
| F17T | 275 | 453 | 32 |

YS = tensão limite de escoamento; UTS = tensão limite de resistência; $\Delta L/L_0$ = deformação total

Os ensaios de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica Instron de 25 ton, com aquisição de dados por computador, na temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados na frequência de 30 Hz, numa razão R entre tensões de 0,1. Curvas tensão máxima versus número de ciclos para fratura foram obtidas, desde uma tensão aplicada próxima ao limite de resistência dos aços até uma tensão característica do seu limite de fadiga. Foram utilizados 5 corpos-de-prova para cada nível de tensão aplicado.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fadiga estão mostrados na Figura 4, e possuem dimensões de acordo com norma da ASTM.^[3] A confecção dos corpos-de-prova consistiu no corte por *laser* das chapas dos aços estudados e lixamento das bordas para eliminação da zona afetada pelo corte. O lixamento foi feito no sentido longitudinal de laminação.



Figura 4 – Foto de um corpo-de-prova para ensaio de fadiga.

Para a montagem das curvas SxN pelo procedimento tradicional, definiu-se níveis de tensão a partir do valor do limite de resistência em tração de cada aço, isto é, montou-se uma planilha com valores decrescentes de carga, a partir de 100% do limite de resistência por tração. Em cada nível de carregamento foram testados 5 corpos-de-prova. Por padronização ficou determinado o valor de 10^7 ciclos como sendo o valor para o limite de fadiga para o qual o material teria vida infinita.

Para a montagem das curvas SxN pelo procedimento proposto pela JSME, os procedimentos apresentados a seguir foram considerados:

a) Regiões de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo:

- ✓ estimativa do limite de fadiga, para determinação dos intervalos de diminuição do carregamento por fadiga;
- ✓ aplicação de cada carregamento, com utilização de 2 corpos-de-prova por nível, até que se atingisse um nível que não rompesse o corpo-de-prova, para 10^7 ciclos;
- ✓ traçado de uma reta inclinada pelos pontos encontrados.

b) Região do limite de fadiga:

- ✓ aplicação de níveis de carregamento pelo método *up-and-down*;
- ✓ determinação do limite de fadiga por média entre os pontos encontrados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados de fadiga obtidos com os aços inoxidáveis, utilizando-se a metodologia tradicional. Nesta figura são mostrados os pontos experimentais, e traçadas curvas de tendência, na forma de decaimento exponencial. As linhas tracejadas horizontais representam o valor da tensão limite de resistência para cada aço estudado. Observa-se que o aço 409 apresentou o pior desempenho nas três regiões do gráfico (fadiga de baixo ciclo, fadiga de alto ciclo e limite de fadiga), e que o aço F17T apresentou o maior limite de fadiga, muito provavelmente devido ao seu menor tamanho de grão e maior tensão limite de

resistência por tração. A Tabela 3 apresenta os valores estimados para o limite de fadiga dos três aços.

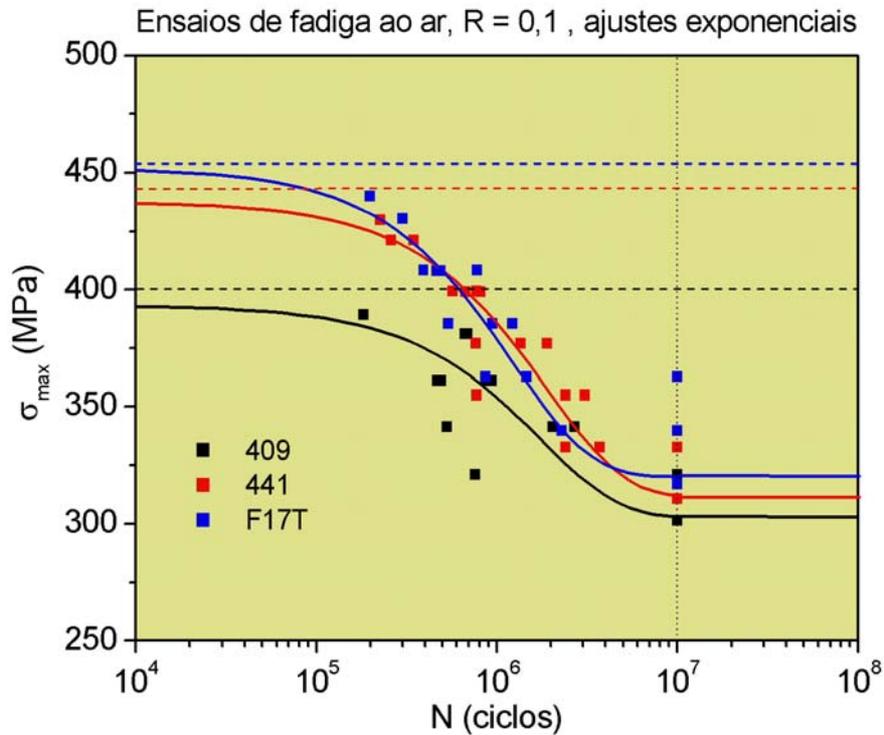


Figura 5: Curvas SxN para os aços estudados; metodologia tradicional.

Tabela 3 – Limite de fadiga estimado dos aços estudados. Método tradicional.

| Aço | σ_{max} (MPa) |
|------|----------------------|
| 409 | 302 |
| 441 | 311 |
| F17T | 320 |

σ_{max} = tensão limite de fadiga
(valor máximo da ciclagem).

A Figura 6 apresenta os resultados de fadiga obtidos com os aços inoxidáveis, utilizando-se a metodologia proposta pela JSME. Observa-se novamente que o aço F17T apresentou o maior limite de fadiga. A Tabela 4 apresenta os valores estimados para o limite de fadiga dos três aços.

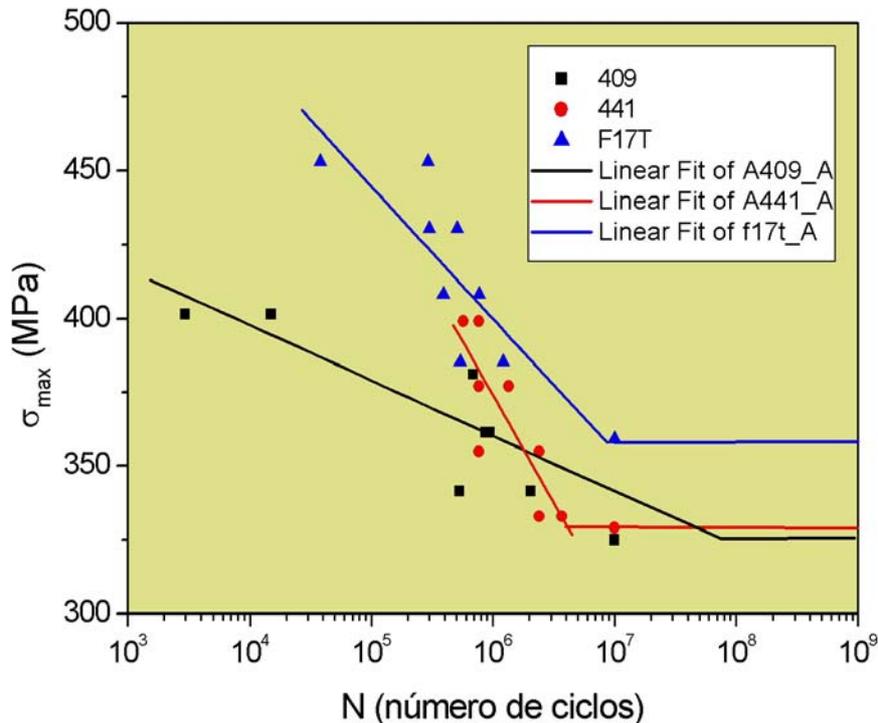


Figura 6: Curvas SxN para os aços estudados; metodologia JSME.

Tabela 4 – Limite de fadiga estimado dos aços estudados. Método JSME.

| Aço | σ_{max} (MPa) |
|------|----------------------|
| 409 | 324 |
| 441 | 329 |
| F17T | 359 |

σ_{max} = tensão limite de fadiga
(valor máximo da ciclagem).

A Tabela 5 consolida os valores de limite de fadiga para os aços estudados, considerando-se os dois métodos distintos analisados. Esta tabela apresenta a diferença percentual encontrada entre os dois casos. Observa-se que a diferença entre as duas estimativas não é tão grande.

Tabela 5 – Limite de fadiga estimado dos aços estudados. Métodos tradicional e JSME.

| Aço | σ_{max} (MPa) tradicional | σ_{max} (MPa) JSME | Diferença (%) |
|------|----------------------------------|---------------------------|---------------|
| 409 | 302 | 324 | 7,3 |
| 441 | 311 | 329 | 5,8 |
| F17T | 320 | 359 | 12,2 |

σ_{max} = tensão limite de fadiga (valor máximo da ciclagem).

A partir da análise dos dois métodos distintos de avaliação do limite de fadiga dos aços estudados, algumas considerações devem ser realizadas. Inicialmente, é óbvio que o método da JSME é mais rápido e mais barato do que o método tradicional. Sob este aspecto, o método proposto pela JSME seria mais recomendável para a estimativa do limite de fadiga de materiais metálicos. Por outro lado, foram notados diversos inconvenientes deste método, que devem ser levados em conta ao se utilizar este método:

há a necessidade de uma estimativa inicial para o limite de fadiga, que pode ser equivocada, levando a erros nos cálculos subseqüentes;
o resultado do cálculo do intervalo entre níveis de carregamento para a região inclinada da curva SxN pode não ser adequado para a geração de pontos experimentais, isto é, pode ser demasiadamente elevado para criar quatro níveis, exigindo então uma redefinição deste cálculo;
se o primeiro nível de carregamento adotado na parte inclinada da curva SxN gerar algum valor demasiadamente pequeno para o número de ciclos para fratura do corpo-de-prova, então a reta que aproxima a dispersão nesta região poderá não ter uma inclinação que de fato represente esta região: em outras palavras, o método pode misturar as regiões distintas de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo, sendo então recomendado o valor de 1×10^5 ciclos para o valor inicial a ser usado para o traçado da parte inclinada da curva SxN.

4 CONCLUSÃO

O método proposto pela JSME para a estimativa do limite de fadiga de materiais metálicos pode ser utilizado, desde que sejam tomados certos cuidados práticos.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM E 1823-04: Standard Terminology relating to fatigue and fracture testing. 2004 Annual Book of ASTM Standards.
- 2 ASM Handbook, Vol. 19 – Fatigue and Fracture, American Society for Materials, 1996.
- 3 ASTM E 466-04: Standard Practing for conducting force controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. 2004 Annual Book of ASTM Standards.
- 4 Peres, L.O.R.: Dissertação de mestrado, REDEMAT/UFOP, 2008.
- 5 Nakazawa, H. e Kodama, S.: Statistical Reseach on Fatigue and Fracture, Current Japanese Materials Research, vol. 2, 1987, pp. 59-69.
- 6 Lee, Y.; Pan, J.; Hathaway, R.; Barkey, M.: Fatigue Testing and Analysis; Elsevier, Oxford, 2005.
- 7 Faria, R.A.: Tese de doutorado, REDEMAT/UFOP, 2006.