

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE-3M

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NO LEVANTAMENTO DE CURVAS  
DE FADIGA S-N DE MATERIAIS METÁLICOS A TEMPERATURA AMBIENTE

Leandro Pereira Costa

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE-3M

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NO LEVANTAMENTO DE CURVAS  
DE FADIGA S-N DE MATERIAIS METÁLICOS A TEMPERATURA AMBIENTE

LEANDRO PEREIRA COSTA  
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2010

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly

Prof. Dr. Cristiane Javorsky

Dr. Ricardo Callegari Jacques

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann

Coordenador do PPGEM

*Dedico este trabalho exclusivamente ao meu pai.*

## **AGRADECIMENTOS**

A todos colegas, do Laboratório de Metalurgia Física, que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Telmo Roberto Strohaecker e Afonso Reguly.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	<i>Fadiga .....</i>	17
2.1.1	Ensaio de fadiga.....	18
2.1.2	Análise estatística dos ensaios de fadiga .....	20
2.2	<i>Incerteza de Medição .....</i>	24
2.2.1	Tipo de fonte de incerteza .....	27
2.2.2	Importância da Incerteza de Medição.....	27
<b>3</b>	<b>Estimativa da Incerteza de Medição em Ensaio de Fadiga .....</b>	<b>29</b>
3.1	<i>Ensaio de certificação de produtos .....</i>	29
3.2	<i>Ensaio para determinação do Limite de Fadiga .....</i>	29
3.3	<i>Levantamento da Curva S-N .....</i>	30
3.3.1	Definição do mensurando e do seu modelo.....	30
3.3.2	Identificação das fontes de incerteza;.....	30
3.3.3	Quantificação das fontes de incerteza .....	32
3.3.4	Cálculo dos coeficientes de sensibilidade .....	34
3.3.5	Cálculo dos componentes de incerteza, incerteza combinada e graus de liberdade efetivos .....	34
3.3.6	Cálculo do coeficiente de abrangência.....	35
3.3.7	Cálculo da Incerteza Expandida .....	35
3.4	<i>Incerteza da carga/força aplicada nos ensaios de fadiga.....</i>	36
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
4.1	<i>Material e Corpos de Prova.....</i>	38
4.2	<i>Calibração Dinâmica e Avaliação do desalinhamento.....</i>	40
4.3	<i>Máquina de Ensaio e Dispositivos de Fixação.....</i>	41
4.4	<i>Cálculos Estatísticos e da Incerteza de Medição .....</i>	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
5.1	<i>Avaliação do desalinhamento .....</i>	43
5.2	<i>Calibrações Dinâmicas .....</i>	44
5.3	<i>Ensaio de fadiga e Curva S-N .....</i>	46
5.4	<i>Cálculo das bandas de confiança.....</i>	48

5.5	<i>Cálculo de incerteza da tensão aplicada</i> .....	49
5.6	<i>Cálculo das bandas de incerteza</i> .....	51
5.6.1	<i>Influência da incerteza da tensão nas bandas de incerteza</i> .....	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>
	<b>ANEXO A: MEMORIAL DE CÁLCULO</b> .....	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Curva S-N mostrando as diferentes regiões de comportamento dos metais. (adaptado de SHIGLEY 2001) .....	18
Figura 2.2: Nomenclatura para ensaios de fadiga. (Adaptado de STEPHENS et. al. 2001)	20
Figura 2.3: Diagrama S-N com três curvas obtidas para diferentes razões de carregamento (adaptado de CAMERON 1996). .....	20
Figura 2.4: Gráfico de probabilidade log-normal com diferentes níveis de tensão para uma liga de alumínio 7075-T6. (adaptado de STEPHENS et al 2001).....	23
Figura 2.5: Curvas S-N probabilísticas para a liga de alumínio 7075-T6. (adaptado de STEPHENS et al 2001) .....	24
Figura 2.6: Diagrama do método de estimativa de incerteza. (PIZZOLATO 2006).....	26
Figura 2.7: Avaliação da conformidade de uma medida. ....	28
Figura 3.1: Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza para a tensão em ensaios de fadiga.....	32
Figura 3.2: Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza para o número de ciclos para fratura em um ensaio de fadiga. ....	32
Figura 3.3: Grafico ilustrativo mostrando a construção das bandas de incerteza.....	36
Figura 4.1: Geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados. ....	38
Figura 4.2: Metalografia da seção longitudinal. ....	39
Figura 4.3: Metalografia da seção transversal. ....	39
Figura 4.4: Corpo de prova instrumentado com <i>strain gauges</i> . ....	40
Figura 4.5: Máquina de ensaio utilizada e detalhe da fixação do corpo de prova.....	41
Figura 5.1: Curva de dobramento percentual contra carga aplicada obtida para o sistema de ensaios utilizado. ....	43
Figura 5.2: Desvio padrão da carga máxima em função da frequência de ensaio.....	44
Figura 5.3: Desvio padrão da carga máxima em função da carga aplicada.....	44
Figura 5.4: Valores de correção da carga aplicada para frequência de 20Hz.....	45
Figura 5.5: Comparação do desvio padrão da carga máxima medido pela máquina de ensaios e pela amostra instrumentada, para carga de 13kN. ....	46



Figura 5.6: Curva S-N resultante dos ensaios.....	46
Figura 5.7: Variação do desvio padrão de $\log(N)$ em função da tensão aplicada. ....	48
Figura 5.8: Curva S-N com bandas de confiança. ....	49
Figura 5.9: Comparação entre as fontes de incerteza. ....	51
Figura 5.10: Comparação entre bandas de incerteza e bandas de confiança da equação 2.4. .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores recomendados para ensaio de fadiga segundo norma ASTM E739....	19
Tabela 2.2: Incertezas tipo B. ....	27
Tabela 3.1: Tipo e estimativa do valor para as fontes de incerteza levantadas. ....	33
Tabela 4.1: Composição química do material ensaiado. ....	38
Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de fadiga. ....	47
Tabela 5.2: Cálculo de incerteza da carga máxima aplicada, para tensão de 480MPa. ....	50
Tabela 5.3: Cálculo da incerteza da tensão máxima aplicada para tensão de 480MPa. ....	50
Tabela 5.4: Incerteza da tensão máxima aplicada para cada nível de tensão utilizado. ....	50
Tabela 5.5: Equações das bandas de incerteza e da curva média. ....	51
Tabela 5.6: Comparação entre valor do número de ciclos para bandas de incerteza com e sem consideração da incerteza da tensão aplicada. ....	53
Tabela A.1: Cálculo da incerteza do número de ciclos para cada nível de carga. ....	62
Tabela A.2: Cálculo da incerteza expandida do logaritmo do número de ciclos para cada nível de carga. ....	63
Tabela A.3: Cálculos utilizados para ajuste da banda de incerteza inferior. ....	63
Tabela A.4: Cálculos utilizados para ajuste da banda de incerteza superior. ....	64

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1: Replicação.....	19
Equação 2.2: Formato para ajuste da curva S-N .....	21
Equação 2.3: Forma mais usual da equação 2.2 .....	21
Equação 2.4: Bandas de confiança .....	21
Equação 2.5: Simplificação das bandas de confiança .....	21
Equação 2.6: Desvio padrão da curva média.....	21
Equação 2.7: Outro possível formato para ajuste da curva S-N.....	22
Equação 2.8: Modelo para o mensurado .....	25
Equação 2.9: Cálculo da incerteza do mensurado .....	25
Equação 2.10: Simplificação do cálculo de incerteza .....	25
Equação 2.11: Graus de liberdade efetivos .....	26
Equação 2.12: Incerteza expandida .....	26
Equação 3.1: Tensão para corpo de prova cilíndrico.....	34
Equação 3.2: Coeficiente de sensibilidade da tensão devido ao diâmetro .....	34
Equação 3.3: Coeficiente de sensibilidade da tensão devido a carga.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<b>U</b>	Incerteza expandida;
<b><math>u_c</math></b>	Incerteza combinada;
<b><math>u_i</math></b>	Incerteza da grandeza $i$ .
<b><math>c_i</math></b>	Coefficiente de sensibilidade da grandeza $i$ ;
<b><math>r(i,j)</math></b>	Coefficiente de correlação entre as grandezas $i$ e $j$ ;
<b><math>\bar{X}</math></b>	Valor médio de $X$ ;
<b>s</b>	Desvio padrão experimental;
<b>a</b>	parâmetro/valor estimado para as distribuições uniforme e triangular;
<b><math>v_i</math></b>	Graus de liberdade da incerteza da grandeza $i$ ;
<b><math>v_{eff}</math></b>	Graus de liberdade efetivos;
<b>k</b>	Coefficiente de abrangência;
<b>N</b>	Numero de ciclos para falha;
<b>S</b>	Solicitação (geralmente expressa com tensão)
<b>n</b>	Número de amostras;
<b><math>\sigma</math></b>	Tensão;
<b>P</b>	Carga/Força;
<b>A</b>	Constante da curva S-N;
<b>B</b>	Constante da curva S-N;
<b>d</b>	Diâmetro do corpo de prova
<b>R</b>	Razão de fadiga

## **RESUMO**

Vem se tornando cada vez mais importante o conhecimento e avaliação da incerteza de medição em todas as áreas de ensaios experimentais. Este trabalho visa estudar a incerteza de medição no levantamento do comportamento em fadiga de materiais metálicos utilizando-se de curvas S-N. Embora existam diversas normas e códigos sobre a análise estatística dos resultados obtidos em fadiga, eles avaliam apenas a dispersão no número de ciclos para a falha, não considerando fatores como as fontes de incerteza das tensões aplicadas, da máquina de ensaios utilizada, entre outros.

Palavras chave: fadiga, curva S-N, incerteza de medição.

## **ABSTRACT**

The knowledge and evaluation of measurement uncertainty is becoming more and more important in all areas of experimental tests. The goal of this work is to study the measurement uncertainty in the fatigue tests of metallic materials using the S-N curve approach. Although there are various standards and codes on statistical analysis of the fatigue results, they only assess the dispersion in the number of cycles to failure, not taking into account uncertainty sources of applied load, test machine, among others.

Key words: fatigue, S-N curves, uncertainty of measurement.

# 1 INTRODUÇÃO

Existem diversas lacunas no conhecimento no que diz respeito à incerteza de medição aplicada a ensaios de fadiga, apesar de existirem normas para avaliação estatística de dados e também procedimentos para estimativa da incerteza para alguns tipos de ensaio de fadiga.

A estimativa da incerteza de medição deve ser uma preocupação dos laboratórios de ensaios por ser uma das ferramentas que fornecem confiança às medições realizadas (PIZZOLATO 2006) além de ser uma exigência para acreditação dos laboratórios de ensaios pela norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, junto a institutos como o INMETRO, por exemplo.

As normas disponíveis sobre fadiga dizem respeito apenas a métodos para análise estatística dos dados, e não levam em consideração os erros advindos da máquina de ensaios utilizada, nem os que podem advir diretamente do corpo de prova. Como fontes de erro advindas da máquina de ensaios podemos citar a calibração dinâmica, desalinhamento, controle dinâmico da carga, inércia do sistema e aquisição de dados do sistema, vibração do sistema, etc. Para o caso do próprio corpo de prova podemos citar desalinhamento, dimensional, rugosidade, etc.

O procedimento Uncert CoP 02 (SM&T 2000) leva em consideração diversos fatores que afetam o ensaio de fadiga de baixo ciclo. Porém não prevê a incerteza da curva S-N para esse tipo de ensaio com baixo número de ciclos. O procedimento Uncert CoP 01 (SM&T 2000) trata de fadiga de alto ciclo porém aplica-se somente a determinação do limite de fadiga. Este trabalho vem de encontro a esses dois procedimentos analisando a incerteza de fadiga da curva S-N na região de alto ciclo.

Outro procedimento correlato é o Uncert CoP 05 (SM&T 2000) que trata de ensaios de taxa de propagação de trincas. A análise estatística utilizada para as curva S-N é a mesma utilizada para os ensaios de taxa de propagação (IIW 2003, STAPHENS et al. 2001).

Diversos trabalhos publicados recentemente tratam de alguma forma da incerteza de medição em fadiga. Geralmente tratam da incerteza de certos modelos de previsão de

vida em fadiga ou da incerteza relacionada à fadiga em algumas aplicações específicas (SVENSSONS 1997, KARADENIZ 2000, KOUTSOURELAKIS et. al. 2006, BENGTTSSON 2008). Existe pouco material publicado a respeito da incerteza dos resultados dos ensaios de fadiga, que são os dados utilizados em projeto, e por isso são de grande importância. Deve ser destacado que há uma estimativa que 90% das falhas de componentes mecânicos ocorre devido a fadiga (DIETER 1988, STEPHENS et. al. 2001, CALLISTER 2007).

Existem, também, modelos mais sofisticados de redes neurais artificiais (PIERCE et al 2008). Nestes modelos inicialmente o sistema é treinado através de dados fornecidos ao programa e depois este pode ser utilizado para prever certas soluções de diferentes problemas. Porém os resultados deste tipo de sistema dependerão da qualidade dos dados utilizados para fazer seu treinamento (BUČAR et. al. 2005). Neste contexto também seria interessante serem conhecidos os valores de incerteza dos dados de fadiga utilizados para o treinamento do sistema, podendo estes valores serem levados em consideração ou servirem apenas como um indicativo da qualidade dos dados.

Assim os objetivos deste trabalho são: listar, avaliar e quantificar as diversas fontes de incerteza envolvidas nos ensaios de fadiga; Determinar as fontes mais importantes; Estudar a calibração dinâmica das células de carga utilizadas para ensaios de fadiga; Montar curvas que expressem a incerteza da curva S-N;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Fadiga*

Fadiga é um dano estrutural, localizado, progressivo e permanente que ocorre quando o material é submetido a deformações cíclicas ou flutuantes, geralmente a uma tensão nominal abaixo da tensão de escoamento. Três condições devem ser simultaneamente satisfeitas para a sua ocorrência: tensões cíclicas, tensões trativas e deformação plástica. As tensões trativas assim como as deformações podem ser apenas locais (FINE 1996).

Uma possível divisão dos estágios de fadiga é a seguinte:

1. Nucleação (iniciação de trincas de fadiga);
2. Propagação de trincas;
3. Fratura final.

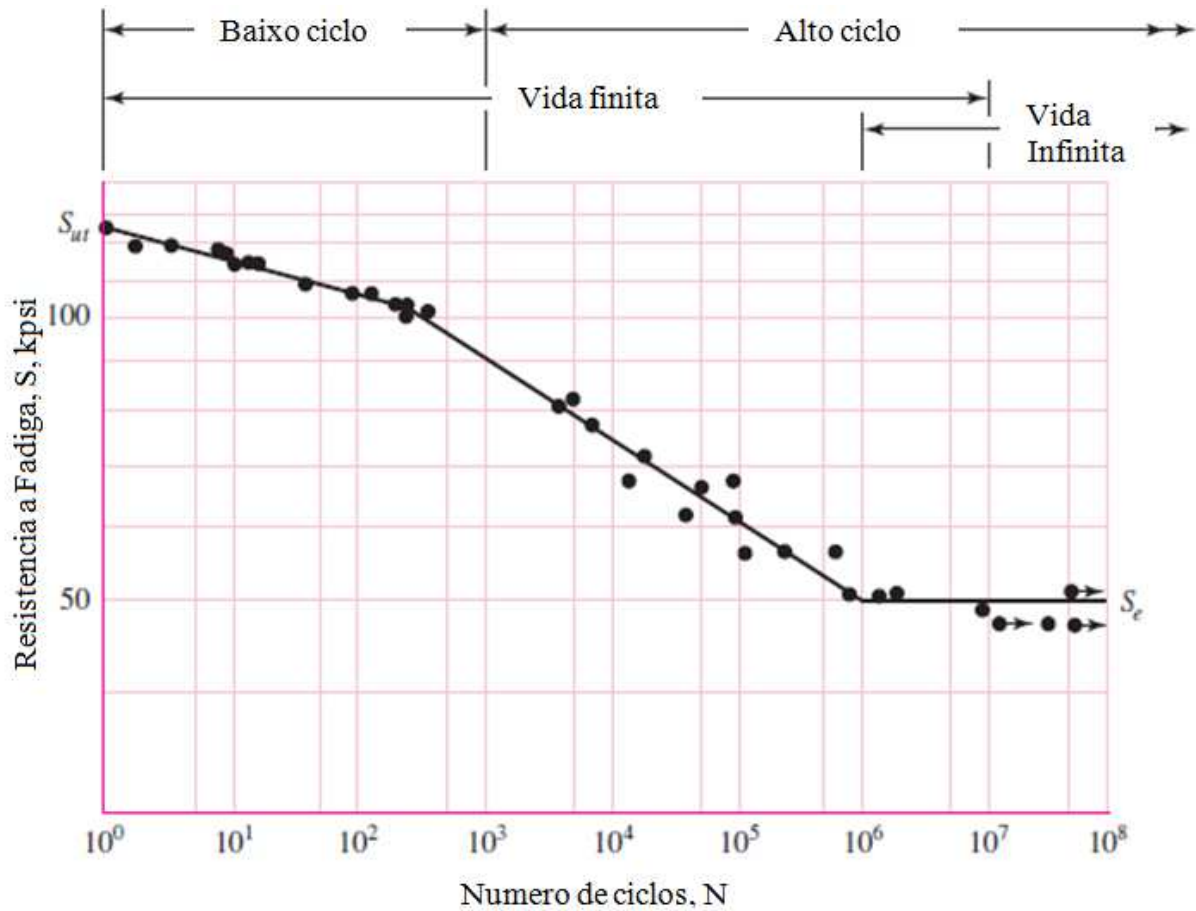
O estudo do fenômeno de fadiga é de grande importância uma vez que a maioria das falhas em serviço são causadas por esse processo. Também é de se destacar que uma grande quantidade de parâmetros tanto mecânicos quanto metalúrgicos afetam o desempenho em fadiga dos materiais e componentes em geral.

Wohler, apesar de não ter sido o primeiro a observar o fenômeno, foi o primeiro a desenvolver uma metodologia de estudo do mesmo entre 1852 e 1869. Ele criou a agora denominada curva S-N (Solicitação contra Número de ciclos). Tais curvas são construídas graficando-se a solicitação aplicada contra o número de ciclos para fratura em escala logarítmica. Tendo como base essas curvas pode-se comparar o desempenho de diferentes materiais para diversos níveis de carga. (SCHUTZ 1996)

Falamos aqui em solicitação pois é possível o ensaio de fadiga e levantamento de curva S-N também para peças e componentes (não somente para o material), podendo, nesses casos, a solicitação ser expressa em carga/força ou ainda em momento fletor por exemplo. Porém o formato dos resultados e sua análise seriam praticamente as mesmas.

O comportamento dos metais pode ser dividido em duas regiões: baixo ciclo e alto ciclo, sendo geralmente considerado alto ciclo acima de mil ciclos e baixo ciclo abaixo disso. Nota-se, ainda, a existência de um limite de fadiga (tensão abaixo da qual o material

não rompe por fadiga) para alguns materiais, principalmente os ferrosos (SHIGLEY 2001). A Figura 2.1 apresenta uma curva S-N apresentado as diferentes regiões.



**Figura 2.1:** Curva S-N mostrando as diferentes regiões de comportamento dos metais. (adaptado de SHIGLEY 2001)

### 2.1.1 Ensaios de fadiga

Para o levantamento de curvas S-N é necessário o emprego de vários corpos de prova. Cada corpo de prova é submetido a um carregamento, geralmente senoidal, com amplitude constante, até que ocorra a fratura do mesmo ou até que seja atingido o número máximo de ciclos estipulado (chamado em inglês de *runout*). O número de corpos de prova utilizados depende da finalidade da curva a ser gerada e da variabilidade dos resultados. Para a determinação do número de níveis de amplitude a serem utilizados pode-se aplicar o conceito de replicação definido na Eq. 2.1. A Tabela 2.1 adaptada da Norma ASTM E739 mostra o número mínimo de corpos de prova e o valor de replicação recomendados de acordo com o tipo de ensaios conduzidos.

$$\text{replicação (\%)} = 100. \left( 1 - \frac{\text{número de diferentes níveis de solicitação utilizados}}{\text{número total de corpos de prova ensaiados}} \right) \quad \text{Eq. 2.1}$$

**Tabela 2.1- Valores recomendados para ensaio de fadiga segundo norma ASTM E739.**

Tipo de Ensaio	Numero mínimo de corpos de prova	Replicação mínima (%)
Preliminar	6 a 12	17 a 33
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	6 a 12	33 a 50
Dados utilizáveis em projeto	12 a 24	50 a 75
Dados com confiabilidade estatística	12 a 24	75 a 88

O modo de carregamento do material pode variar dependendo de vários fatores como finalidade do mesmo, forma em que este é disponível, assim como o equipamento para ensaio disponível. Os modos mais comuns são axial, flexão e flexão rotativa.

Vários parâmetros podem ser usados para descrever as magnitudes das solicitações aplicadas nos ensaios contudo são necessários apenas dois para descrever completamente um ciclo de fadiga com amplitude constante. Combinações possíveis são: tensão máxima e razão de fadiga ( $R = \sigma_{\text{mínima}}/\sigma_{\text{máxima}}$ ), ou: amplitude de tensão e tensão média. A Figura 2.2 apresenta as diversas nomenclaturas utilizadas para os ensaios de fadiga com amplitude constante. A Figura 2.3 apresenta um diagrama S-N com três curvas obtidas para diferentes razões de carregamento (R).

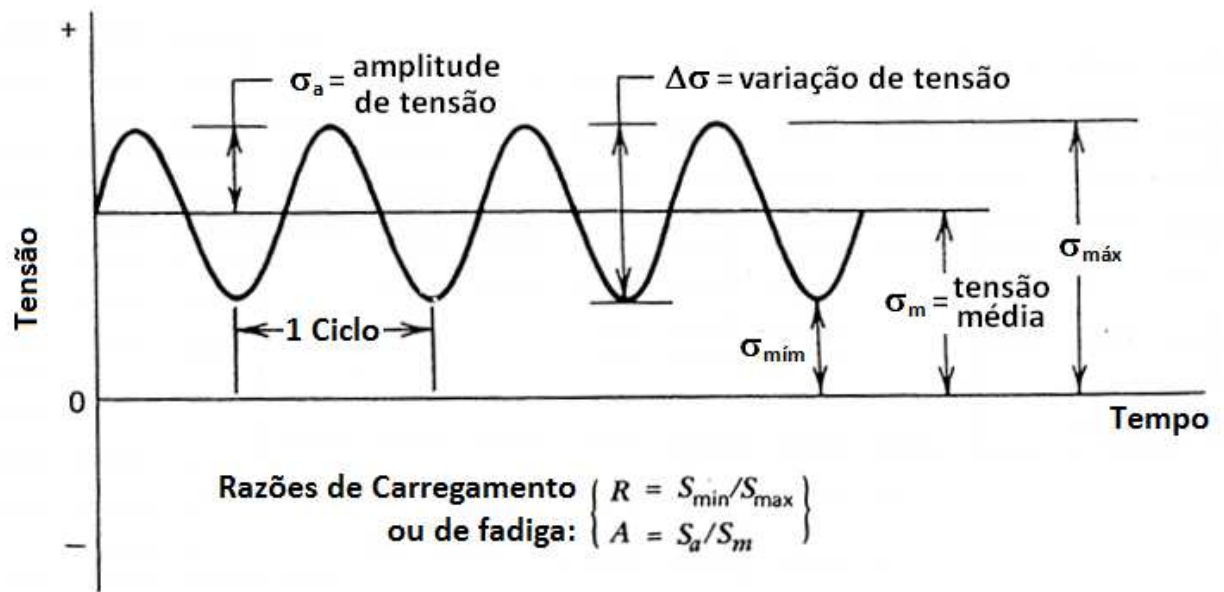


Figura 2.2: Nomenclatura para ensaios de fadiga. (Adaptado de STEPHENS et. al. 2001)

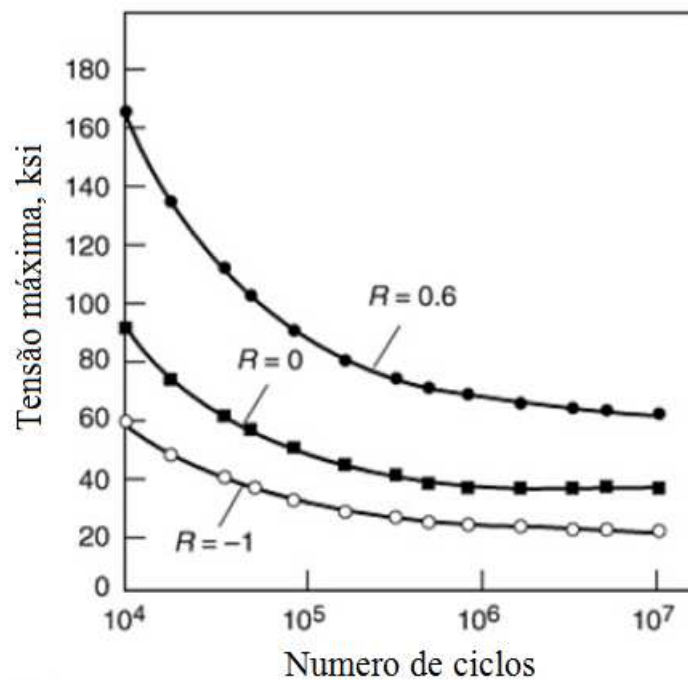


Figura 2.3: Diagrama S-N com três curvas obtidas para diferentes razões de carregamento (adaptado de CAMERON 1996).

### 2.1.2 Análise estatística dos ensaios de fadiga

Normas de análise estatística de dados de fadiga geralmente usam um curva linearizada na forma da Eq. 2.2, exemplo ASTM E739. Feito o ajuste da curva aos dados experimentais obtidos é então estimado o desvio padrão. A partir disso podem ser

calculados intervalos de confiança dos coeficientes A e B e também das bandas de confiança para toda a curva média.

$$\log(N) = \log(A) + B \cdot \log(\sigma) \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$\sigma^B N = A \quad \text{Eq. 2.3}$$

A Eq. 2.2 pode ser reescrita no formato da Eq. 2.3 que é mais usual na literatura. Da forma como as equações estão aqui escritas o valor de B é negativo.

Deve-se observar que apesar de usualmente as curvas S-N serem expressas com o valor do número de ciclos na abcissa e de solicitação na ordenada, para análise estatística deve ser considerado o contrário pois a solicitação é a variável independente e o número de ciclos a dependente.

O cálculo das bandas de confiança pode ser feito de acordo com a Eq. 2.4, abaixo. Tal equação pode ser simplificada na forma da Eq. 2.5, no caso de grande número de corpos de prova ensaiados e se os valores de tensão aplicados sejam próximos da tensão média (IIW 2003). O desvio padrão (s) nesses casos é calculado pela Eq. 2.6.

$$\log(N) = \log(A) + B \cdot \log(\sigma) \pm k \cdot s \cdot \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log(\sigma) - \overline{\log(\sigma)})^2}{\sum_{i=1}^n (\log(\sigma_i) - \overline{\log(\sigma)})^2} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$\log(N) = \log(A) + B \cdot \log(\sigma) \pm k \cdot s \quad \text{Eq. 2.5}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{ \log(N_i) - [\log(N)]_{\text{curva ajustada}} \}^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n \{ \log(N_i) - [\log(A) + B \cdot \log(\sigma)] \}^2}{n - 2} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Algumas normas, por exemplo a BS 7608, consideram uma curva do tipo da Eq. 2.5, sendo que a norma citada inclusive traz uma classificação das curvas S-N em função dos valores das constantes A, B e do desvio padrão (s), para estruturas soldadas.

As equações Eq. 2.4 e Eq. 2.5 também são usadas quando os dados de fadiga são utilizados para projeto de estruturas e componentes. O valor do coeficiente de abrangência

(k) é algumas vezes tomado como igual a 2, o que considerando uma distribuição normal de log(N) equivale um nível de confiança de aproximadamente 95%. Porém o valor de k também pode ser determinado com base em tabelas da distribuição t-Student tendo como graus de liberdade o número de amostras ensaiadas menos dois e o nível de confiança escolhido.

A utilização das equações acima descritas são baseadas em alguns considerações, listadas abaixo (IIW 2003), que devem ser verdadeiras para sua utilização:

1. Relação entre log(S) e log(N) é linear.
2. Os valores de número de ciclos (N) para cada valor de solicitação (S) tem distribuição log-normal.
3. O desvio padrão de log(N) não varia com o valor de solicitação aplicada.
4. Cada resultado é estatisticamente independente dos outros.

A primeira consideração pode não ser verdadeira principalmente nas regiões de transição entre fadiga de baixo ciclo e alto ciclo e também entre vida finita e vida infinita. Nesses casos pode-se adotar um modelo conforme a Eq. 2.7 (sendo B, C, D e E, constantes dependentes do material), as considerações 2 e 4 geralmente são verdadeiras (IIW 2003).

$$N = \frac{B \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - E}{C} \right)^D \right]}{\sigma - E} \quad \text{Eq. 2.7}$$

A terceira consideração é mais problemática especialmente para corpos de prova lisos sem entalhes. Nesses casos geralmente a dispersão entre os resultados aumenta para níveis de solicitações menores. Para níveis de solicitações mais baixos a maior parte da vida em fadiga estaria na etapa de nucleação de uma trinca podendo variar bastante de uma amostra para outra. Já em corpos de prova com entalhes (ou soldados) essa etapa não é tão importante gerando uma dispersão dos resultados mais constante para todos níveis de carga. (STEPHENS et al 2001)

A Figura 2.4 apresenta resultados de frequência relativa para fratura em diferentes níveis de tensão para liga de alumínio 7075-T6. Nota-se nessa figura a crescente dispersão

dos resultados com a redução da tensão aplicada. A Figura 2.5 apresenta curvas S-N probabilísticas obtidas a partir dos mesmos resultados da figura anterior.

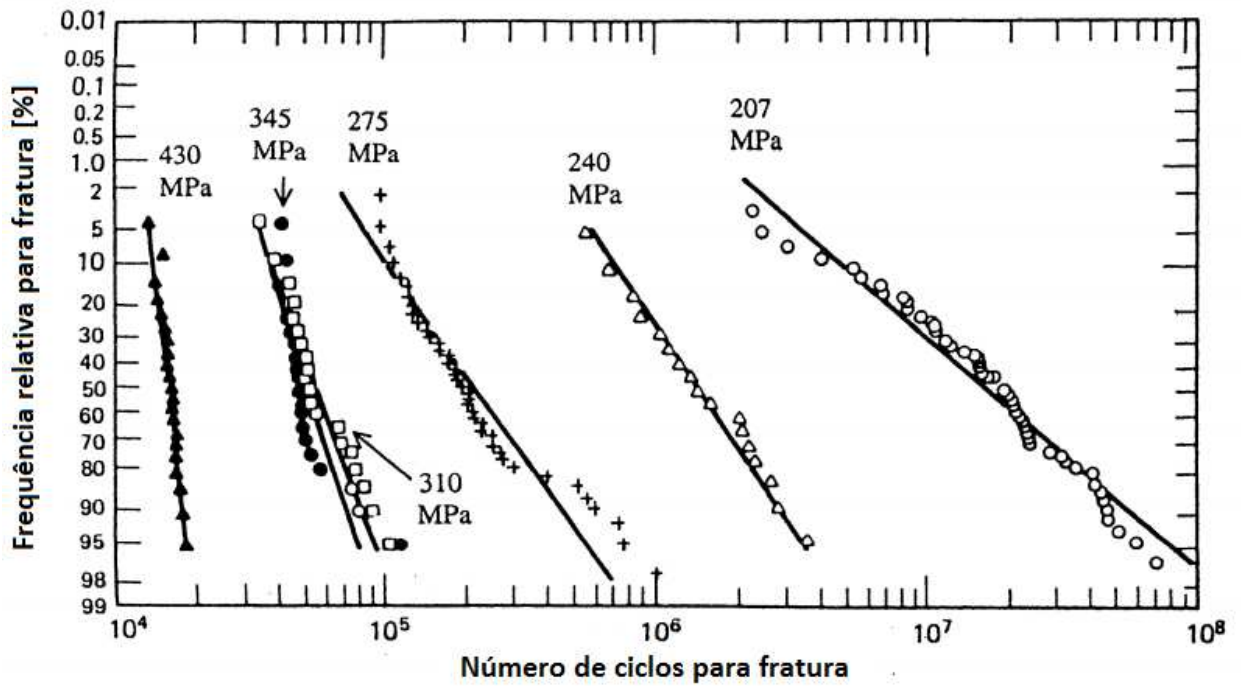


Figura 2.4: Gráfico de probabilidade log-normal com diferentes níveis de tensão para uma liga de alumínio 7075-T6. (adaptado de STEPHENS et al 2001)

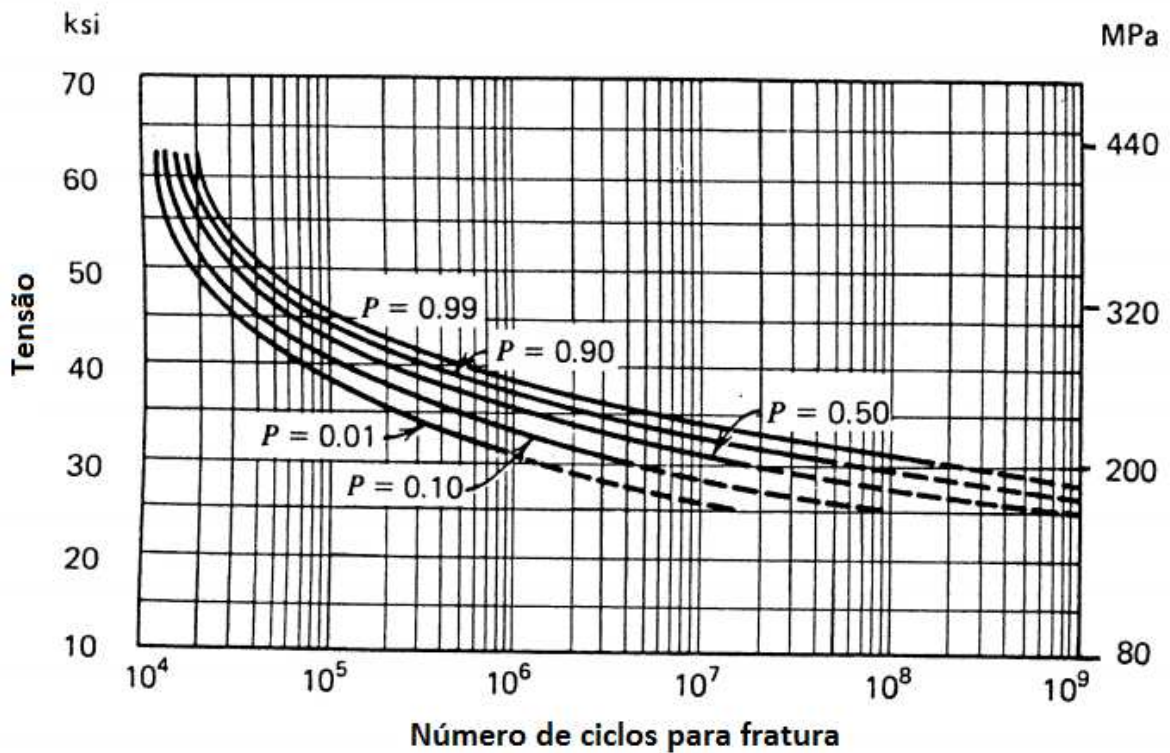


Figura 2.5: Curvas S-N probabilísticas para a liga de alumínio 7075-T6. (adaptado de STEPHENS et al 2001)

## 2.2 *Incerteza de Medição*

A incerteza de medição é um parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão de um valor quantitativo atribuído a um mensurando (grandeza submetida a medição) baseado nas informações usadas. (JCGM 2008b)

O cálculo da incerteza de medição faz uso de cálculos estatísticos mas é diferente de uma simples análise estatística baseada em média e desvio padrão. Pois esta além de envolver vários passos de análise também leva em consideração outras fontes de erro. Vejamos um exemplo: se realizarmos diversos ensaios de tração para a determinação da tensão de ruptura de um certo material, podemos analisar os resultados estatisticamente a partir da média e do desvio padrão dos valores obtidos. Assim estaríamos analisando a partir do desvio padrão a dispersão dos resultados. Já no cálculo da incerteza de medição além dessa dispersão nos resultados podemos ainda levar em conta a incerteza da carga aplicada e também das medidas utilizadas para calcular a área dos corpos de prova, valores esses que podem ser obtidos, por exemplo, dos certificados de calibração dos equipamentos utilizados.

Passos para determinação da incerteza de medição:

1. Definir o mensurando e seu modelo;
2. Identificar as fontes de incerteza;
3. Quantificar as fontes de incerteza;
4. Calcular os coeficientes de sensibilidade;
5. Calcular as componentes de incerteza;
6. Calcular a incerteza combinada;
7. Calcular o número de graus de liberdade efetivos;
8. Calcular o coeficiente de abrangência;
9. Calcular a incerteza expandida.



Em geral o mensurando não é medido diretamente mas sim determinado em função de outras grandezas. Sendo o mensurando  $Z$  determinado a partir das grandezas  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$ , através da Eq. 2.8, a incerteza de medição de combinada de  $Z$  pode ser determinada a partir da Eq. 2.9. No caso das grandezas  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$ , serem independentes a Eq. 2.9 pode ser simplificada na Eq. 2.10. (JCGM 2008a)

$$Z = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_L) \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$u_{c_z}^2 = \sum_{i=1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=i+1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot u_{x_i} \cdot u_{x_j} \cdot r(x_i, x_j) \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$u_{c_z}^2 = \sum_{i=1}^L \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad \text{Eq. 2.10}$$

As derivadas parciais presentes na expressão são denominadas coeficientes de sensibilidade ( $c_{xi}$ ). E o produto do coeficiente de sensibilidade de uma grandeza e sua incerteza é denominado componente de incerteza. A partir da análise dos componentes de incerteza pode-se verificar quais grandezas que mais contribuem para a incerteza na medição do mensurando  $Z$  e, se necessário, tentar reduzir sua influência.

O cálculo do número de graus de liberdade efetivos ( $v_{\text{eff}}$ ) pode ser feito através da Eq. 2.11. Com o valor de  $v_{\text{eff}}$  e com o nível de confiança (geralmente 95%) é determinado o coeficiente de abrangência com o uso de tabelas da distribuição *t-Student*. E, finalmente, a incerteza expandida é obtida conforme Eq. 2.12.

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_Z^4}{\sum \frac{u_{x_i}^4}{v_{x_i}}} \quad \text{Eq. 2.11}$$

$$U_Z = k \cdot u_{c_z} \quad \text{Eq. 2.12}$$

A Figura 2.6 apresenta um diagrama que resume o método para estimativa de incerteza de medição.

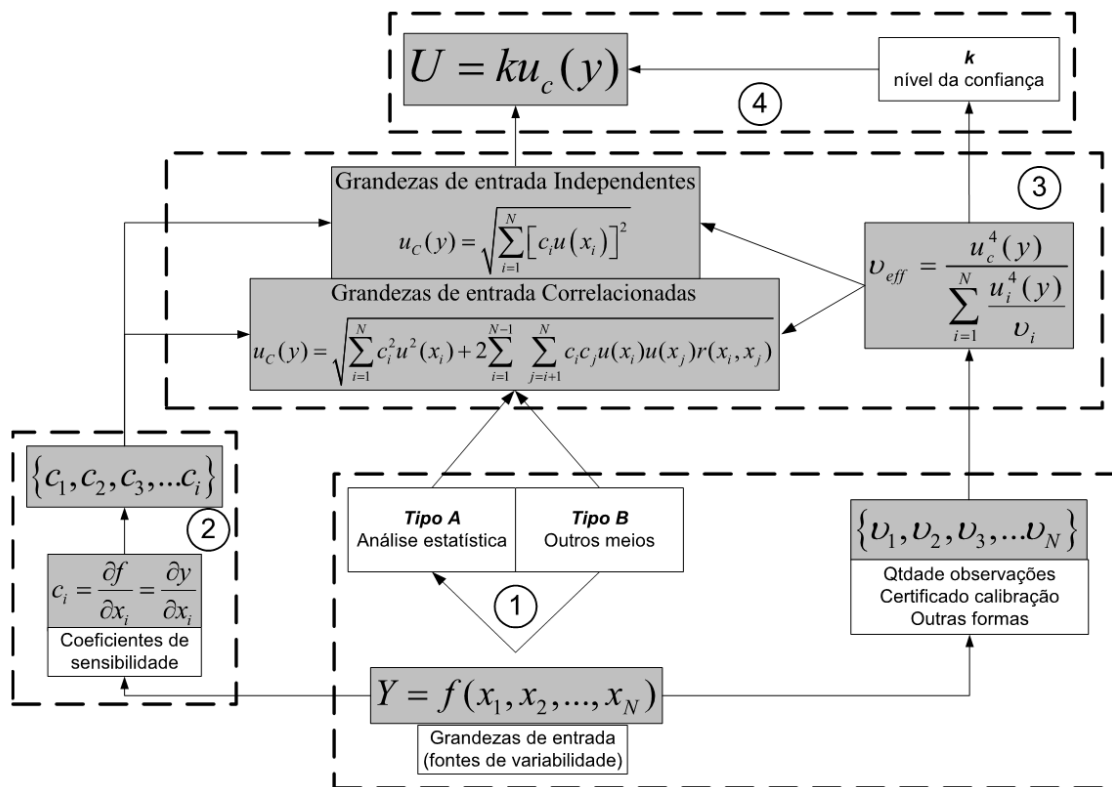


Figura 2.6: Diagrama do método de estimativa de incerteza. (PIZZOLATO 2006)

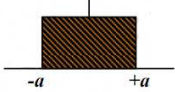
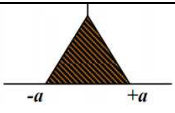
### 2.2.1 Tipo de fonte de incerteza

As fontes de incerteza podem ser divididas em dois tipos: A e B (JCGM 2008a). Incertezas do tipo A são provenientes de observações repetidas, nesse caso o valor da incerteza ( $u$ ) pode ser estimado como o desvio padrão ( $s$ ) dividido pela raiz do número de observações realizadas.

Incertezas do tipo B são aquelas avaliadas pelo julgamento, conhecimento prévio dos equipamentos, certificados, manuais, etc. Os casos mais comuns deste tipo de incerteza são listados na Tabela 2.2, sendo “a” um valor estimado/parâmetro das distribuições. A distribuição uniforme geralmente é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo de erro de uma medida e não se tem informação alguma sobre sua distribuição. A distribuição triangular é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo e também é conhecido o valor mais provável.

Algumas vezes a mesma fonte de incerteza pode ser considerada do tipo A ou B dependendo da forma pela qual ela é estimada.

**Tabela 2.2: Incertezas tipo B.**

	Valor de incerteza	Gráfico da distribuição
Distribuição Uniforme	$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$	
Distribuição Triangular	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$	
Certificado	$u = \frac{U}{k}$	

### 2.2.2 Importância da Incerteza de Medição

Sendo o resultado de uma medição apenas uma estimativa do valor verdadeiro, a incerteza é necessária para expressar o grau de dúvida associado a este resultado (ABNT/INMETRO 2003). Assim é fácil notar que a incerteza é um dos instrumentos que fornece confiança às medições. Os outros instrumentos que fornecem confiança nas medidas são listados abaixo (PIZZOLATO 2006):

- Sistema Internacional de Unidades (SI)
- Rastreabilidade
- Materiais de referência
- Acordos de reconhecimento mútuo
- Ensaio de proficiência
- Acreditação

A incerteza também é fundamental em situações como interpretação de resultados de medições e para verificação de conformidade tanto na área de ensaios quanto na de calibração (EA 2003, NPL 2001). A Figura 2.7 apresenta, esquematicamente, a avaliação da conformidade de uma medida quando são especificados limites de tolerância máximo e mínimo.

A incerteza também pode ser um diferencial competitivo, pois o cliente tende a buscar o laboratório com melhor qualidade em suas medidas e, portanto, a menor incerteza. Adicionalmente, a incerteza é uma ferramenta valiosa para o laboratório, pois permite a identificação dos fatores que mais influenciam no resultado da medição. Desta forma é possível implementar formas de controle adequadas para a garantia da qualidade e da melhoria contínua. (JORNADA 2009)

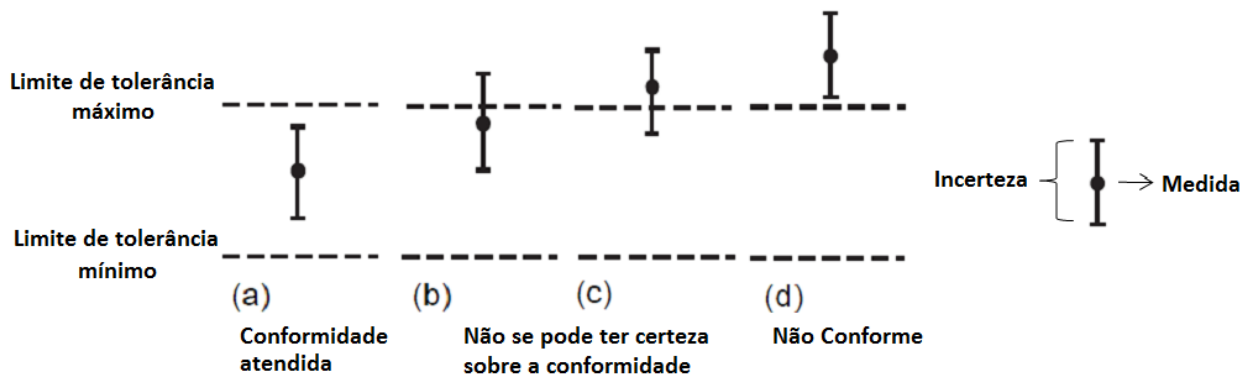


Figura 2.7: Avaliação da conformidade de uma medida.

### **3 Estimativa da Incerteza de Medição em Ensaios de Fadiga**

Ensaios de fadiga podem ser realizados com diversos objetivos. Analisaremos aqui algumas dessas possibilidades e a possível metodologia para estimativa da incerteza de medição, em especial o levantamento de curvas S-N.

#### **3.1 Ensaios de certificação de produtos**

Existem normas para alguns tipos de produtos (peças e ou componentes) metálicos que especificam uma vida mínima em fadiga para o componente para uma certa condição de carregamento. Neste tipo de ensaio são aplicadas as solicitações descritas na norma e é verificado se o componente resiste sem avarias o número de ciclos especificado. Estes ensaios são do tipo passa ou não passa, sendo que o resultado do ensaio propriamente dito não é quantitativo.

Dois exemplos deste tipo de ensaio são descritos nas normas abaixo:

- NBR ISO 3853 Veículos rodoviário – Dispositivo de acoplamento mecânico de veículo de tração para reboques-moradias – (*trailers*) e reboques leves – Ensaio de resistência mecânica.
- ISO 7206-4 – *Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses – Part 4: Determination of endurance properties of stemmed femoral components.*

Apesar do resultado em si não ser quantitativo e não podendo-se ter assim uma estimativa da incerteza, a solicitação aplicada possui uma incerteza, e seria uma boa prática reportar seu valor no relatório de ensaio para fins de comparação com outros ensaios.

#### **3.2 Ensaios para determinação do Limite de Fadiga**

Ensaios de fadiga podem ser realizados com o fim específico de se determinar o limite de fadiga do material. Esta determinação pode ser realizada pelo método escada (GARCIA et. al. 2000, ASTM STP 91-A) sendo que o cálculo da incerteza obtida por esse método pode ser realizado seguindo o Uncert CoP 01 (SM&T 2000). Esse não é um tipo de

ensaio corriqueiro por ter um tempo de execução muito elevado, tornando-se assim um ensaio de alto custo.

### **3.3 Levantamento da Curva S-N**

As curvas S-N já foram discutidas nas seções anteriores. Nesta seção serão desenvolvidos os passos para o cálculo da incerteza de medição. Por se tratarem de duas variáveis em estudo por termos vários níveis de tensão aplicada alguns passos devem ser calculados várias vezes. A incerteza da tensão aplicada deve ser calculada para cada nível de tensão utilizado nos ensaios. A incerteza do número de ciclos pode ser calculada uma só vez se a dispersão dos resultados pode ser considerada constante para todos níveis de carga, caso contrário, deverá também ser estimada para cada nível de tensão utilizado.

#### **3.3.1 Definição do mensurando e do seu modelo**

O resultado que desejamos é uma curva/equação que correlaciona as duas grandezas estudadas (solicitação e número de ciclos para fratura). Será tomada como base o caso mais comum da Eq. 2.2, mas como visto em alguns casos a Eq. 2.7 pode ser mais adequada.

#### **3.3.2 Identificação das fontes de incerteza;**

Fontes de incerteza do número de ciclos:

- Dispersão/repetibilidade dos resultados;
- Rugosidade do corpo de prova;
- Critério de falha.
- Fatores ambientais (umidade e temperatura)

A dispersão dos resultados pode ser atribuída a fatores internos (microvariações da composição química e estrutura) naturais e inerentes ao processo de fabricação dos materiais.

A rugosidade do corpo de prova influencia o processo de nucleação de trincas de fadiga alterando o número de ciclos para falha. Como existe uma certa variação na rugosidade dos corpos de prova temos uma incerteza associada a esse parâmetro.

O critério de falha para ensaios de fadiga pode ser a ruptura do corpo de prova (mais comum), que praticamente não incorpora incerteza ao resultado, ou o surgimento de trincas na amostra. No segundo caso o corpo de prova deveria ser inspecionado a cada quantidade de ciclos pré-definida, verificando-se há existência de trincas, procedimento este que leva a uma incerteza quanto ao número de ciclos.

Fatores ambientais como temperatura e umidade e também a frequência do ensaio são considerados como tendo influência desprezível para a maioria dos materiais metálicos quando ensaiados à temperatura ambiente. A frequência pode influenciar nos resultados somente caso essa seja muito elevada, acima de 200Hz (FROST et. al. 1974), e cause o aquecimento excessivo da amostra, ou ainda se o ensaio ocorrer em ambiente agressivo (BRANCO, 1985).

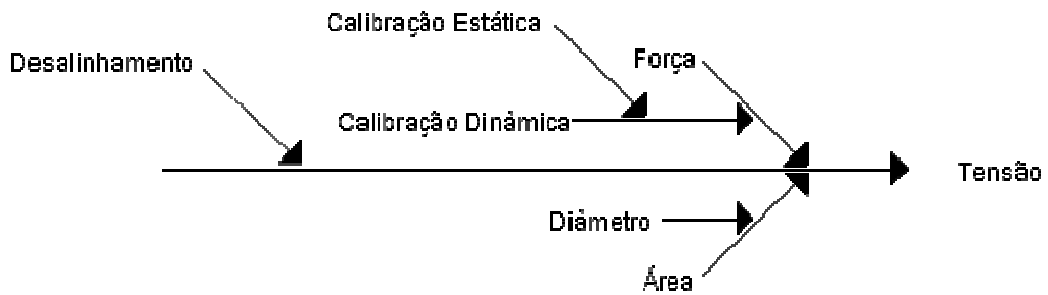
Fontes de incerteza na tensão aplicada:

- Medição de carga dinâmica;
- Desalinhamento;
- Medida das dimensões do corpo de prova.

A incerteza na medição de cargas dinâmicas pode ser avaliada com ajuda de normas de calibração com esse fim, como por exemplo, a ASTM E467. Deve-se notar ainda que este valor é diferente do obtido por calibrações estáticas e é afetado por um maior número de fatores que a calibração estática. Esse valor pode variar em função de diversos fatores como: rigidez do sistema (máquina de ensaios, corpo de prova e sistema de fixação), frequência de ensaio, amplitude da carga, inércia e vibrações do sistema. Apesar da calibração dinâmica ser diferente da calibração estática, do modo como ela é sugerida que seja feita pelas normas, ela acaba herdando a incerteza da calibração estática, como será visto no procedimento para calibração dinâmica.

O desalinhamento também pode ser avaliado com procedimentos documentados em norma, como por exemplo, a ASTM E1012. O desalinhamento pode ser proveniente da própria máquina de ensaios, da geometria do corpo de prova e do sistema de fixação do corpo de prova utilizado, sendo que em geral o desalinhamento diminui com o aumento da carga aplicada no caso de solicitações tratativas.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza para a tensão aplicada nos ensaios de fadiga, e a Figura 3.2 apresenta um diagrama do mesmo tipo para o número de ciclos.



**Figura 3.1: Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza para a tensão em ensaios de fadiga.**



**Figura 3.2: Diagrama de causa e efeito mostrando as possíveis fontes de incerteza para o número de ciclos para fratura em um ensaio de fadiga.**

### 3.3.3 Quantificação das fontes de incerteza

A Tabela 3.1 apresenta um quadro contendo o tipo e as possibilidades de como se estimar a incerteza de cada fonte levantada no passo anterior.



**Tabela 3.1: Tipo e estimativa do valor para as fontes de incerteza levantadas.**

Fonte de incerteza	Tipo	Estimativa do Valor
Dispersão/ repetibilidade dos resultados (do número de ciclos)	A	Pode ser estimada através do desvio padrão do logaritmo do número de ciclos dividido pela raiz do número da amostras. (se este tem distribuição log-normal)
Medição de carga dinâmica;	A/B	Tipo B: se a estimativa de seu valor vier de um certificado de calibração dinâmica.  Tipo A: pode ser estimado através do desvio padrão das observações dos valores de carga mínima/máxima realizadas durante o procedimento de calibração dividido pela raiz do número da observações.
Desalinhamento;	B	Pode ser considerado como tendo distribuição uniforme sendo que o valor de “a” pode ser estimado pela Lei de Hooke*.
Medida das dimensões do corpo de prova	A/B	Tipo B: se a estimativa provir de um certificado de calibração do instrumento de medição utilizado.  Tipo A: se forem realizadas diversas medidas de cada dimensão.
Rugosidade do corpo de prova	A/B	Tipo B: se a estimativa provir do certificado de calibração do instrumento utilizado para medição.  Tipo A: se forem realizadas diversas medidas.
Critério de falha	B	Caso o critério de falha seja a ruptura total da amostra seu valor é desprezível.  Se outro critério for adotado pode-se assumir uma distribuição uniforme com valor de “a” igual ao número de ciclos entre as inspeções.
Fatores ambientais (umidade e temperatura)	A/B	Tipo A: se forem feitos uma série de registros ao longo do ensaio.  Tipo B: se o valor for obtido do certificado de calibração dos instrumentos.**

\*Seguindo-se o procedimento da norma ASTM E1012 essa estimativa é igual ao valor calculado como “B” na referida norma multiplicado pelo módulo de elasticidade do material.

\*\*Também pode ser considerado do tipo B, caso sejam registrado somente os valores mínimo e máximo durante o ensaios, função essa que termo-higrômetros digitais mais simples tem. Lembrando que alguns ensaios dependendo das condições podem demorar mais de um dia e assim estarem sujeitos a grandes variações de temperatura e umidade nesse período.

### 3.3.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Das fontes relacionadas ao número de ciclos:

Para a dispersão/repetibilidade dos resultados do número de ciclos e critério de falha os coeficiente de sensibilidade tem valor igual a unidade, pois os mesmos já são expressos em termos do próprio número de ciclos.

Para a rugosidade do corpo de prova e fatores ambientais esses teriam que ser calculados através de derivadas parciais. Para o cálculo de tais derivadas ser possível seria necessário primeiramente fazer o levantamento de curva de número de ciclos para falha em função destas variáveis para os níveis de tensão em estudo.

Para as fontes relacionadas à tensão:

Da maneira como aqui foi estimada a contribuição do desalinhamento (utilizando a lei de Hooke) o coeficiente de sensibilidade desta fonte é igual a unidade, pois a sua incerteza já estará expressa em termos de tensão.

Para a incerteza dimensional e da carga aplicada o cálculo deve ser feito através de derivadas parciais. Abaixo o cálculo é exemplificado para o caso de serem utilizados corpos de prova de seção transversal circular submetidos a carga axial.

Sendo a tensão:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Então:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d} = -\frac{8P}{\pi d^3} = -\frac{2\sigma}{d} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P} = \frac{4}{\pi d^2} = \frac{\sigma}{P} \quad \text{Eq. 3.3}$$

### 3.3.5 Cálculo dos componentes de incerteza, incerteza combinada e graus de liberdade efetivos

O cálculo dos componentes de incerteza é feito multiplicando-se o valor de incerteza estimado pelo seu coeficiente de sensibilidade. Este valor calculado para cada

uma das fontes de incerteza permite sua comparação e identificação das fontes mais importantes.

O cálculo da incerteza combinada é feito através da Eq. 2.10, isto é, é a raiz da soma dos quadrados dos componentes de incerteza.

O cálculo dos números de graus de liberdade efetivos é feito conforme a Eq. 2.11, sendo que para as incertezas do tipo B os graus de liberdade são considerados infinitos.

### **3.3.6 Cálculo do coeficiente de abrangência**

Tendo-se o valor do número de graus de liberdade efetivos e estipulando-se um nível de confiança (geralmente 95%) podemos com o auxílio de tabelas de t-Student determinar o valor de k.

Para o caso do número de ciclos, podemos calcular um só valor de k para todos os níveis de carga. Para isso tomamos os graus de liberdade como o número de amostras ensaiadas menos dois, do mesmo modo que se faria para o cálculo das bandas de confiança. Essa metodologia será adotada pois se calcularmos o valor de k individualmente para cada nível de tensão seu valor será muito grande, devido ao baixo número de amostras em cada nível de tensão, isso tornaria os resultados excessivamente conservadores.

### **3.3.7 Cálculo da Incerteza Expandida**

Multiplicando-se o valor da incerteza combinada pelo valor do coeficiente de abrangência obtemos a incerteza expandida, Eq. 2.12, para cada uma de nossas variáveis de interesse.

Porém sendo o resultado dos ensaios uma curva/equação que correlaciona a solicitação/tensão ao número de ciclos para a falha, somente a incerteza expandida de cada uma das variáveis ainda não nos dá a incerteza do resultado como um todo.

O que pode ser feito é com esses valores de incerteza de cada uma das grandezas, gerar novas bandas similares às vistas na seção 2.1.2, que representariam a incerteza na curva/equação obtida. Essas curvas serão aqui denominadas bandas de incerteza.

Para o cálculo das bandas de incerteza foi adotado o procedimento descrito a seguir, que é similar ao procedimento utilizado em Uncert CoP 05 (SM&T 2000) para ensaios de taxa de propagação de trincas.

Para cada ponto  $[S_i; \log(N_i)]$  resultante dos ensaios gerar outros dois pontos  $[S_i - U_{S_i}; \log(N_i) - U_{\log(N_i)}]$  e  $[S_i + U_{S_i}; \log(N_i) + U_{\log(N_i)}]$ , isto é, gerar novos pontos que correspondem ao valor do ponto original mais e menos a sua incerteza expandida.

Ajustar duas novas curvas também com o formato da Eq. 2.2, uma para os pontos  $[S_i - U_{S_i}; \log(N_i) - U_{\log(N_i)}]$  que correspondera a banda de incerteza inferior e outra para os pontos  $[S_i + U_{S_i}; \log(N_i) + U_{\log(N_i)}]$  que corresponde a banda de incerteza superior. A Figura 3.3 apresenta um grafico ilustrativo mostrando a construção das bandas de incerteza.

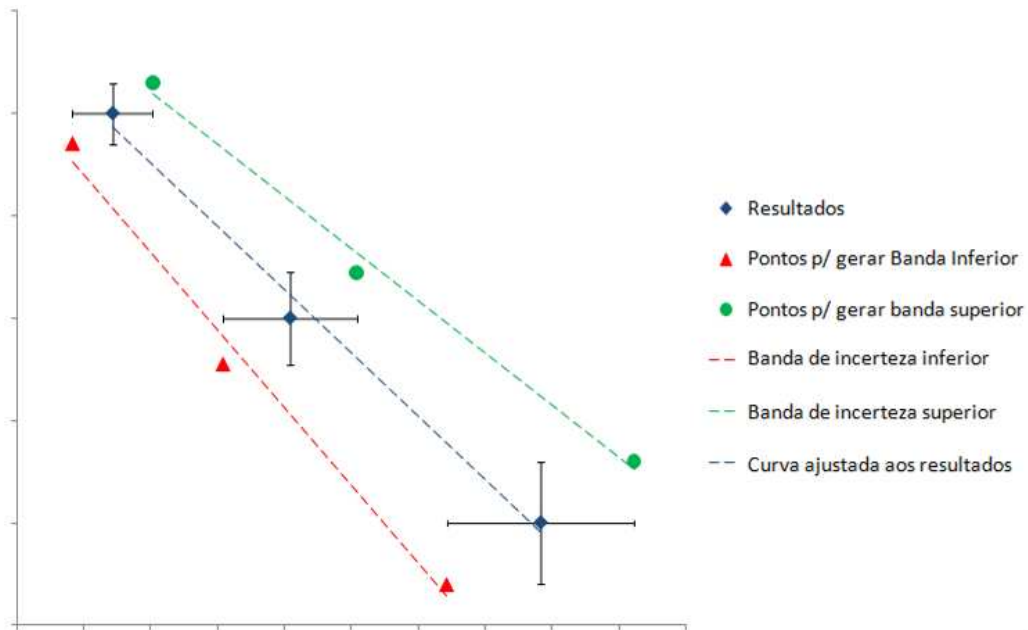


Figura 3.3: Gráfico ilustrativo mostrando a construção das bandas de incerteza.

### 3.4 Incerteza da carga/força aplicada nos ensaios de fadiga

A norma ASTM E467, descreve procedimentos e requisitos para a realização da calibração dinâmica de máquinas de ensaios. Outra norma que também trata deste assunto é a BS 7935, sendo o procedimento para a calibração das duas normas praticamente o mesmo. Abaixo segue um resumo do procedimento para calibração:

1. Exercitar o sistema indo até 5% acima da carga máxima sendo verificada, retornando a carga até zero e tarando a indicação dos *strain gauges* instalados no corpo de prova.
2. Aplicar lentamente as cargas pontuais indicadas abaixo, tomando nota dos valores indicados pelos *strain gauges* em cada carga.

- a. Carga máxima menos 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
- b. Carga máxima.
- c. Carga máxima mais 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
- d. Carga mínima mais 5% da amplitude de carga sendo calibrada.
- e. Carga mínima.
- f. Carga mínima menos 5% da amplitude de carga sendo calibrada.

Este passo serve para verificar a faixa de carga utilizada levando em conta a histerese na carga mínima e para compensar máquinas com comando pobre. Neste ponto a calibração dinâmica herda as incertezas da calibração estática da célula de carga, já que estamos correlacionando os valores medidos pelos *strain gauges* e pela célula de carga.

3. Iniciar o comando cíclico na máquina de ensaios e aguardar que os valores de máximos e mínimos de carga sejam atingidos e fiquem estáveis.
4. Adquirir pelo menos cinquenta pontos de carga máxima e mínima simultaneamente na máquina de ensaios e nos *strain gauges*.
5. Para cada ciclo verificar o erro existente entre o valor da carga medido pela máquina de ensaios, já aplicados fatores de correção, e o valor da medida feita pelos *strain gauges*.

A norma recomenda que o valor do erro calculado no passo 5 não pode ultrapassar 1%, para nenhum dos ciclos.

No passo 5 fala-se em valores de carga corrigidos. Isso se deve à inércia do sistema e sua aceleração e desaceleração durante os ciclos de fadiga. O valor de carga medido pela célula de carga e o efetivamente aplicado ao corpo de prova são diferentes. Sendo assim deve-se corrigir o valor medido pela máquina, e esse valor corrigido deve ser usado para calcular a tensão.

Utilizando esse procedimento podemos estimar o valor da incerteza da carga aplicada estimado pelo desvio padrão dos valores obtidos pela amostra instrumentada e pela incerteza da calibração estática, devido ao exposto no passo 2.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Material e Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios e levantamento de dados práticos para aplicação dos cálculos foram utilizados corpos de prova com a geometria apresentada na Figura 4.1, usinados em aço inoxidável AISI 316L, e dureza de 155HV. A Tabela 4.1 mostra a composição química do material e as Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam a microestrutura do mesmo. Em ambas figuras podem ser vistos grãos poligonais de austenita com maclas de recozimento e presença de ferrita delta, sendo a ferrita delta alinhada com a direção de laminação como pode ser visto na seção longitudinal.

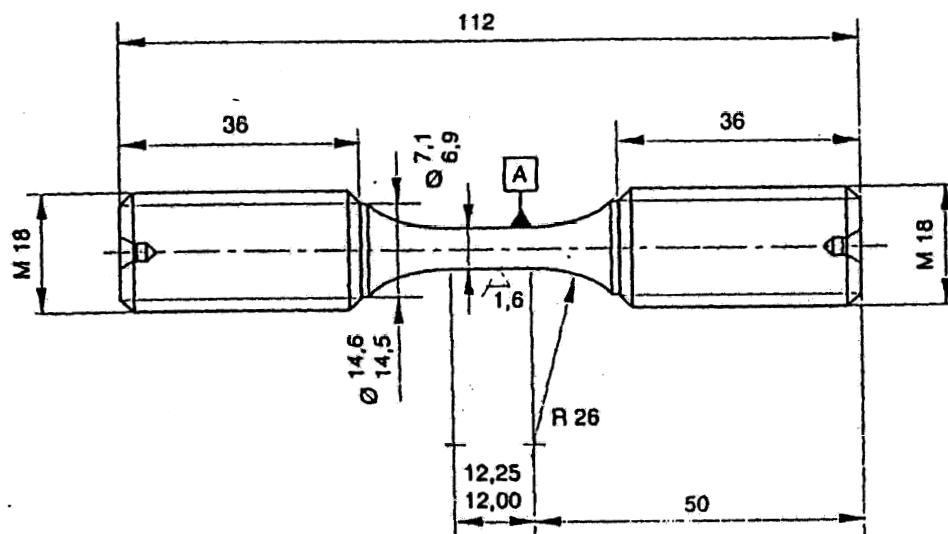


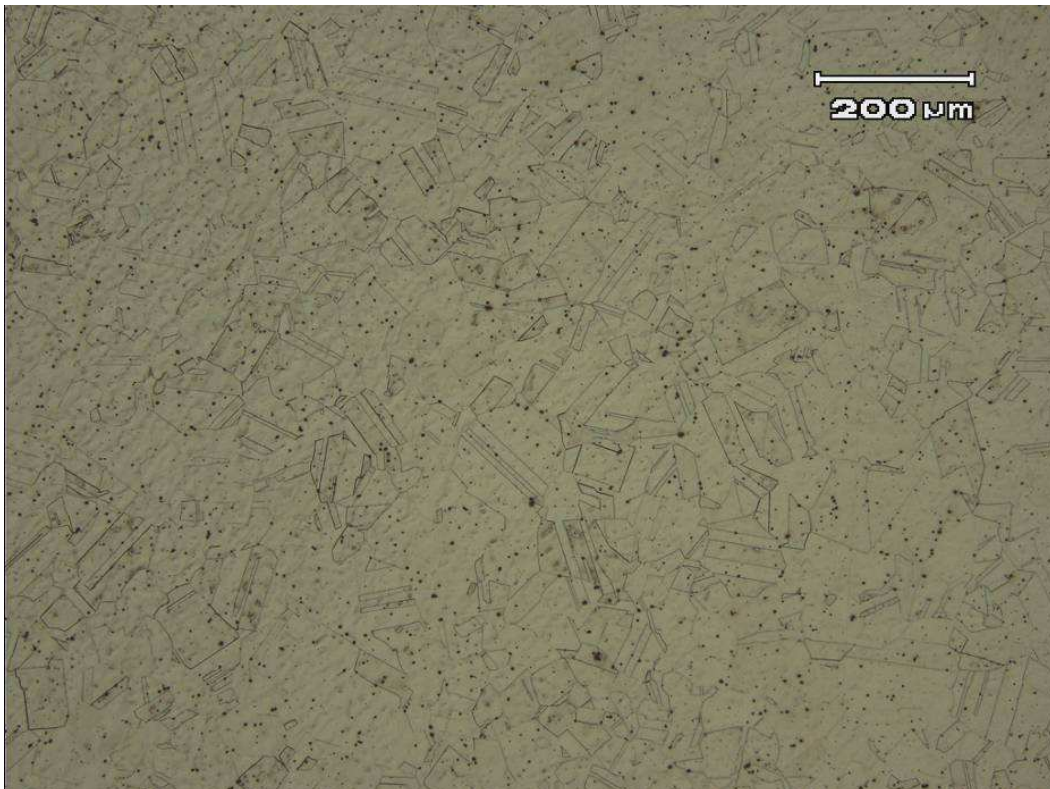
Figura 4.1: Geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados.

Tabela 4.1: Composição química do material ensaiado.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
% em massa	0,027	1,92	0,289	0,031	0,015	16,98	11,30	2,30	67,14



**Figura 4.2: Metalografia da seção longitudinal.**



**Figura 4.3: Metalografia da seção transversal.**



Após a usinagem, os corpos de prova foram lixados com lixas de granulometria cada vez menor, até a granulometria 600, sempre em direção perpendicular à direção anterior (longitudinal e circunferencial) até os riscos da lixa anterior terem desaparecido. Sendo sempre a última etapa de lixamento aplicada na direção longitudinal, que é perpendicular ao sentido de usinagem dos corpos de prova, conforme especificado na norma ASTM E466.

#### 4.2 Calibração Dinâmica e Avaliação do desalinhamento

Antes da realização dos ensaios, foram realizadas calibrações de carga dinâmica utilizando os corpos de prova (igual ao utilizados nos ensaios) instrumentados com *strain gauges* conforme recomendação da norma ASTM E467, sendo adquiridos cinquenta picos e vales após a estabilização da carga para realização das análises. A Figura 4.4 apresenta um dos corpos de prova instrumentados utilizados para as calibrações e avaliação de desalinhamento.



Figura 4.4: Corpo de prova instrumentado com *strain gauges*.

As calibrações foram repetidas variando a frequência e amplitude de carga utilizadas (sempre mantendo a razão de fadiga de 0,1). Foram utilizadas frequências de 10, 20 e 30Hz e cargas máximas de 10, 13, 16, 19kN.

O corpo de prova instrumentados com *strain gauges* também foi utilizado para avaliação do desalinhamento conforme a Norma ASTM E1012.

A aquisição de dados dos *strain gauges* foi realizada utilizando-se equipamento *Spider 8* em conjunto com o software *CatMan 4.0*. Tal aparelho e *software* foram avaliados conforme a Norma ASTM E1942, estando dentro dos parâmetros recomendados pela norma citada.



### 4.3 Máquina de Ensaio e Dispositivos de Fixação

Os ensaios foram realizados em máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 858 com capacidade de carga de 25kN. A Figura 4.5 apresenta os dispositivos de fixação utilizados para a realização das calibrações e ensaios já com o corpo de prova montado.

Os ensaios para levantamento da curva S-N foram realizados com frequência de 20Hz utilizando razão de fadiga (R) de 0,1. Foi adotado um número máximo de ciclos (*runout*) de dois milhões. Os *softwares* e aparelhos da máquina de ensaios utilizada foram avaliados conforme a Norma ASTM E1942, estando dentro dos parâmetros recomendados pela norma citada. O critério de falha adotado foi a fratura total do corpo de prova (separação em duas partes).



Figura 4.5: Máquina de ensaio utilizada e detalhe da fixação do corpo de prova.

#### **4.4 Cálculos Estatísticos e da Incerteza de Medição**

Com os dados dos ensaios realizados foi ajustada uma curva no formato da Eq. 2.2, sendo feitos cálculos das bandas de confiança de acordo com as Eq. 2.5 e Eq. 2.4, e também foram determinadas bandas de incerteza conforme descrito na seção 3.3.7. Os resultados foram graficados e comparados.

O cálculo da incerteza da tensão aplicada levou em consideração as incertezas provenientes da medida do diâmetro do corpo de prova, da carga aplicada e do desalinhamento. A incerteza devido ao desalinhamento foi avaliada pela deformação de dobramento (calculada de acordo com a Norma ASTM 1012) multiplicada pelo modo de elasticidade do material (Lei de Hooke).

Para se avaliar a contribuição da incerteza da tensão nas bandas de incerteza o procedimento para cálculo foi repetido considerando a incerteza da tensão nula. Assim foi analisada a diferença no número de ciclos obtidos para cada nível de tensão utilizado para as bandas de incerteza com e sem a consideração da incerteza na tensão.

Para o cálculo da incerteza do número de ciclos foi considerada somente a dispersão dos resultados, pois não foram realizados ensaios para que se pudesse levar em consideração outros fatores.

Todos os cálculos foram desenvolvidos em planilhas eletrônicas utilizando-se *software* Microsoft Excel 2007<sup>®</sup>. Para o cálculo do coeficiente de abrangência (k) foi utilizada a função `INVT(probabilidade; graus_de_liberdade)`, onde o valor de probabilidade usado foi igual 0,05 o que corresponde a um nível de confiança de 95%.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Avaliação do desalinhamento

A Figura 5.1 apresenta o percentual de dobramento (indicativo do desalinhamento) em função da carga aplicada ao corpo de prova, obtida para a combinação da máquina de ensaios, dispositivo de fixação e corpo de prova utilizados. Nota-se que a partir de 4kN de carga, o percentual de dobramento fica abaixo de 5%, valor máximo de dobramento aceitável conforme a norma ASTM E466.

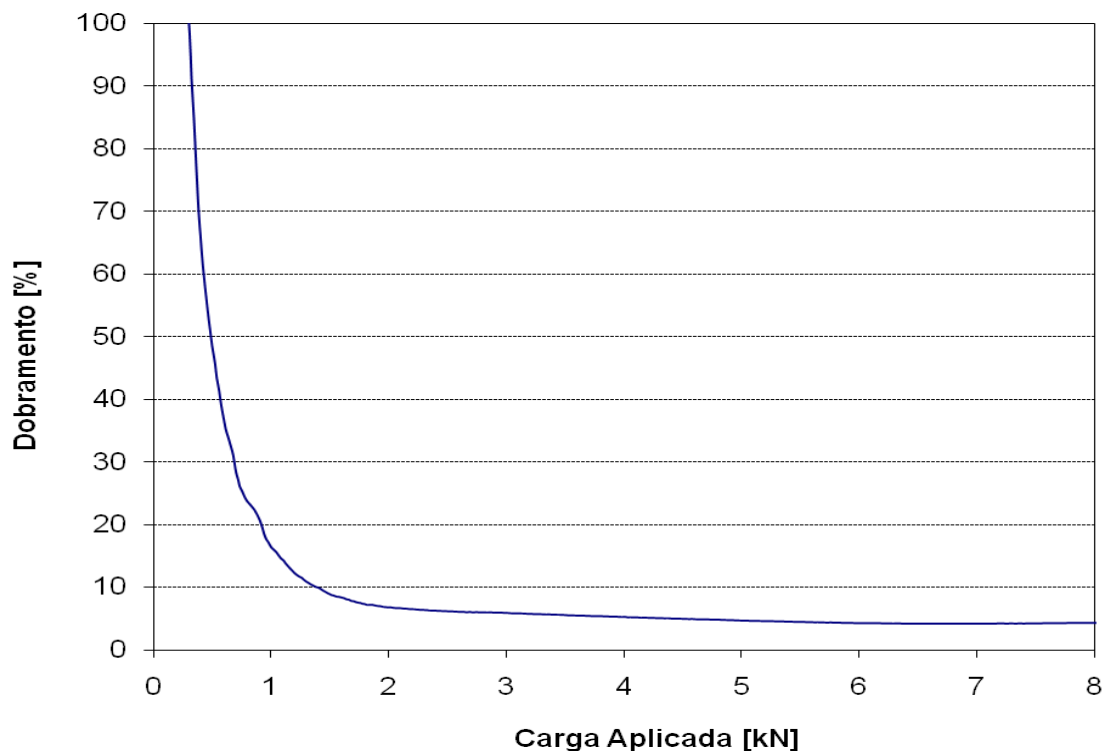


Figura 5.1: Curva de dobramento percentual contra carga aplicada obtida para o sistema de ensaios utilizado.

## 5.2 Calibrações Dinâmicas

As Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam os resultados obtidos das calibrações dinâmicas. São representados os desvios padrão dos valores de carga máxima medidos com os *strain gauges* em função da carga ou da frequência. Os ensaios com cargas máximas de 16 e 19kN a 30Hz não foram incluídos pois a máquina de ensaios não era mais capaz de manter o formato de onda senoidal para esses casos.

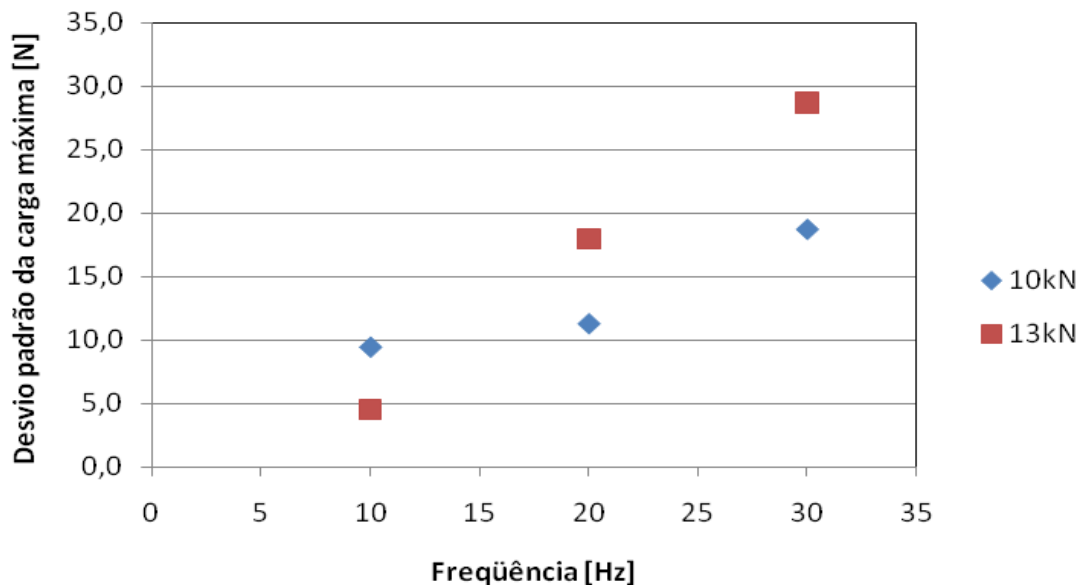


Figura 5.2: Desvio padrão da carga máxima em função da frequência de ensaio.

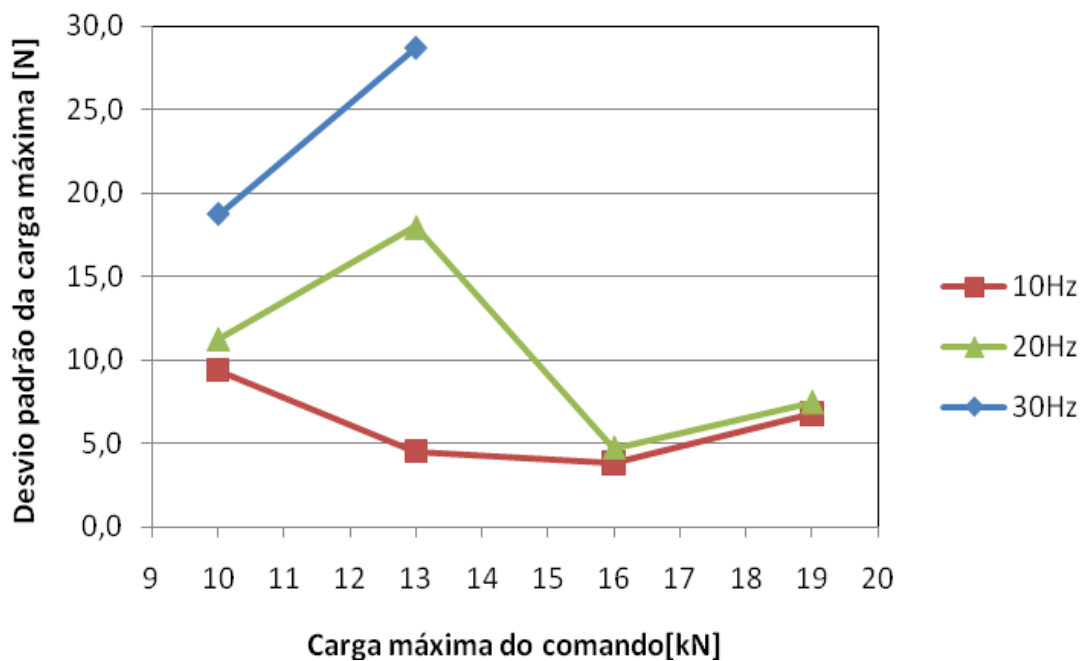
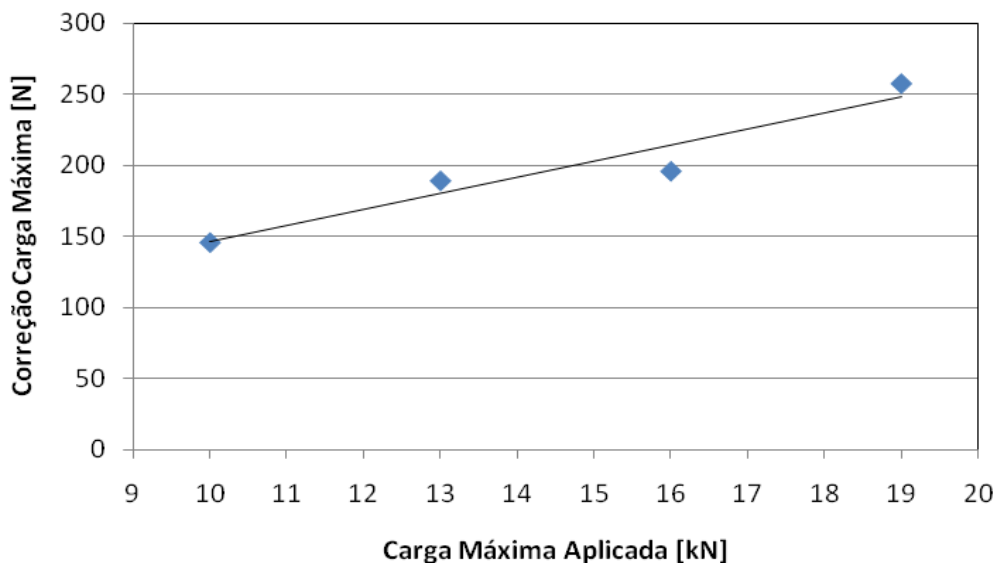


Figura 5.3: Desvio padrão da carga máxima em função da carga aplicada.

Nota-se em ambas as figuras a tendência de aumento no desvio padrão dos valores de carga máxima medidos com o aumento da frequência de ensaio. Porém não se nota nenhuma correlação em relação à carga aplicada. Para as frequências de 10 e 20Hz, o erro dos valores de carga máxima (diferença entre medido pela máquina de ensaios e pela amostra instrumentada), se manteve sempre abaixo de 1%, conforme recomendado pela norma ASTM E467. Porém para a frequência de 30Hz os valores de erros foram superiores a 1%.

A Figura 5.4 apresenta os valores de correção da carga máxima aplicada para a frequência de 20Hz. Observa-se que o valor aumenta com o aumento da carga aplicada. A Figura 5.5 apresenta uma comparação entre o desvio padrão medido dos valores de carga máxima a partir dos dados obtidos pelo sistema da máquina de ensaios e a partir dos dados medidos com a amostra instrumentada. Nota-se que o desvio medido pela máquina de ensaios é menor que o efetivamente presente no corpo de prova. Os dados apresentados nessas duas figuras mostra a importância da calibração dinâmica dos ensaios.



**Figura 5.4: Valores de correção da carga aplicada para frequência de 20Hz.**

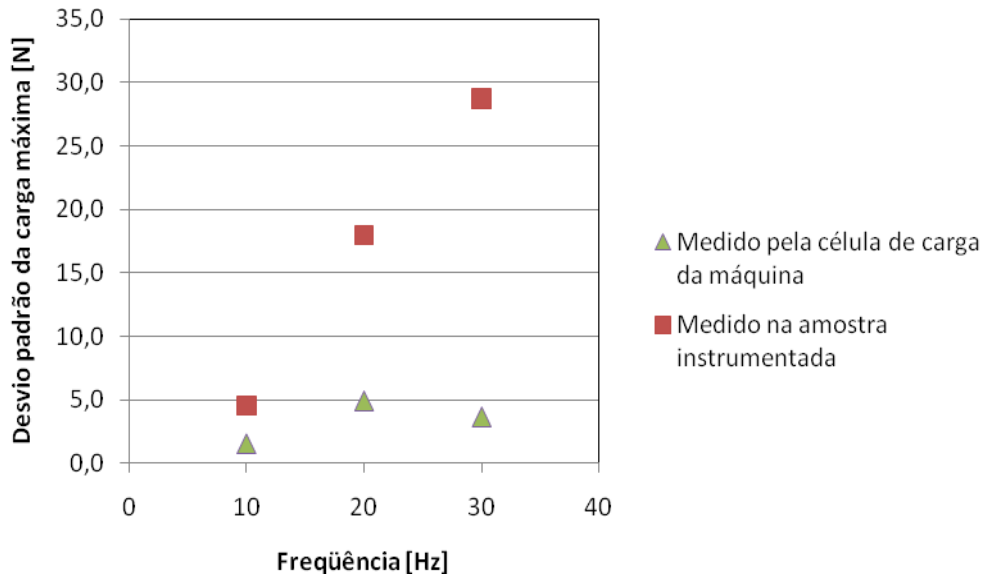


Figura 5.5: Comparação do desvio padrão da carga máxima medido pela máquina de ensaios e pela amostra instrumentada, para carga de 13kN.

### 5.3 Ensaios de fadiga e Curva S-N

A Figura 5.6 apresenta a curva S-N obtida dos ensaios realizados assim como a curva média no formato da Eq. 2.2. O ponto marcado com a seta indica amostra que não rompeu até dois milhões de ciclos (*runout*). A Tabela 5.1 apresenta os valores numéricos dos resultados obtidos.

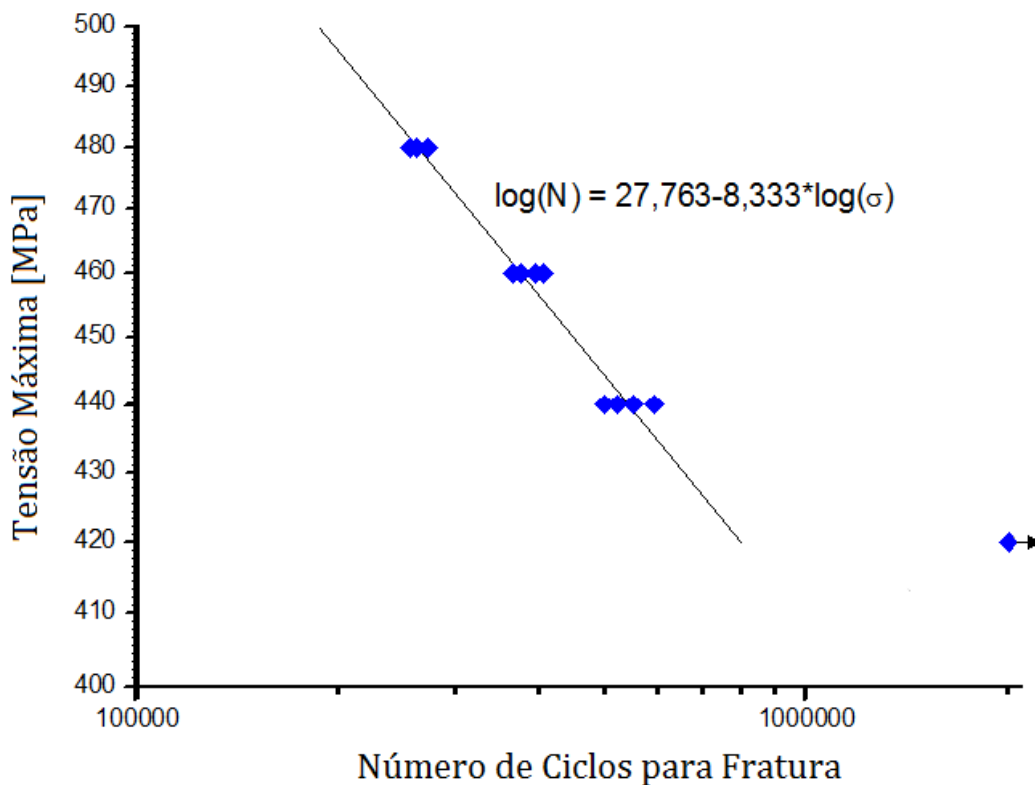


Figura 5.6: Curva S-N resultante dos ensaios.

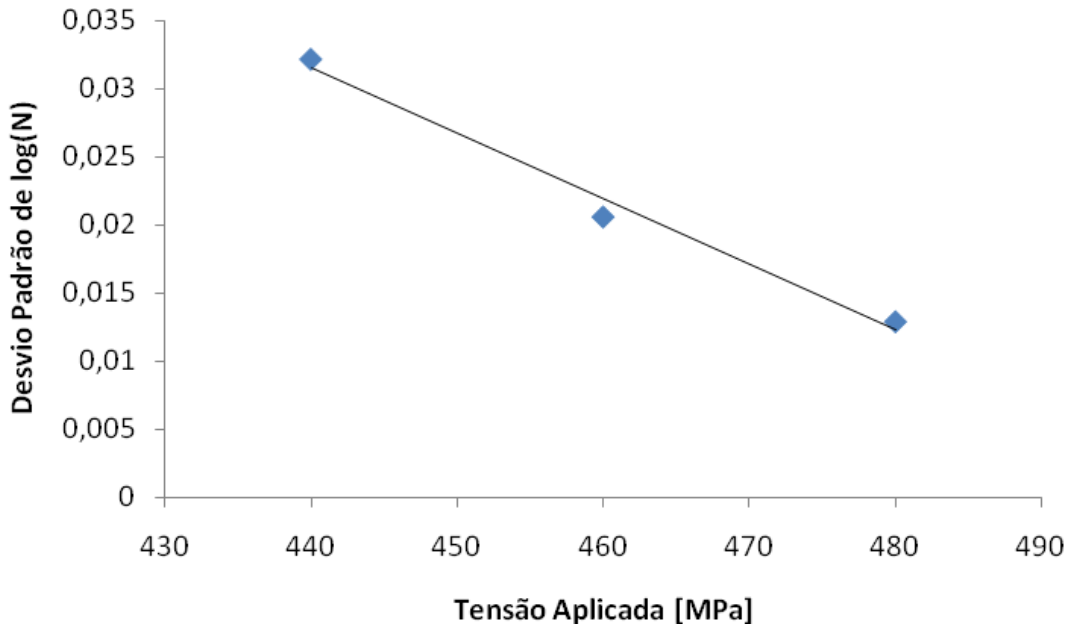
**Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de fadiga.**

Corpo de Prova	Tensão Aplicada [MPa]	Número de ciclos para Fratura
A	480	255091
B	440	549511
C	480	261550
D	420	2000000*
E	480	271656
F	480	255053
G	460	404071
H	460	393352
I	460	363696
J	460	374421
K	440	520495
L	440	497806
M	440	591230

\*Corpo de prova sem fratura (*run out*)

Tendo-se atingido valor de replicação de 75% e sendo o desvio padrão ( $s$ ) calculado pela Eq. 2.6 bastante baixo (igual a 0,0244), podemos considerar os resultados como tendo confiabilidade estatística.

A Figura 5.7 apresenta o desvio padrão para cada nível de tensão individual mostrando que este aumentou com a redução do nível de tensão. Este fato está ligado a própria natureza do ensaio, conforme analisado na seção 2.1.2, e não está ligado a incerteza da tensão aplicada já que esta, como será visto adiante, tem praticamente o mesmo valor para todos os níveis de tensão utilizados.



**Figura 5.7: Variação do desvio padrão de log(N) em função da tensão aplicada.**

#### **5.4 Cálculo das bandas de confiança**

A Figura 5.8 apresenta as bandas de confiança calculadas de acordo com as Eq. 2.4 e Eq. 2.5. O valor do coeficiente de abrangência  $k$  utilizado foi de 2,228 calculado com base da distribuição t-Student com nível de confiança de 95% e graus de liberdade igual a 10 (12 corpos de prova ensaiados menos dois). Nota-se que para esses casos existe pouca diferença entre as duas equações, isso provavelmente se deve ao fato das tensões utilizadas nos ensaios serem relativamente próximas. Pode-se notar que devido ao fato do desvio padrão ser considerado constante ao longo da curva, as bandas acabam sendo mais conservadoras nos níveis de tensão mais elevados e menos conservadores para as tensões menores.

Como apresentado na Figura 5.7 o desvio padrão do log(N) não pode ser considerado constante, como é assumido para o cálculo das bandas pelas Eq. 2.4 e Eq. 2.5. Sendo assim o cálculo destas equações não é uma prática recomendável para este caso, além de não levarem em consideração a incerteza da tensão aplicada nos ensaios.



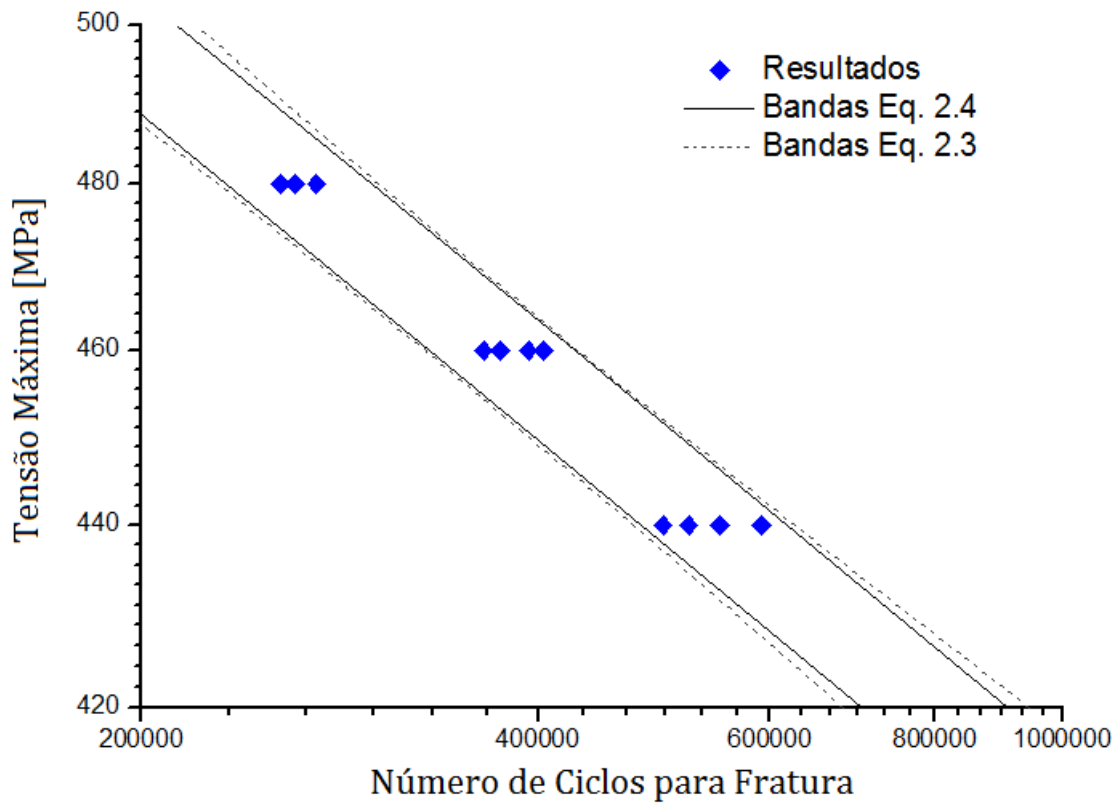


Figura 5.8: Curva S-N com bandas de confiança.

### 5.5 Cálculo de incerteza da tensão aplicada

A Tabela 5.2 apresenta o cálculo da incerteza da carga máxima aplicada, o resultado deste cálculo é usado na Tabela 5.3 que apresenta os cálculos para incerteza da tensão máxima aplicada. Ambas as tabelas apresentam os cálculos para a tensão máxima 480MPa. A Tabela 5.4 apresenta os valores de incerteza para todos níveis de tensão utilizados. Nota-se que os valores são praticamente os mesmos.

**Tabela 5.2: Cálculo de incerteza da carga máxima aplicada, para tensão de 480MPa.**

Fonte Incerteza	Valor Nominal	Incerteza	Tipo	Coef. De Sensibilidade	Componente de Incerteza	Graus de Liberdade
Calibração Estática [N]	18087	$=U/k=0,08\%*18087/2,16=6,70^1$	B	1	6,70	Infinito
Calibração Dinâmica [N]	18087	= desvio padrão = 7,58 <sup>2</sup>	A	1	7,58	=50-1=49
1 dados do certificado de calibração da máquina. 2 obtido dos ensaios de calibração dinâmica.					Incerteza Combinada [N]	10,11
					Graus de liberdade Efetivos	155
					Coef. de Abrangencia	1,975
					Incerteza Expandida [N]	<b>20,0</b>

**Tabela 5.3: Cálculo da incerteza da tensão máxima aplicada para tensão de 480MPa.**

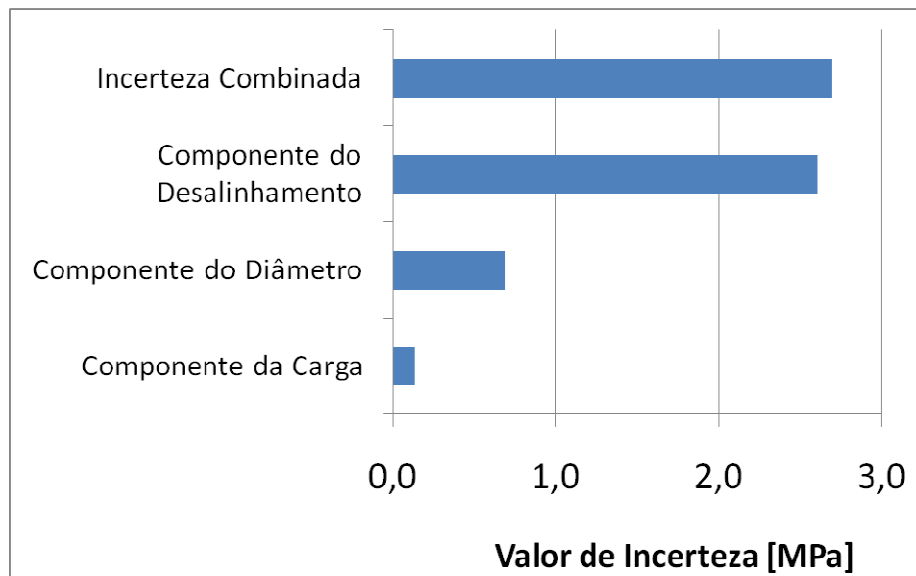
Fonte Incerteza	Valor Nominal	Incerteza	Tipo	Coef. de Sensibilidade	Componentes de incerteza	Graus de Liberdade
Carga [N]	18087	10,11 <sup>1</sup>	B	0,02651	0,1358	155
Diâmetro [mm]	6,93	$=U/k=0,01/2=0,005^2$	B	138,4	0,7990	infinito
Desalinhamento [MPa]	NA	$4,509/3^{1/2}=2,603^3$	B	1	2,6031	infinito
1 dado da tabela anterior 2 dados do certificado de calibração do paquímetro usado. 3 estimado através da Lei de Hooke ( $21,47\mu\text{m}/\text{m} \cdot 210\text{GPa} = 4,509\text{MPa}$ )					Incerteza Combinada [MPa]	2,697
					Graus de liberdade Efetivos	25264685
					Coef. de Abrangência	1,960
					Incerteza Expandida [MPa]	<b>5,29</b>

**Tabela 5.4: Incerteza da tensão máxima aplicada para cada nível de tensão utilizado.**

Tensão máxima [MPa]	Incerteza Combinada [MPa]	Incerteza Expandida [MPa]
480	2,726	5,29
460	2,670	5,27
440	2,681	5,26

A Figura 5.9 apresenta uma comparação entre as fontes de incerteza estudadas. Observa-se, para esse caso, que o desalinhamento é o responsável por praticamente toda a

incerteza combinada. Observa-se também, que a incerteza da carga quase não afetou o valor da incerteza combinada, isso porém não significa que os ensaios de calibração dinâmica possam ser dispensados, já que as máquinas de ensaios devem ser periodicamente submetidas a verificação dos resultados obtidos.



**Figura 5.9: Comparação entre as fontes de incerteza.**

### 5.6 Cálculo das bandas de incerteza

A Figura 5.10 apresenta as bandas de incerteza e as bandas de confiança calculadas pela Eq. 2.5. A Tabela 5.5 apresenta as equações obtidas para as bandas de incerteza e para a curva média.

**Tabela 5.5: Equações das bandas de incerteza e da curva média.**

	Equação
Banda de Incerteza Inferior	$\log(N) = 25,965 - 7,681.\log(S)$
Curva Média	$\log(N) = 27,763 - 8,333.\log(S)$
Banda de Incerteza Superior	$\log(N) = 29,599 - 8,997.\log(S)$

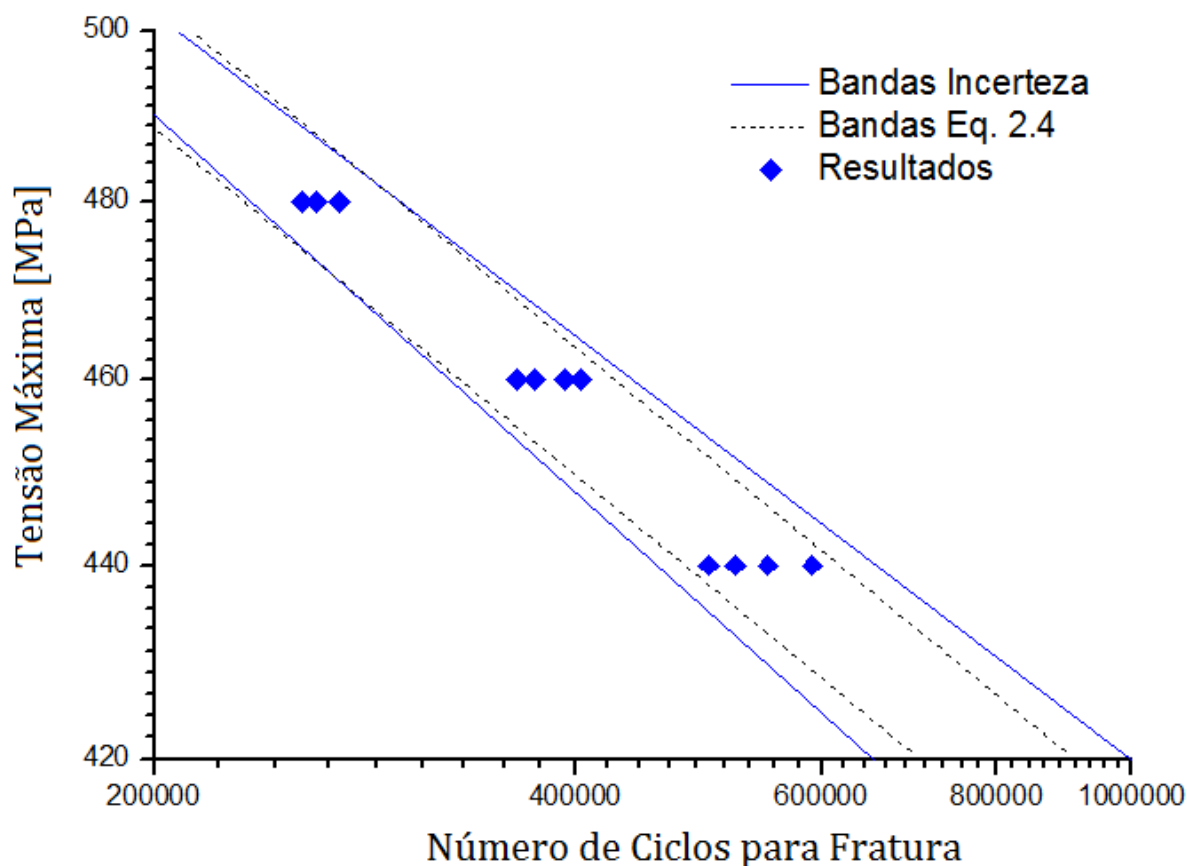


Figura 5.10: Comparação entre bandas de incerteza e bandas de confiança da equação 2.4.

As bandas de incerteza tem valores praticamente iguais aos das Eq. 2.3 e Eq. 2.5 para tensão de 480MPa, porém são mais conservadoras para as tensões inferiores. Isso se deve ao fato das bandas de incerteza levarem em consideração a variação da incerteza do número de ciclos para cada nível de tensão, por isso são mais conservadoras para nível de tensão baixos onde a dispersão dos resultados é maior. Para a tensão de 480MPa as bandas de incerteza seriam menos conservadoras que as bandas das equações se elas não considerassem a incerteza da tensão aplicada.

### 5.6.1 Influência da incerteza da tensão nas bandas de incerteza

A Tabela 5.6 apresenta os valores do número de ciclos para as bandas de incerteza com e sem a consideração da incerteza da tensão aplicada. A influência média da incerteza da tensão foi de 9,5% mostrando que a incerteza da tensão aplicada não pode ser desprezada.

**Tabela 5.6: Comparação entre valor do número de ciclos para bandas de incerteza com e sem consideração da incerteza da tensão aplicada.**

Tensão	Banda de incerteza normal	Banda de incerteza considerando $U_{\sigma}=0$	Diferença
Banda inferior			
440	457495	501746	9,7%
460	325166	355295	9,3%
480	234496	255315	8,9%
Banda superior			
440	656641	590094	10,1%
460	440198	397271	9,8%
480	300166	271998	9,4%
Média			9,5%

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados e obtidos e análises realizadas, conclui-se que:

Quanto a calibração dinâmica:

- A incerteza da carga máxima aplicada aumenta com o aumento da frequência de ensaio.
- Para frequências de ensaios muito elevadas a máquina de ensaios pode não ser capaz de manter o valor máximo de erro permitidos.
- Os valores de correção da carga máxima aplicada aumentam com o aumento da carga aplicada.
- O desvio padrão da carga aplicada medido pela máquina de ensaios é diferente do medido diretamente nas amostras.
- A calibração dinâmica da máquina de ensaios é de grande importância para determinar frequências de operação adequadas, valores de correção da carga e valores de incerteza da carga.

Quanto a curva S-N:

- Devido a dispersão dos resultados do número de ciclos nem sempre ser constante o cálculo das bandas de confiança sugeridos em normas nem sempre é aplicável.
- A variação da dispersão do número de ciclos em função da tensão aplicada não se deve a variação da incerteza da tensão aplicada, mas sim ao comportamento do próprio material.

Quanto ao estimativas de incerteza:

- A incerteza devido ao desalinhamento é a fonte mais importante na avaliação da incerteza da tensão aplicada.

- A metodologia proposta para o cálculo das bandas de incerteza além de levar em consideração a incerteza da tensão aplicada, também considera a variação na dispersão dos resultados obtidos.
- A incerteza da tensão aplicada não pode ser desprezada na avaliação dos resultados de fadiga, contribuindo em média com 9,5% dos valores das bandas de incerteza.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar o efeito da incerteza da rugosidade dos corpos de prova no número de ciclos para fratura, principalmente em materiais de alta resistência e baixa ductilidade.
- Aplicar o método de estimativa de incerteza de fadiga em materiais frágeis que devem ser mais suscetíveis ao efeito da rugosidade.
- Estudar efeitos da incerteza da temperatura e da umidade na incerteza em fadiga, principalmente para materiais mais sujeitos a efeitos de corrosão.
- Estudar efeitos de variáveis metalúrgicas (tais como: variações do tamanho de grão, presença e alinhamento de inclusões e ou precipitados, segregações etc) sobre a incerteza do ensaio de fadiga.
- Desenvolver método numérico utilizando simulação de Monte-Carlo para cálculo das bandas de incerteza das curvas S-N.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) e INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO), **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**, 3. Ed, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR/IEC 17025: **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibrações**, Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Norma Brasileira NBR ISO 3853: **Veículos rodoviário – Dispositivo de acoplamento mecânico de veículo de tração para reboques-moradias – (*trailers*) e reboques leves – Ensaio de resistência mecânica**, Rio de Janeiro, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1012: **Standard Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading**, Pennsylvania, 2005

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1942: **Standard Guide for Evaluating Data Acquisition Systems Used in Cyclic Fatigue and Fracture Mechanics Testing**, Pennsylvania, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E466: **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials**, Pennsylvania, 2007

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E467: **Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System**, Pennsylvania, 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E739: **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data**, Pennsylvania, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Special Technical Publication STP N° 91-A: **A Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data**, 2ªed , Philadelphia, 1916.

BENGTSSON, A. **Uncertainty in fatigue life prediction of structures subject to Gaussian loads**, *Probabilistic Engineering Mechanics* 24, p.224-235, Elsevier, 2009

BRANCO, C. A. G. M., **Mecânica dos Materiais**, 2ª ed. , Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985

BRITISH STANDARD, BS 7935-1: **Constant Amplitude Dynamic Force Calibration – Part 1: Calibration and verification of non-resonant uniaxial dynamic testing system – Method**, Londres, 2004

BRITISH STANDARD, BS 7608: **Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures**, British Standards Institution, Londres, 1993

BUČAR T. **A Neural network approach to describing the scatter of S-N curves**, *International Journal of Fatigue* 28, p. 311-323, Elsevier, 2006

CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.

CAMERON D.W. et al. **Fatigue Properties in Engineering**, ASM Handbook Vol. 19: Fatigue and Fracture, Estados Unidos: ASM International, p 36-65, 1996

DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**, 3 ed., London: McGraw-Hill, 1988

EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACREDITATION, EA-4/16: **Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing**, 2003.

FINE M. E, CHUNG Y.-W, **Fatigue Failure in Metals**, ASM Handbook Vo. 19: Fatigue and Fracture, Estados Unidos: ASM International, p 63-72, 1996.

FROST, W. Q., et. al. **Metal Fatigue**, Oxford, Clarendon Press, 1974

GARCIA A. et. al., **Ensaio dos Materiais**, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000

INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), Document IIW-XIII-WG1-114 – 03, **Best Practice Guide on Statistical Analysis of Fatigue Data**, Reino Unido, 2003

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 7206-4: **Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses – Part 4: Determination of endurance properties of stemmed femoral components**, Suiça, 2002

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 100: **Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)**, 2008a

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). JCGM 200: **International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)**, 2008b

JORNADA, D. **Implantação de um guia orientativo de incerteza de medição para avaliadores de laboratório da rede Metrológica RS**, Dissertação PPGE: UFRGS, 2009.

KARADENIZ H. **Uncertainty modeling in the fatigue reliability calculation of offshore structures**, Reliability Engineering & System Safety 74, p. 323-335, Elsevier, 2001

KOUTSOURELAKIS S. **Effect of material uncertainties on fatigue life calculations of aircraft fuselages: A cohesive element model**, Engineering Fracture Mechanics 73, p. 1202-1219, Elsevier, 2006

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (NPL). **Measurement Good Practice Guide No. 11: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement**, 2<sup>a</sup>ed, Grown: Teddington, 2001.

PIERCE S. **Uncertainty analisys of a neural network used for fatigue lifetime prediction**, Mechanical Systems and Signal Processing 22, p.1395-1411, Elsevier, 2008

PIZZOLATO M. **Mapeamento da Estrutura Global que Fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira**, Tese PPGE: UFRGS, 2006

SCHUTZ W. **A History of fatigue**, Engineering Fracture Mechanics 54(2), p. 263-300, Elsevier, 1996

SHIGLEY J.E., MISCHKE C.R., **Mechanical Engineering Design**, 8 ed, Estados Unidos: Mc Graw Hill, 2001

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 01 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 01 - **The Determination of Uncertainties in High Cycle Fatigue Testing (for plain and notch-sensitive specimens)**, 2000.

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 02 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 02 - **The Determination of Uncertainties in Fatigue Crack Growth Measurement**, 2000.

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), UNCERTE CoP 05 – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material n° 05 - **The Determination of Uncertainties in Low Cycle Fatigue Testing**, 2000.

SVENSSON, T. **Prediction uncertainties at variable amplitude fatigue**, International Journal of Fatigue 19, p. 295-302, Elsevier, 1997

STEPHENS, R. et al. **Metal Fatigue in Engineering**, 2 Ed, New York: Wiley Interscience, 2001

## ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO

### ***Cálculo de Incerteza da Tensão Aplicada:***

Como fontes de incerteza da tensão temos (serão utilizados dados numéricos para tensão de 480 MPa):

- Diâmetro do corpo de prova igual a 6,93mm com incerteza de 0,01mm e k=2 conforme certificado de calibração.
- Desalinhamento: estimado a partir da lei de Hooke, multiplicando-se o módulo de elasticidade (210000 MPa para aço) pela diferença da máxima deformação medida e o valor médio das deformações medidas pelos extensômetros. Assumindo-se ainda distribuição retangular.

$$u_{\text{Desalinhamento}} = \frac{210000 \text{MPa} \cdot 21,47 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}{\sqrt{3}} = 2,603 \text{MPa}$$

- Carga aplicada (18087N)
  - Componente de incerteza da calibração estática 0,08% com k=2,16 conforme certificado de calibração.
  - Componente de incerteza dinâmica 7,58N obtidos a partir da interpolação dos dados de desvio padrão das calibrações dinâmicas realizadas.

Cálculo da incerteza combinada dos componentes da carga aplicada:

$$u_{p_{\text{est}}} = \frac{0,08 \cdot 18087 / 100}{2,16} = 6,70 \text{N}$$

$$u_p = \sqrt{6,70^2 + 7,58^2} = 10,11 \text{N}$$

$$v_{\text{eff}} = \frac{10,11}{\frac{6,70}{\infty} + \frac{7,58}{50-1}} = 155$$

Cálculo dos coeficientes de sensibilidade da carga e do diâmetro (equações 3.2 e 3.3):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d} = -\frac{2\sigma}{d} = \frac{2.480}{6,93} = 138,39$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P} = \frac{\sigma}{P} = \frac{480}{18087} = 0,02651$$

Cálculo dos componentes de incerteza da carga e do diâmetro:

$$u_p = 10,11 \cdot 0,02651 = 0,1358 \text{ MPa}$$

$$u_d = \left(\frac{0,01}{2}\right) \cdot 138,39 = 0,7990 \text{ MPa}$$

Incerteza combinada da tensão e graus de liberdade efetivos:

$$u_c = \sqrt{0,1358^2 + 0,7990^2 + 2,603^2} = 2,697 \text{ MPa}$$

$$v_{eff} = \frac{2,726}{\frac{0,1358}{155} + \frac{0,7990}{\infty} + \frac{2,603}{\infty}} = 25 \cdot 10^6$$

Para os graus de liberdade acima e nível de confiança de 95% temos  $k=1,960$  e assim incerteza expandida da tensão será:

$$U = 2,726 \cdot 1,96 = 5,29 \text{ MPa}$$

Repetindo esse cálculo para os outros níveis de tensão são encontrados os valores da Tabela 5.4.

### ***Cálculo de Incerteza do Número de Ciclos:***

Para cada nível de tensão é calculado o desvio padrão do logaritmo do número de ciclos. A partir deste é calculada a incerteza do número de ciclos para este nível de tensão pela equação  $u = s/\sqrt{n}$ . Os valores encontram-se na tabela abaixo.

**Tabela A.1: Cálculo da incerteza do número de ciclos para cada nível de carga.**

Corpo de Prova	Tensão Aplicada [MPa]	Número de ciclos para Fratura N	Log(N)
F	480	255053	5,4066
A	480	255091	5,4067
C	480	261550	5,4176
E	480	271656	5,4340
		Desvio Padrão	0,012926
		Incerteza	0,006463
I	460	363696	5,5607
J	460	374421	5,5734
H	460	393352	5,5948
G	460	404071	5,6065
		Desvio Padrão	0,020614
		Incerteza	0,010307
L	440	497806	5,6971
K	440	520495	5,7164
B	440	549511	5,7400
M	440	591230	5,7718
		Desvio Padrão	0,032176
		Incerteza	0,016088

Para calcular a incerteza expandida foi calculado o valor do coeficiente de abrangência usando-se um nível de confiança de 95% e 10 (= 12 - 2) graus de liberdade, obtendo-se  $k = 2,228$ . Assim obtêm-se os valores de incerteza expandida da tabela abaixo.

**Tabela A.2: Cálculo da incerteza expandida do logaritmo do número de ciclos para cada nível de carregamento.**

Nível de Tensão	Incerteza Expandida (do logaritmos do numero de ciclos)
480	0,014401
460	0,022965
440	0,035846

***Cálculo das Bandas de Incerteza:***

Com os dados calculados nas seções anteriores foram criadas as tabelas abaixo.

**Tabela A.3: Cálculos utilizados para ajuste da banda de incerteza inferior.**

Corpo de Prova	Tensão Aplicada [MPa]	Número de ciclos para Fratura	Log(N)	Log(N)- $U_{\log(N)}$	Log( $\sigma$ - $U_{\sigma}$ )
F	480	255053	5,4066	5,3922	2,676428
A	480	255091	5,4067	5,3923	2,676428
C	480	261550	5,4176	5,4032	2,676428
E	480	271656	5,4340	5,4196	2,676428
I	460	363696	5,5607	5,5378	2,657754
J	460	374421	5,5734	5,5504	2,657754
H	460	393352	5,5948	5,5718	2,657754
G	460	404071	5,6065	5,5835	2,657754
L	440	497806	5,6971	5,6612	2,63823
K	440	520495	5,7164	5,6806	2,63823
B	440	549511	5,7400	5,7041	2,63823
M	440	591230	5,7718	5,7359	2,63823

**Tabela A.4: Cálculos utilizados para ajuste da banda de incerteza superior.**

Corpo de Prova	Tensão Aplicada [MPa]	Número de ciclos para Fratura	Log(N)	Log(N)+U <sub>log(N)</sub>	Log(σ+U <sub>σ</sub> )
F	480	255053	5,4066	5,4210	2,686001
A	480	255091	5,4067	5,4211	2,686001
C	480	261550	5,4176	5,4320	2,686001
E	480	271656	5,4340	5,4484	2,686001
I	460	363696	5,5607	5,5837	2,667705
J	460	374421	5,5734	5,5963	2,667705
H	460	393352	5,5948	5,6177	2,667705
G	460	404071	5,6065	5,6294	2,667705
L	440	497806	5,6971	5,7329	2,648614
K	440	520495	5,7164	5,7523	2,648614
B	440	549511	5,7400	5,7758	2,648614
M	440	591230	5,7718	5,8076	2,648614

A partir do ajuste da curva dos dados das duas últimas colunas de cada tabela obtêm-se as equações das bandas de incerteza inferior e superior que são apresentadas na Tabela 5.5.