



PUC Minas

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA**

---

**Dissertação de Mestrado**

**ACÚMULO DE DANOS POR FADIGA  
NO AÇO SAE 8620**

**Álvaro Alvarenga Júnior**

**ORIENTADOR: Prof. Ernani Sales Palma, Dr.-Ing.**

Julho de 2001



PUC Minas

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA

---

**ACÚMULO DE DANOS POR FADIGA  
NO AÇO SAE 8620**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas pelo aluno **Álvaro Alvarenga Júnior** como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

**Banca Examinadora:**

Prof. Ernani Sales Palma, Dr.-Ing. - PUC Minas - Orientador  
Prof. Júlio Ricardo Barreto Cruz, DSc - CDTN - Examinador Externo  
Prof. Luiz Cláudio Oliveira, DSc. - PUC Minas - Examinador Interno  
Prof. Wisley Falco, DSc. - PUC Minas - Suplente

Belo Horizonte, 04 de Julho de 2001

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãs.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e em especial às seguintes pessoas e instituições:

- Tanius Rodrigues Mansur - CDTN – agradecimento especial
- Ernani Sales Palma - PUC Minas
- Denis Henrique Bianchi Scaldaferrri, Nirlando Antônio Rocha, Emerson Giovani Rabello - Laboratórios CDTN
- Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pelo financiamento do trabalho.
- Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN - pela cessão do Laboratório de Análise de Tensões e material consumível.

## RESUMO

Um problema comum em componentes mecânicos sujeitos a tensões cíclicas é seu rompimento súbito com tensões inferiores ao seu Limite de Escoamento, ou seja, falha por fadiga.

É apresentado neste trabalho uma análise do comportamento mecânico do aço SAE 8620 quando submetido à fadiga. Este aço é utilizado em componentes de alta responsabilidade, principalmente na indústria automotiva.

Para a atingir os objetivos propostos, determinou-se a curva S-N-P do material virgem, bem como várias propriedades mecânicas tais como Dureza, Limite de Resistência à Tração, Limite de Ruptura, Tensão de Escoamento e Limite de Resistência à Fadiga.

Em seguida, utilizando-se uma série de ensaios de fadiga com quatro níveis distintos de tensões alternadas em seqüências crescentes e decrescentes, aplicaram-se danos controlados neste aço. Após a aplicação dos danos, realizaram-se ensaios tipo “Up-and-Down” para a obtenção do novo Limite de Resistência à Fadiga ( $S_e$ ) referente a cada seqüência de tensões.

As propriedades mecânicas de Dureza, Limite de Resistência à Tração, Limite de Ruptura e Tensão de Escoamento também foram obtidas em materiais danificados.

Realizou-se uma análise comparativa entre as propriedades do aço virgem e do aço danificado. Além disto, utilizaram-se vários métodos de análise de fadiga para a obtenção e comparação dos danos nas diversas seqüências de tensões. Os resultados obtidos foram correlacionados e discutidos.

## ABSTRACT

A common problem in mechanical components subjected to cyclical stresses is the sudden rupture at stresses below its Yielding Strength, that is, it fails due to fatigue.

An analysis of the mechanical behavior of SAE 8620 steel subjected to fatigue is presented in this work. This steel is used in critical components, specially in the automotive industry.

To reach the proposed objectives, the S-N-P curve of the blank material has been determined, as well as several mechanical properties such as Hardness, Endurance Limit to Traction, Limit of Rupture, Yield Limit, and the Endurance Limit to Fatigue.

After that, controlled damages have been applied in this steel using a series of fatigue tests with four distinct levels of alternated tension in increasing and decreasing sequences.

After application of damage, "Up-and-Down" tests were performed to obtain the new Endurance Limit of Fatigue ( $S_e$ ) for each stress sequence.

Mechanical properties namely Hardness, Endurance Limit to Traction, Limit of Rupture and Yielding Limit, have also been obtained for damaged materials.

A comparative analysis between the blank steel and damaged steel properties was performed. Furthermore, used several fatigue analysis methods have been to obtain and compare the damage for several stress sequences. The obtained results were analyzed and discussed.

## SUMÁRIO

Simbologia .....	x
Capítulo 1- Introdução.....	1
Capítulo 2 -Revisão Bibliográfica .....	2
2.1 Metodologia para dimensionamento à fadiga.....	2
2.1.1 Fadiga controlada pela tensão.....	5
2.1.2 Métodos para det. Curvas S-N-P e o Limite Resistência à Fadiga ...	8
2.1.2.1 Método Padrão .....	8
2.1.2.2 Ensaio de Tensão Constante .....	9
2.1.2.3 Método da Sobrevivência .....	10
2.1.2.4 Método do Degrau .....	12
2.1.2.5 Método Prot .....	13
2.1.2.6 Método "Up-And-Down".....	15
2.1.2.7 Método do Valor Extremo.....	19
2.1.2.8 Comparação entre os Métodos.....	20
2.1.3 Fadiga Controlada pela Deformação .....	22
2.1.3.1 Comportamento cíclico da tensão - deformação .....	23
2.1.3.2 Determinação da curva de tensão - deformação .....	25
2.1.3.3 Curva da vida da deformação .....	27
2.1.3.4 Efeitos da tensão média .....	28
2.1.4 Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga.....	29
2.1.5 Comparação entre os Métodos.....	33
2.2 Teorias de Acúmulo de Danos .....	34
2.2.1 Teoria Linear do Dano .....	35
2.2.2 Teoria de Acúmulos de Danos De Marco-Starkey .....	38
2.2.3 Teoria De Acúmulos de Danos de Henry.....	39
2.2.4 Teoria de Acúmulo de Danos de Gatts .....	40
2.2.1 Teoria de Acúmulo de Danos de Corten-Dolan .....	42
2.2.2 Teoria de Acúmulo de Danos de Marin.....	44
2.2.3 Regra Linear Dupla de Danos de Manson.....	46
Capítulo 3 -Materiais e Métodos .....	48

3.1	Materiais.....	48
3.2	Equipamentos utilizados .....	50
3.3	Corpos-de-Prova Utilizados .....	53
3.4	Metodologia dos Ensaios .....	54
3.4.1	Ensaios de Tração .....	54
3.4.2	Ensaios de Dureza.....	54
3.4.3	Ensaios de Microdureza.....	54
3.4.4	Análise Metalográfica.....	54
3.4.5	Ensaios de Acúmulo de Danos .....	55
3.4.6	Determinação das Curvas S-N-P .....	57
3.4.7	Determinação do Limite de Resistência à Fadiga .....	58
Capítulo 4	-Resultados Experimentais.....	61
4.1	Resultados Preliminares .....	61
4.2	Curvas S-N.....	62
4.3	Acúmulo de danos .....	64
4.4	Ensaio de Micro-dureza .....	74
Capítulo 5	-Discussão dos Resultados .....	76
5.1	Introdução .....	76
5.2	Influência da Refrigeração .....	77
5.3	Relação entre as propriedades quasi-estáticas .....	78
5.4	Análise de acúmulo de danos .....	83
5.4.1	Comparação dos ensaios de acúmulo de danos .....	86
Capítulo 6	-Conclusões e sugestões .....	88
	Referências Bibliográficas .....	90
	Anexos.....	93

## **Simbologia**

### **Símbolos**

A = fator de Amplitude

a = expoente de propagação de danos

b = expoente de resistência à fadiga

C = percentual de confiança do intervalo.

C\* = constante do material

c = expoente de ductilidade à fadiga

D = dano do material

D' = Dano por núcleo

d = fração do dano

d\* = constante do material

da/dN = Taxa de crescimento de trinca

DP = desvio padrão

DP<sub>e</sub> = Desvio padrão de  $\hat{S}_e$

E<sub>A</sub> = Limite de Resistência à Fadiga após o dano

E = módulo de elasticidade

E<sub>o</sub> = Limite de Resistência à Fadiga original

F<sub>A</sub> = Força aplicada pelo peso morto

F<sub>CP</sub> = Força aplicada sobre o corpo-de-prova

G = limite de segurança

k = constante do material

K' = coeficiente de resistência cíclica

K<sub>c</sub> = intensidade de tensão crítica

M = Momento Fletor

m = número de danos nucleados

m\* = constante do material

M<sub>R</sub> = Momento resultante

n' = expoente de endurecimento da deformação cíclica

n = número de ciclos aplicado

n\* = constante do material

## *Simbologia*

$N$  = número de ciclos até a falha

$N'$  = ciclos até a iniciação da trinca

$N^*$  = número de ciclos necessário para nuclear um dano

$N'$  = número de ciclos necessário para a iniciação da trinca

$N_f$  = total de ciclos até a falha

$N_i$  = número de ciclos até a iniciação da trinca

$N_p$  = número de ciclos para a propagação da trinca até a falha

$P$  = coeficiente de propagação determinado experimentalmente

$p$  = expoente de propagação determinado experimentalmente

$q$  = expoente da equação de Marin

$R$  = fator de fadiga

$R_t$  = rótula

$r$  = raio

$r_a$  = Taxa de propagação de danos

$R$  = taxa de tensão

$S$  = tensão alternada

$S_\alpha$  = tensão de falha Prot

$S$  = tensão aplicada

$S_e$  = limite de resistência à fadiga

$S_e^*$  = limite de fadiga em função do histórico de tensão cíclica, não constante

$S_{e0}$  = limite de fadiga inicial, quando  $n=0$

$\hat{S}_e$  = estimativa do limite de resistência à fadiga

$S_0$  = nível de tensão mais baixo onde ocorreu o evento de menor frequência.

$W$  = Módulo de resistência da seção transversal

$\Delta K$  = faixa de intensidade de tensão

$\Delta K_0$  = ponto inicial de intensidade de tensão

$2N_f$  = número de reversões até a falha

$2N_t$  = vida de transição

### **Símbolos Gregos**

$\mu$  = média verdadeira do limite de resistência à fadiga,

$\alpha$  = nível de significância,

## *Simbologia*

$y_0$  = região de rejeição da distr. normal padrão, baseada na seleção de  $\alpha$

$\gamma$  = taxa de limite de fadiga

$\Delta\epsilon$  = amplitude de deformação plástica ciclicamente estável

$\Delta\sigma$  = amplitude de tensão ciclicamente estável

$\sigma'_f$  = coeficiente de resistência à fadiga

$\epsilon'_f$  = coeficiente de ductilidade à fadiga

$\beta$  = taxa de ciclo

$\alpha$  = taxa Prot

$\sigma_a$  = amplitude da tensão alternada

$\gamma_e$  = taxa de limite à fadiga

$\sigma_{esc}$  = limite de escoamento do material

$\sigma_{max}$  = tensão máxima no ciclo

$\sigma_{med}$  = tensão média

$\sigma_{min}$  = tensão mínima no ciclo

$\gamma_S$  = taxa de amplitude de tensão

$\sigma_{ult}$  = limite de resistência a tração do material

$\Delta\sigma$  = faixa da tensão alternada

$\Delta\epsilon$  = variação total da deformação

$\Delta\epsilon_e$  = variação da deformação elástica

$\Delta\epsilon_p$  = variação da deformação plástica

$\Delta\sigma$  = variação total de tensão

## **Abreviaturas**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM – American Society for Metals

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

PUC-Minas – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

SAE – Society of Automotive Engineers

ASTM – American Society of Testing and Materials

## **Capítulo 1 - Introdução**

Atualmente faz-se premente a necessidade de reduzir o consumo de combustível em veículos automotores. Uma forma de atingir este objetivo é reduzir significativamente o peso destes veículos, o que leva projetistas e engenheiros a diminuírem as dimensões dos componentes e a utilizarem os materiais próximo ao seu limite de escoamento. Assim, o estudo das propriedades mecânicas dos materiais de construção mecânica para a indústria automotiva é de suma importância para o correto dimensionamento dos componentes, principalmente em relação àqueles materiais utilizados em componentes nos quais sua falha envolve risco de vida (Ridder et al., 1993; Canfield e Villaire, 1992).

Algumas teorias de acúmulo de danos por fadiga partem do pressuposto que, quando um aço é submetido a uma tensão alternada superior ao Limite de Resistência à Fadiga, estabelecido para este aço, ocorre uma alteração das suas propriedades mecânicas. Observa-se ainda que ao se submeter um aço a tensões seqüenciais crescentes ou decrescentes, maiores que o Limite de Resistência à Fadiga, este limite altera-se de forma distinta (Henry, 1955; Gatts, 1961; Yang et al., 1997).

O objetivo deste trabalho é investigar as alterações nas propriedades mecânicas do aço SAE 8620 quando submetido a tensões cíclicas que provocam danos por fadiga.

Este aço tem grande uso na indústria automotiva para fabricação de peças como: engrenagens de câmbio e diferencial, coroas, pinhões, terminais, setores de direção, eixos de comando de válvulas, cruzetas, pinos de pistão, etc.

Para atingir este objetivo, realizou-se uma série de ensaios experimentais em corpos-de-prova onde foram aplicados danos controlados, em seqüências distintas de tensões. Deste modo, vê-se as propriedades mecânicas do aço SAE 8620 danificado. Uma vez determinadas estas propriedades mecânicas modificadas, fez-se uma comparação com as propriedades do material virgem e uma análise entre a diversas teorias de acúmulo de danos.

## **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Metodologia para dimensionamento à fadiga**

O termo fadiga refere-se a um fenômeno que se manifesta nos materiais submetidos a tensões cíclicas e que modifica significativamente as propriedades mecânicas. Em muitas situações, ocorre uma súbita e imprevista separação de uma peça em dois ou mais pedaços, sem que o material tenha atingido seu Limite de Escoamento. A falha provém da iniciação de uma trinca que se torna instável e propaga-se repentinamente, conduzindo ao colapso do componente ou da estrutura.

Quanto à natureza do dano à fadiga, em metais compostos por agregados de grãos de cristal, a estrutura de cada grão é anisotrópica devido aos planos do cristal e ao fechamento irregular das fronteiras do grão. Como resultado desta não homogeneidade, tem-se uma distribuição de tensões não uniforme. Nas regiões da microestrutura onde as tensões cíclicas do carregamento são altas, há formação de estrias e ondulações que se entrecrocam, como pode ser visto na Fig. 2.1.

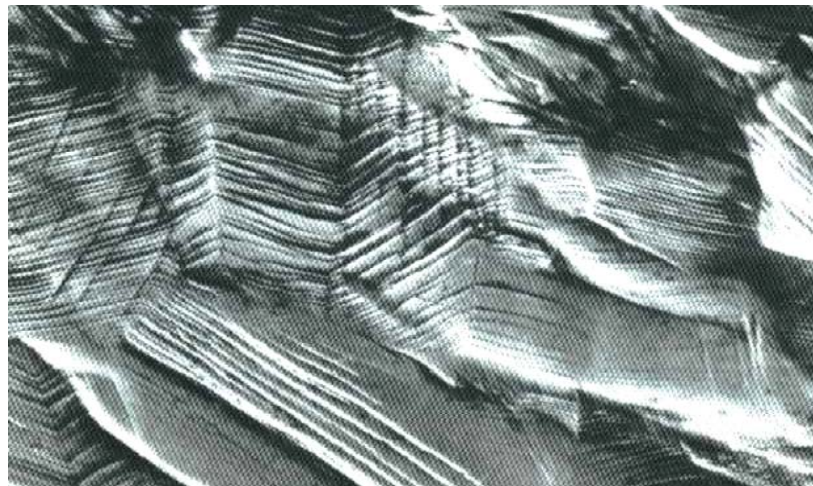


Figura 2.1 – Interseção de estrias e ondulações formadas pela deformação dos grãos devido a carregamento reverso no aço AISI 316L – SEM 859 X - (ASM Fractography, 1987)

Nos metais cujos grãos de cristal possuem uma orientação desfavorável ao carregamento aplicado, formam-se “planos de escorregamento”, que são regiões onde há intensa deformação devido ao movimento entre os planos do cristal, como mostrado na Fig. 2.2.

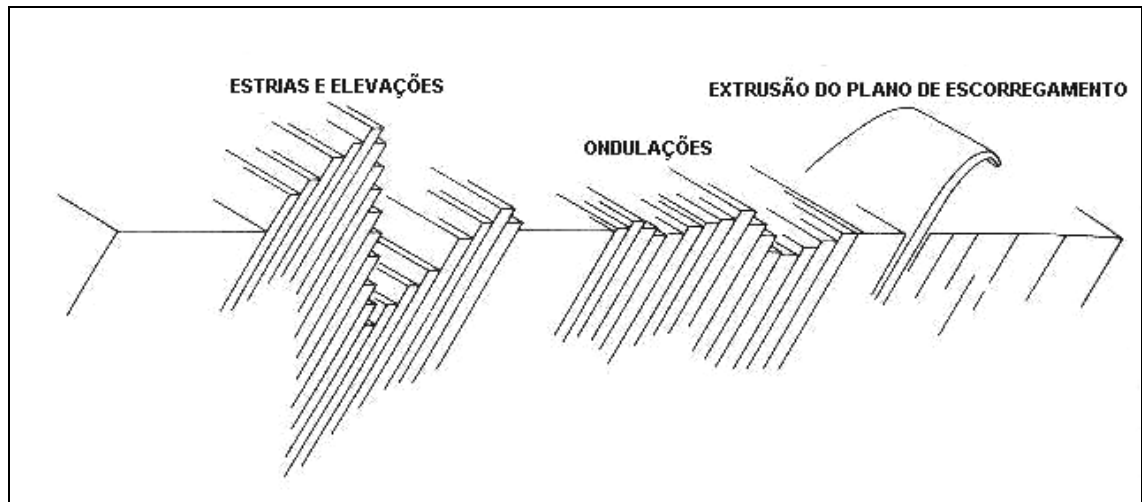


Figura 2.2 – Estrias e ondulações formadas por carregamento reverso  
(Collins,1993)

Uma pequena trinca desenvolve-se entre os “planos de escorregamento”, ou mesmo a partir de uma lacuna, inclusão ou contorno do grão como mostrado na Fig. 2.3.

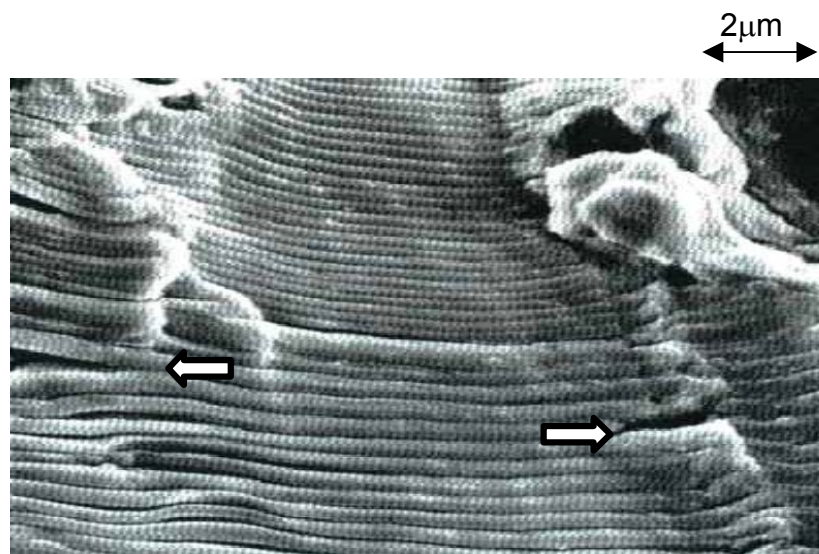


Figura 2.3 – Iniciação de trinca por fadiga em liga de alumínio 7475-T7651  
(ASM Fractography,1987)

Esta trinca cresce em um plano geralmente normal à tensão de tração até causar uma falha, algumas vezes juntando-se com outras trincas durante o processo. Em materiais pouco dúcteis, como são os materiais de alta resistência, o dano microestrutural tende a ser mais concentrado nos defeitos no material. Nestes materiais, o processo é caracterizado pela propagação de poucos defeitos, em contraste com os muitos defeitos, porém dispersos, que ocorrem em materiais altamente dúcteis. Quando a falha é dominada pelo crescimento da trinca, a fratura resultante, vista macroscopicamente, geralmente exibe uma superfície polida próximo à área em que se originou a trinca. Superfícies rugosas normalmente indicam um crescimento mais rápido da trinca. Linhas curvas concêntricas à origem da trinca são freqüentemente vistas e marcam o progresso da trinca em vários estágios, como pode ser visto na Fig. 2.4. Após a trinca ter crescido um determinado comprimento, a falha poderá ser dúctil (envolvendo grandes deslocamentos) ou frágil (pequenos deslocamentos).

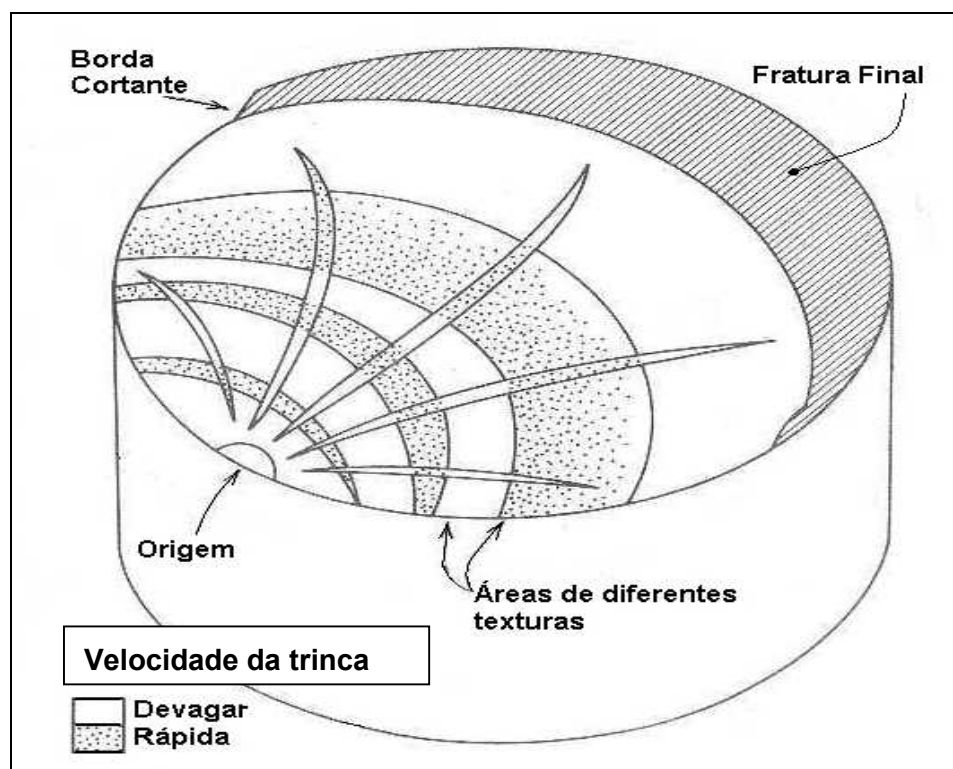


Figura 2.4 – Característica superficial da falha em um metal dúctil sujeito a ciclos de tensões alternadas (Collins, 1993)

Quando tensões ou deformações atuam no regime elástico do material, o que ocorre com baixas cargas e altos números de ciclos, o fenômeno é chamado fadiga de alto ciclo, ou fadiga controlada pela tensão.

Para um carregamento no qual as deformações plásticas atingem valores significativos dentro de cada ciclo, normalmente com altas cargas e baixo número de ciclos, o fenômeno é chamado de fadiga de baixo ciclo ou fadiga controlada pela deformação (Collins, 1993). Alguns autores indicam que a linha divisória entre fadiga de alto ciclo e de baixo ciclo ocorre entre 10 e  $10^5$  ciclos, dependendo do material (Bannantine, 1990).

Os métodos de análise de fadiga podem ser então divididos em fadiga controlada pela tensão, fadiga controlada pela deformação e mecânica da fratura aplicada à fadiga.

### 2.1.1 Fadiga controlada pela tensão

Este método foi introduzido por Wöhler (1860) e é usado como padrão para análise de fadiga há quase 100 anos para quantificar a fadiga metálica. No entanto, este método ainda é utilizado em aplicações onde a tensão aplicada está dentro do intervalo elástico do material e a vida resultante é longa, ou seja, muitos ciclos para o material se romper. (Bannantine, 1990; Suresh, 1998).

Tal como com as outras características mecânicas, as propriedades de fadiga de materiais podem ser determinadas a partir de ensaios de laboratório. Tomando-se uma tensão cíclica simples, senoidal e tensão média nula (como vista na Fig. 2.5), pode-se definir as seguintes relações:

$$\sigma_m = \text{tensão média} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

onde:

$\sigma_{\max}$  = tensão máxima no ciclo

$\sigma_{\min}$  = tensão mínima no ciclo

$$\sigma_a = \text{amplitude da tensão alternada} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\Delta\sigma = \text{faixa da tensão alternada} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.3)$$

$$R = \text{fator de fadiga} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

$$A = \text{fator de amplitude} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (2.5)$$

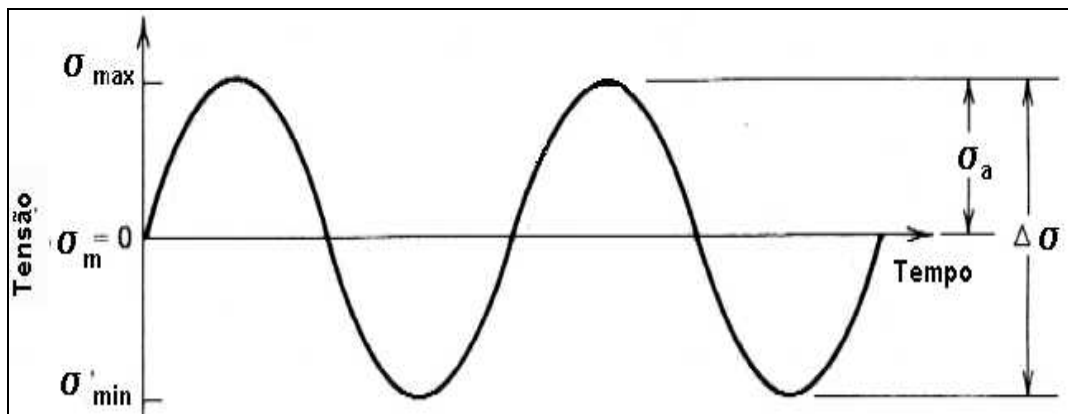


Figura 2.5 – Carregamento senoidal completamente reverso,  
Gráfico tensão x tempo

Wöhler (1860) desenvolveu um método para a obtenção de curvas de fadiga, ou curvas S-N, a partir de uma série de ensaios onde amostras são submetidas a carregamentos cíclicos numa amplitude de tensão máxima relativamente alta, usualmente da ordem de 2/3 do limite de resistência à tração, nos quais o número de ciclos até falha é encontrado. Este procedimento é repetido em outras amostras em amplitudes de tensão máxima progressivamente decrescentes. Os dados são registrados num gráfico na forma de tensão “S” versus o logaritmo do número de ciclos “N” até a falha para cada uma das amostras. Os valores de “S” são tomados como amplitude da tensão cíclica.

Observa-se dois tipos distintos de comportamento S-N, que estão representados esquematicamente na Fig. 2.6. Conforme indicado neste gráfico, quanto maior a intensidade da tensão, tanto menor será o número de ciclos que o material será capaz de suportar antes da fratura. Para algumas ligas

ferrosas e ligas de titânio, a curva S-N torna-se horizontal a partir de um determinado valor de “S”, isto é, existe um nível de tensão limite chamado Limite de Resistência à Fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não ocorrerá. Este limite de fadiga representa o valor de tensão cíclica mais alto que não causará falha para um número infinito de ciclos.

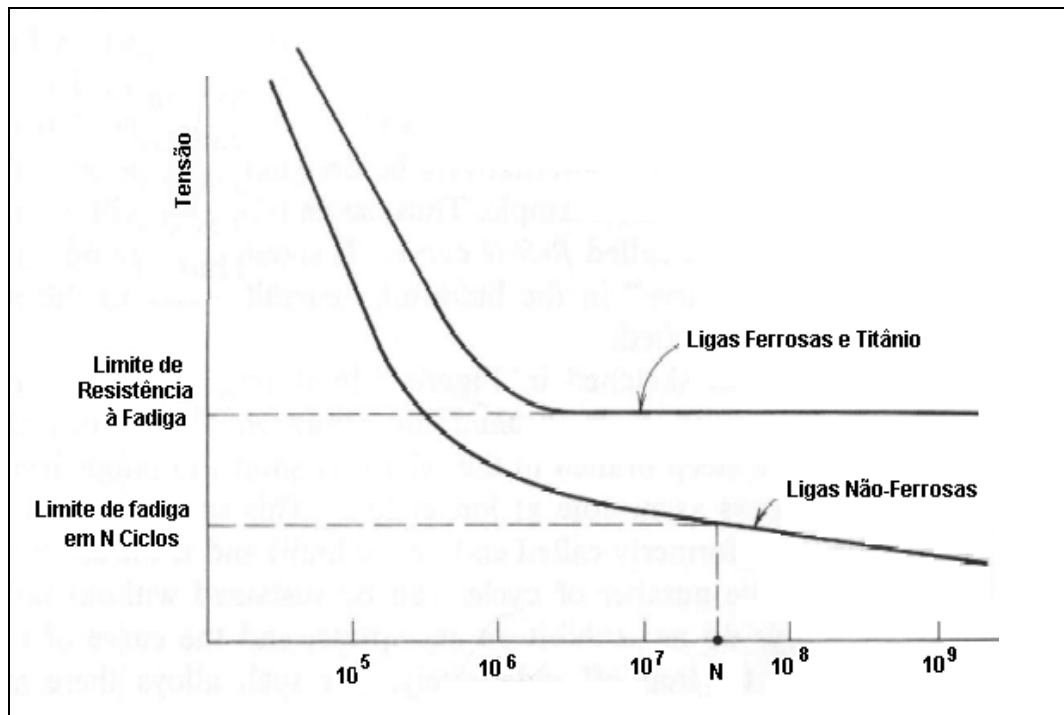


Figura 2.6 – Curvas S-N para dois tipos distintos de materiais (Collins, 1993)

Algumas ligas não-ferrosas (por exemplo: ligas de alumínio, cobre, magnésio) não têm um Limite de Resistência à Fadiga definido, uma vez que a curva S-N continua a sua tendência para baixo para valores crescentes de “N”. Assim, a falha por fadiga ocorrerá independente da magnitude da tensão. Para estes materiais, o Limite de Resistência à Fadiga é definido como o nível de tensão na qual a falha ocorrerá em um número adequadamente especificado de ciclos.

Infelizmente, existe sempre uma considerável dispersão nos dados de fadiga, o que pode conduzir a uma incerteza significativa quando a vida em fadiga e/ou Limite de Resistência à Fadiga estiver sendo considerado. A dispersão nos resultados é uma consequência da variação de parâmetros que incluem: a fabricação da amostra e preparação da superfície, variáveis metalúrgicas,

alinhamento dos corpos de provas no equipamento de ensaio, a tensão média e a rotação do ensaio. Assim, se torna necessária a construção de uma família de curvas S-N com probabilidade de falha como parâmetro. Estas curvas são chamadas curvas de probabilidade constante ou curvas S-N-P.

### 2.1.2 Métodos para determinação das Curvas S-N-P e do Limite Resistência à Fadiga

Alguns dos métodos mostrados a seguir têm o propósito de determinar tanto as curvas S-N-P como também o Limite de Resistência à Fadiga. A escolha do melhor método depende da quantidade de amostras disponíveis, do tempo e do objetivo da análise (Collins, 1993).

#### 2.1.2.1 Método Padrão

Usado geralmente quando se dispõe de poucos corpos-de-prova e se quer obter uma estimativa para toda a curva S-N. Ensaia-se um ou dois corpos-de-prova em cada um dos vários níveis de tensão. Se o corpo-de-prova atingir a vida útil preestabelecida, o próximo corpo-de-prova é ensaiado em uma tensão mais elevada.

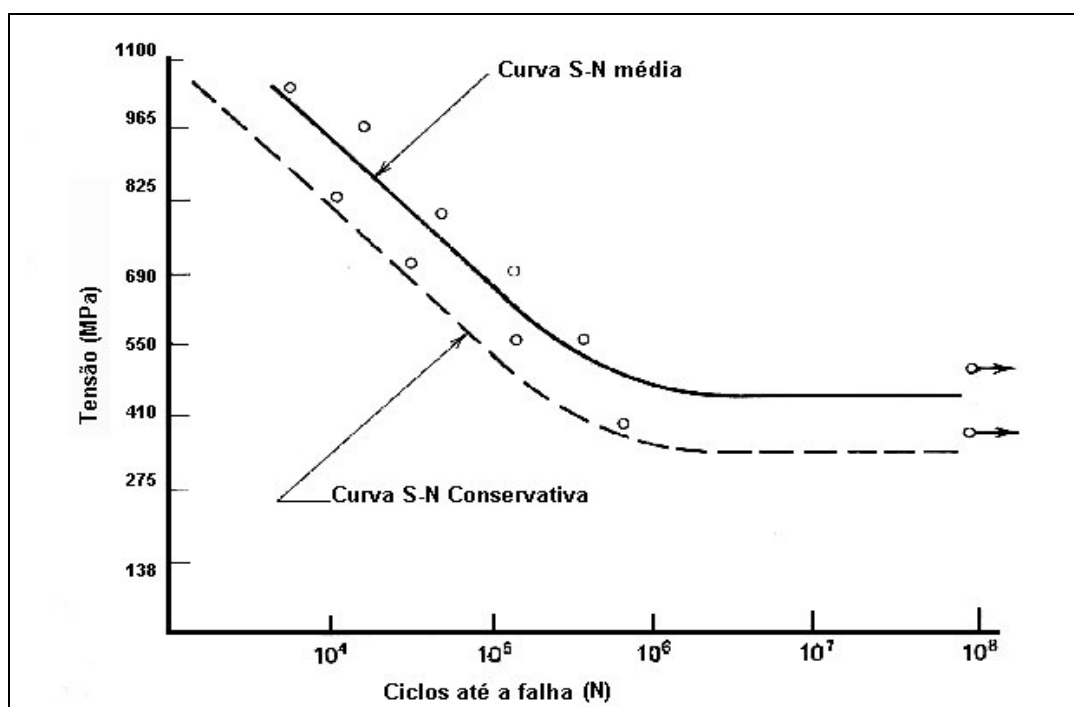


Figura 2.7 – Curvas resultantes do Método Padrão (Collins, 1993)

Os dados são traçados em um gráfico S-N padrão e uma curva média é traçada através dos pontos obtidos. Admitindo-se uma curva média (50% de probabilidade de falha), uma curva conservativa é traçada abaixo desta, como pode ser visto na Fig. 2.7. Apesar da curva conservativa não poder ser associada a nenhuma probabilidade de falha, é uma boa estimativa para as investigações da curva S-N-P e do Limite de Resistência à Fadiga.

### 2.1.2.2 Ensaio de Tensão Constante

Este método envolve ensaios com grupos de aproximadamente 15 corpos de prova em cada um dos níveis de tensão previamente escolhidos, na faixa entre o Limite de Resistência à Fadiga estimado previamente e o Limite de Escoamento do material.

Todos os dados obtidos para cada nível de tensão são traçados em um gráfico de distribuição de probabilidades log-normal e são determinadas sua média e variância. É mostrado na Fig. 2.8 um conjunto de dados obtidos deste ensaio de fadiga e traçados em um gráfico S-N. Neste gráfico também é traçada a curva média (Collins, 1993).

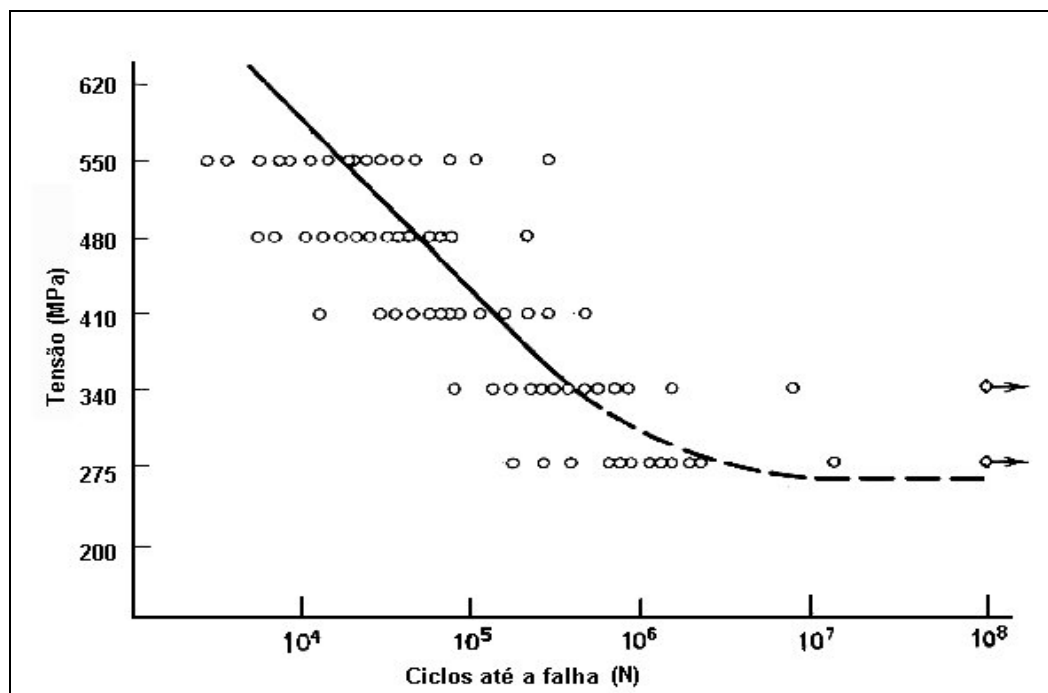


Figura 2.8 – Dados de fadiga para níveis de tensão constante sobre um gráfico S-N (Collins, 1993)

Os mesmos grupos de dados são mostrados na Fig. 2.9 em um gráfico log-normal Ciclos até a Falha x Probabilidade de Sobrevivência. Nota-se na Fig. 2.8 que a precisão dos dados é maior em tensões mais altas e que em tensões perto do Limite de Resistência à Fadiga a dispersão é grande, o que não recomenda a aplicação deste método para tensões perto deste valor.

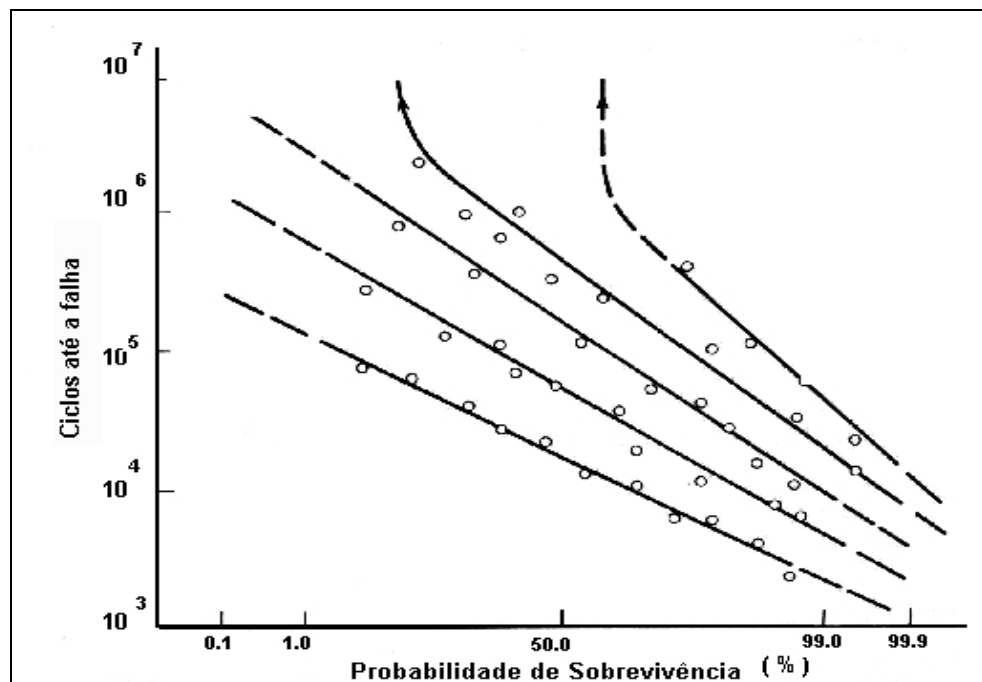


Figura 2.9 – Dados de fadiga para tensões constantes traçados em gráfico log-normal (Collins,1993)

### 2.1.2.3 Método da sobrevivência

Este método é usado para determinar o Limite de Resistência à Fadiga calculando-se a média e a variância da resistência à fadiga para um certo número de ciclos (ou vida) em especial. Usam-se grandes quantidades de corpos-de-prova ensaiados em uma faixa de tensão estreita, normalmente dois desvios padrão acima e dois desvios padrão abaixo do Limite de Resistência à Fadiga estimado empiricamente. Qualquer corpo-de-prova que atingir a vida útil estimada é considerado sobrevivente.

Os dados de um ensaio de sobrevivência para determinação do Limite de Resistência à Fadiga são mostrados na Fig. 2.10. Nota-se que quanto menor a tensão, maior o número de corpos-de-prova sobreviventes.

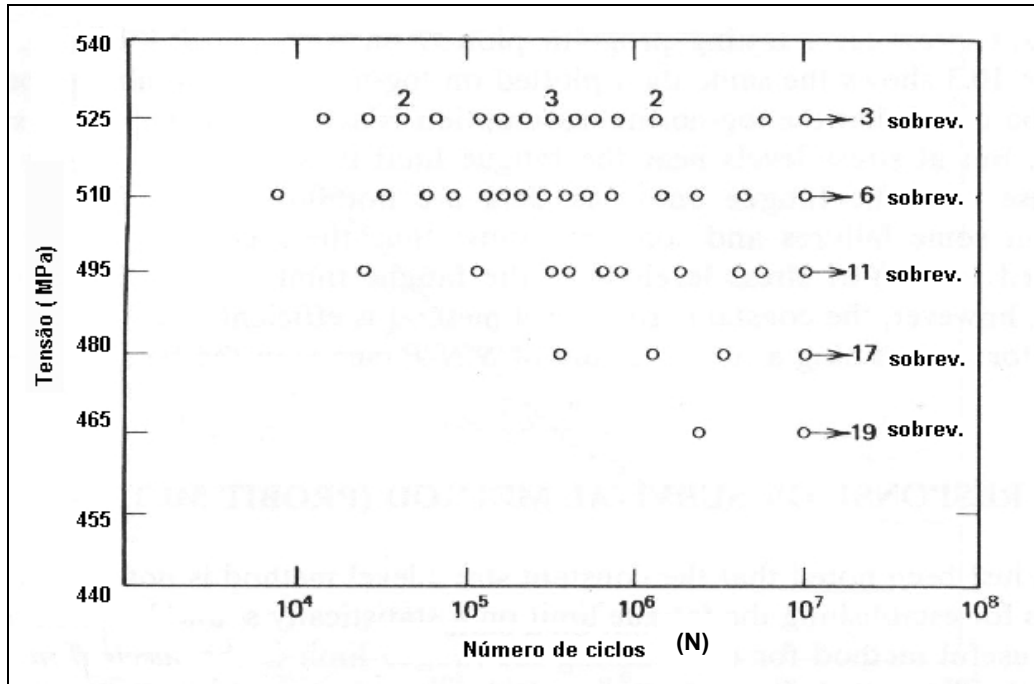


Figura 2.10 - Gráfico S-N para resultados do Método de Sobrevivência (Collins-1993)

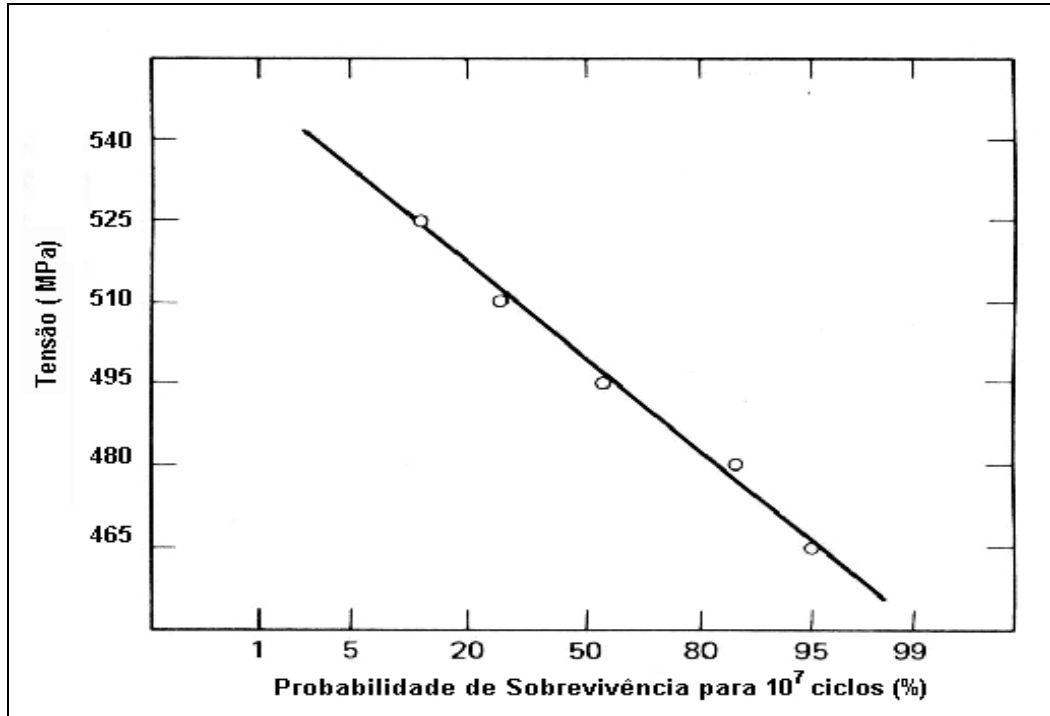


Figura 2.11 – Dados do ensaio de Sobrevivência traçados em gráfico normal de probabilidades (Collins, 1993)

Tomando-se os dados dos corpos-de-prova sobreviventes e as tensões a que estiveram sujeitos, traça-se o gráfico normal de probabilidades como mostrado na Fig. 2.11. Uma linha média é traçada através dos pontos do gráfico o que possibilita relacionar, com facilidade, a tensão e a probabilidade de sobrevivência para um dado número de ciclos (ou vida).

O Método da Sobrevivência pode consumir de 60 a 100 corpos-de-prova, o que o torna muito demorado e dispendioso.

#### 2.1.2.4 Método do Degrau

Este método tem como objetivo diminuir o número de corpos-de-prova usados no Método da Sobrevivência, fazendo com que todos os corpos-de-prova falhem. Para isto, todos os corpos-de-prova são submetidos a uma série de tensões crescentes, começando com uma tensão de 70% do Limite de Resistência à Fadiga estimado em ensaios preliminares. Se um corpo-de-prova atinge um certo número de ciclos previamente escolhido, digamos  $10^8$  ciclos, sem que ocorra a falha nesta primeira tensão, então este mesmo corpo-de-prova é submetido a uma tensão acrescida de 0,7 do desvio padrão do Limite de Resistência à Fadiga estimado. Este procedimento é repetido até que ocorra a falha, como é mostrado na Fig. 2.12.

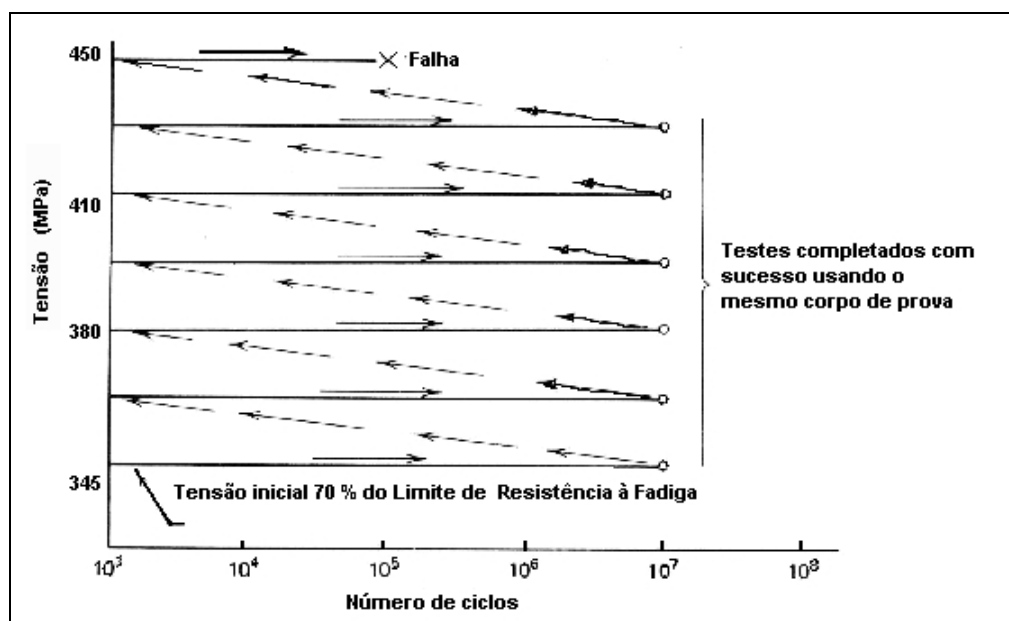


Figura 2.12 – Procedimento do ensaio do Método de Degraus (Collins, 1993)

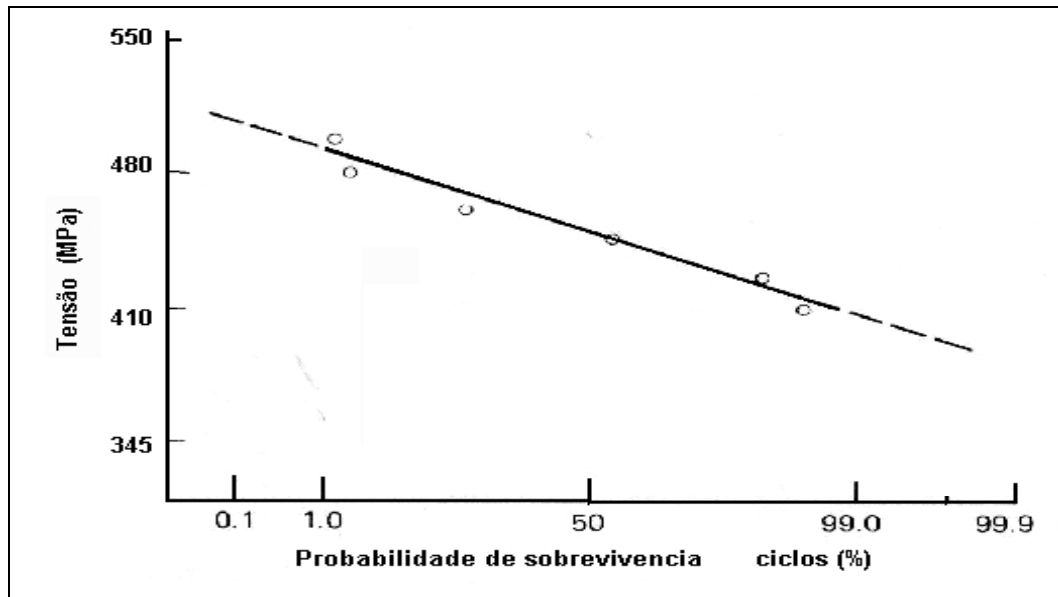


Figura 2.13 – Resultados do ensaio de degraus traçados sobre um gráfico de probabilidades normal (Collins,1993)

Um mínimo de 10 a 15 corpos-de-prova são necessários para realizar este tipo de experimento. Após os dados serem adquiridos, traça-se em um gráfico de probabilidades normal, como mostrado na Fig. 2.13.

#### 2.1.2.5 Método Prot

Este método foi proposto por Prot (1952) e consiste em aumentar constantemente a tensão até levar o corpo-de-prova à falha. A tensão de falha é relacionada com o Limite de Resistência à Fadiga através da taxa de incremento da tensão e de duas constantes do material. Este método tem sucesso com ligas de aço, titânio e alumínio. Pode-se definir este método nos seguintes passos :

- O corpo-de-prova é ensaiado a uma tensão inicial abaixo do Limite de resistência à Fadiga estimado em ensaios preliminares.
- A medida que o ensaio se desenvolve, a tensão é aumentada em passos uniformes ou constantemente de forma que a relação entre o número de ciclos e o aumento da tensão seja linear.

- Um grupo de 15 a 20 corpos-de-prova deve ser ensaiados com a mesma taxa de incremento da tensão, sendo que todos os corpos-de-prova devem ser levados à falha. Esta taxa é chamada Taxa Prot “ $\alpha$ ” e tem a unidade “MPa / ciclos”.
- Um segundo grupo de corpos-de-prova é então ensaiado em uma Taxa Prot diferente.

O resultado típico de um ensaio Prot de três grupos de corpos-de-prova iniciado com uma tensão de 360 MPa e três Taxas Prot diferentes é mostrado na Fig. 2.14.

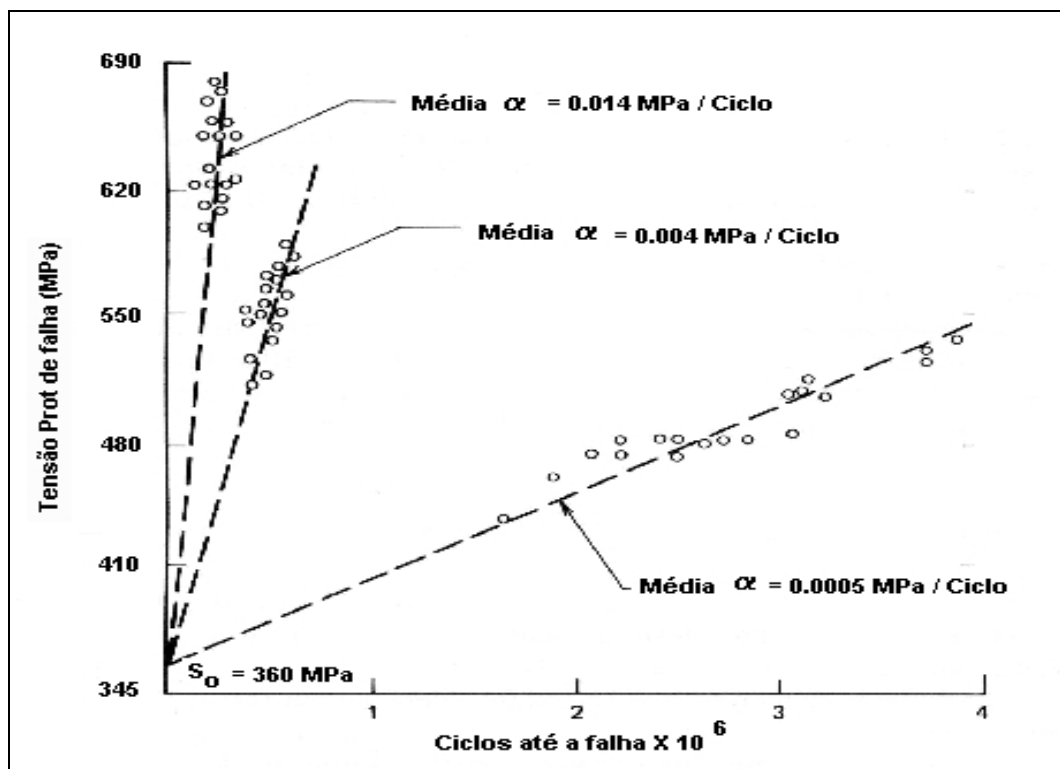


Figura 2.14 – Resultados do ensaio Prot para três Taxas de Prot (Collins,1993)

A linha média é traçada por entre os pontos de falha para cada grupo de corpos-de-prova. Foi proposto por Prot que o Limite de Resistência à Fadiga “E” seja calculado por:

$$S_{\alpha} = E + K\alpha^n \quad (2.6)$$

onde:

$S_\alpha$  = tensão de falha Prot

K e n = constantes do material

$\alpha$  = taxa Prot

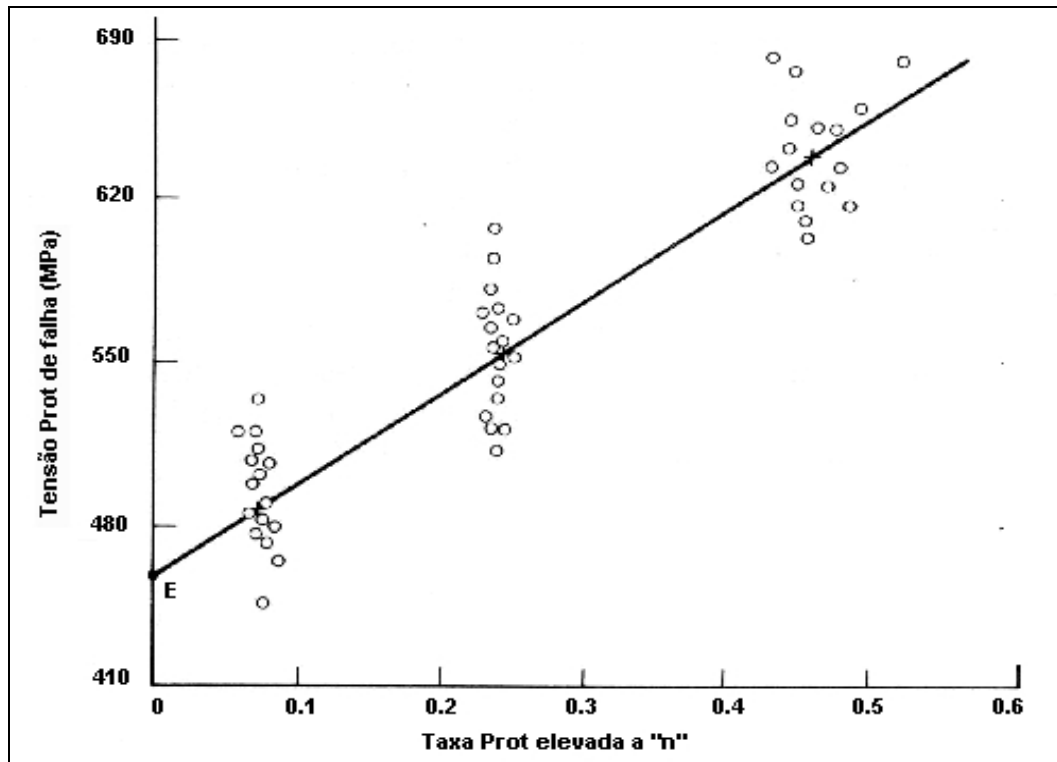


Figura 2.15 – Resultados do ensaio Prot mostrando o Limite de Resistência à Fadiga “E” (Collins,1993)

Um gráfico  $S_\alpha \times \alpha^n$  é traçado com o objetivo de encontrar um valor de “n” que seja uma relação linear entre “ $S_\alpha$ ” e “ $\alpha^n$ ” como mostrado na Fig. 2.15.

O Limite de Resistência à Fadiga médio “E” é encontrado na interseção da linha média dos pontos de falha com o eixo da Tensão Prot de falha.

#### 2.1.2.6 Método “Up-And-Down”

O método “Up-And-Down” é um procedimento utilizado tanto para a realização de ensaios mecânicos específicos em estudos de fadiga, quanto para a análise dos dados provenientes desses ensaios, sendo muito útil para estimar a média

e a variância do Limite de Resistência à Fadiga. Para a realização dos ensaios “Up-And-Down”, são utilizados em torno de 15 corpos-de-prova.

Neste procedimento, a primeira amostra é testada em um nível de tensão acima do Limite de Resistência à Fadiga determinado em ensaios preliminares. Se esta amostra vier a falhar antes da vida útil de interesse, o valor da tensão para o ensaio seguinte com um outro corpo-de-prova sofre um decréscimo. Porém, se atingir a vida pré-determinada sem falha, o nível de tensão é elevado. O procedimento continua desta maneira, sempre com o corpo-de-prova subsequente sendo ensaiado em um nível de tensão superior ou inferior ao seu antecessor, dependendo da ocorrência, ou não, de falha, como é mostrado na Fig. 2.16.

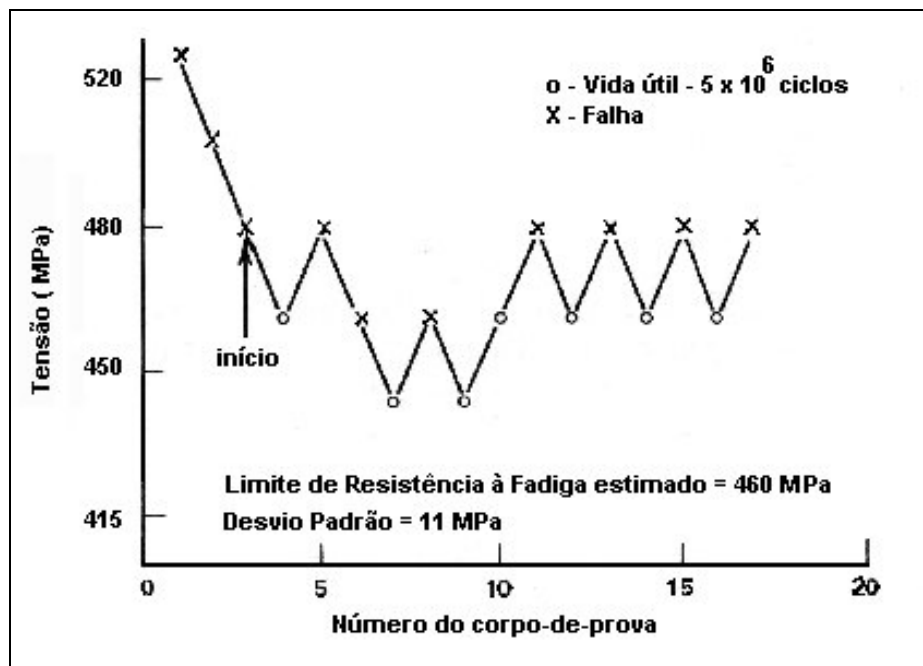


Figura 2.16 – Ensaio de fadiga “Up-And-Down” para o aço 4340 (Collins, 1993)

Os dados obtidos podem ser analisados estatisticamente e, de maneira geral, pode-se resumir o procedimento do “Up-And-Down” por meio dos seguintes passos (Collins, 1993):

- Estimar por meio de conhecimento empírico o Limite de Resistência à Fadiga ( $S_e$ ) correspondente ao tempo de vida de interesse.
- Estimar também o desvio padrão deste limite.

- c) Testar a primeira amostra em um nível de tensão maior que o determinado empiricamente.
- d) Se a primeira amostra falhar, testar a 2ª amostra num nível de tensão “d” abaixo do nível prévio. Se a 1ª amostra atingir a vida útil, testar a 2ª num nível “d” acima do nível prévio.
- e) Continuar o ensaio seqüencialmente até que pelo menos 15 amostras sejam testadas.
- f) Quando o ensaio estiver completo, determinar o evento de menor freqüência: falha ou vida útil.  
Apenas o evento de menor freqüência é utilizado na análise.
- g) Colocar os dados em uma tabela de 5 colunas, conforme modelo seguinte:

Tabela 2.1 - Modelo

Coluna I	Coluna II	Coluna III	Coluna IV	Coluna V
Níveis de Tensão	Ordenação dos Níveis de Tensão	Número de Ocorrências (N)	Produto II X III = (A)	Produto II <sup>2</sup> x III = (B)

- h) Chamar N o total da coluna III.
- i) Chamar A a soma da coluna IV.
- j) Chamar B a soma da coluna V.
- k) Calcular a estimativa do limite médio de resistência à fadiga utilizando a seguinte expressão:

$$\hat{S}_e = S_0 + d \left[ \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right] \quad (2.7)$$

onde:

$\hat{S}_e$  = estimativa do limite de resistência à fadiga

$S_0$  = nível de tensão mais baixo onde ocorreu o evento de menor freqüência.

Nesta expressão, utiliza-se  $\left[ \frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right]$  se o evento de menor freqüência for vida

útil e,  $\left[ \frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right]$  se for falha.

- l) Calcular a estimativa do desvio-padrão :

$$DP = 1,62d \left[ \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right] \text{ se } \left[ \frac{NB - A^2}{N^2} \right] \geq 0,3 \quad (2.8)$$

$$DP = 0,53d \text{ se } \left[ \frac{NB - A^2}{N^2} \right] < 0,3 \quad (2.9)$$

m) Para obter o intervalo de confiança para o limite de resistência à fadiga é necessário conhecer  $DP_e$  (desvio padrão de  $\hat{S}_e$ ).

$$DP_e = \frac{G}{\sqrt{N}} DP \quad (2.10)$$

onde: “G” é uma função não linear de  $\left( \frac{d}{DP} \right)$ . Para se obter “G” calcula-se:

$$\frac{d}{DP} \quad (2.11)$$

- Na Fig. 2.17 a curva de linha cheia deve ser utilizada se  $\hat{S}_e$  coincidir ou estiver próximo dos níveis de tensão da Coluna I da Tabela 2.1.

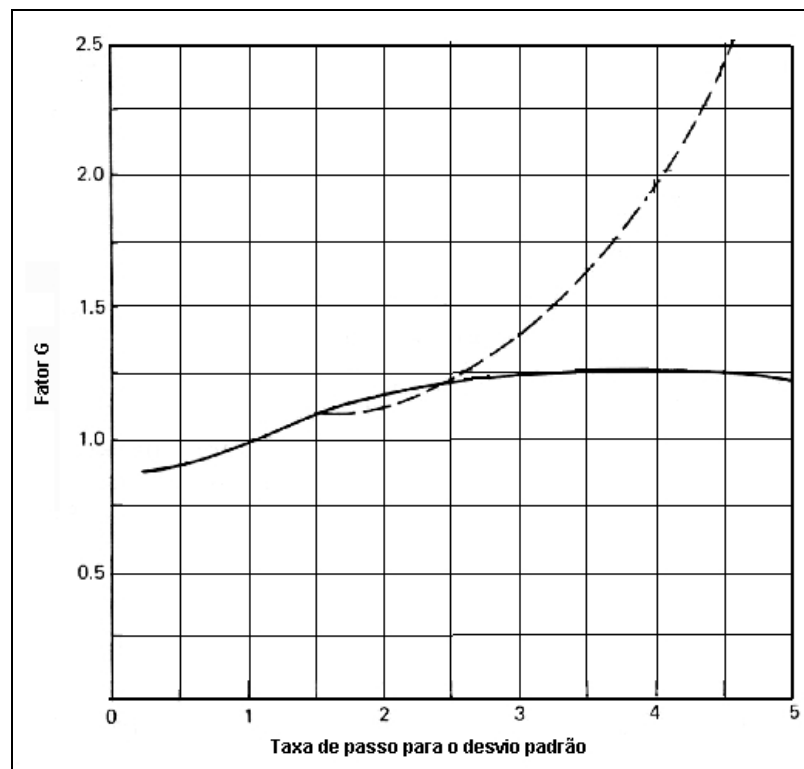


Figura 2.17 – Gráfico do Fator G “Limite de Confiança” em função de  $\frac{d}{DP}$

(Collins, 1993)

- A linha tracejada deve ser utilizada se  $\hat{S}_e$  estiver na metade do caminho entre dois passos da coluna I da Tab. 2.1.
- Se  $\hat{S}_e$  estiver fora dos níveis de tensão da coluna I, deve-se fazer uma interpolação entre as curvas tracejada e cheia da Fig. 2.17.

n) O intervalo de confiança é dado por:

$$C = \left[ \hat{S}_e - y_0 DP_e \leq \mu \leq \hat{S}_e + y_0 DP_e \right] = 100(1 - \alpha) \quad (2.12)$$

onde:

$\mu$  = média verdadeira do limite de resistência à fadiga,

$\alpha$  = nível de significância,

$y_0$  = região de rejeição da distribuição normal padrão, base na seleção de  $\alpha$ ,

$C$  = percentual de confiança do intervalo.

### 2.1.2.7 Método do Valor Extremo

Para este método são selecionados “n” corpos-de-prova que serão ensaiados em várias máquinas de fadiga iguais entre si, todas com o mesmo nível de tensão. Quando o primeiro corpo-de-prova do grupo falha, a tensão e o número de ciclos são anotados. Todas as máquinas são paradas e os corpos-de-prova são descartados.

Um segundo grupo de corpos-de-prova inicia o ensaio em um novo nível de tensão. Todas as máquinas são paradas assim que um corpo-de-prova falhe, descartando-se os demais e anotando-se a tensão e o número de ciclos até a falha. O procedimento prossegue para outros grupos e tensões até que se atinja um nível de tensão abaixo do Limite de Resistência à Fadiga.

O dados são traçados em um gráfico S-N e uma curva média é traçada através dos dados, como mostrado na Fig. 2.18. A curva da média dos pontos corresponde a probabilidade de sobrevivência dada por:

$$P = \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-13)$$

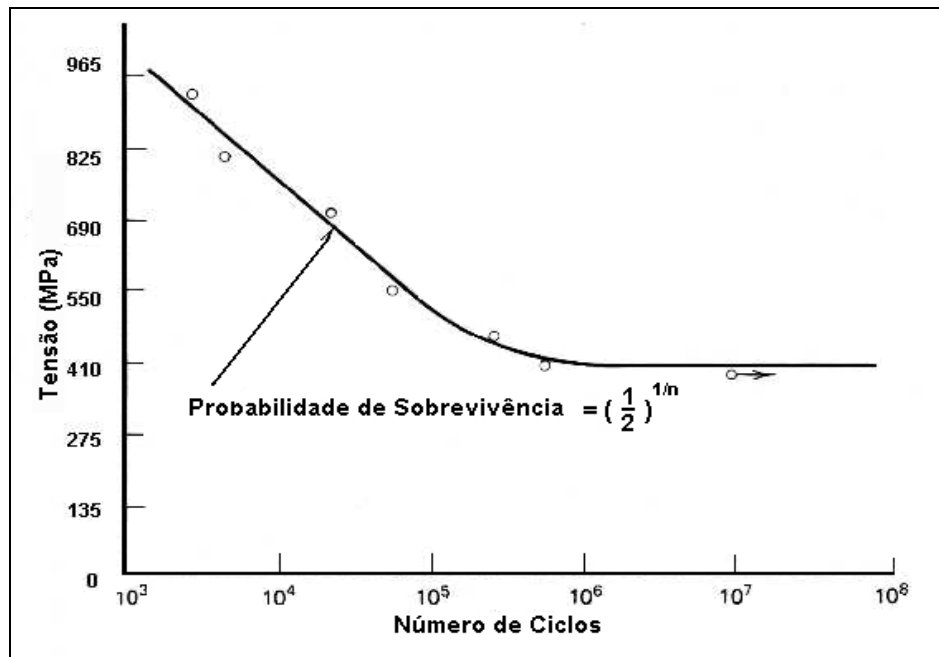


Figura 2.18 – Gráfico S-N para o ensaio do Valor Extremo (Collins, 1993)

### 2.1.2.8 Comparação Entre os Métodos

O Método Padrão pode ser usado como uma estimativa inicial da curva S-N e do Limite de Resistência à Fadiga para os demais métodos. Por usar poucos corpos-de-prova, não fornece um banco de dados suficiente para uma análise estatística que possa ser confiável.

O Método da Tensão Constante fornece dados suficientes para a construção eficiente das curvas S-N-P porém, devido a grande dispersão dos resultados para tensões próximas do Limite de Resistência à Fadiga, este método não é confiável neste ponto, devendo ser usado um outro método para se determinar com precisão o Limite de Resistência à Fadiga.

Este outro método pode ser o Método da Sobrevivência, o Método do Degrau, o Método Prot ou o Método "Up-And-Down". Na Fig. 2.19 é mostrado como seria traçado um gráfico usando dois métodos.

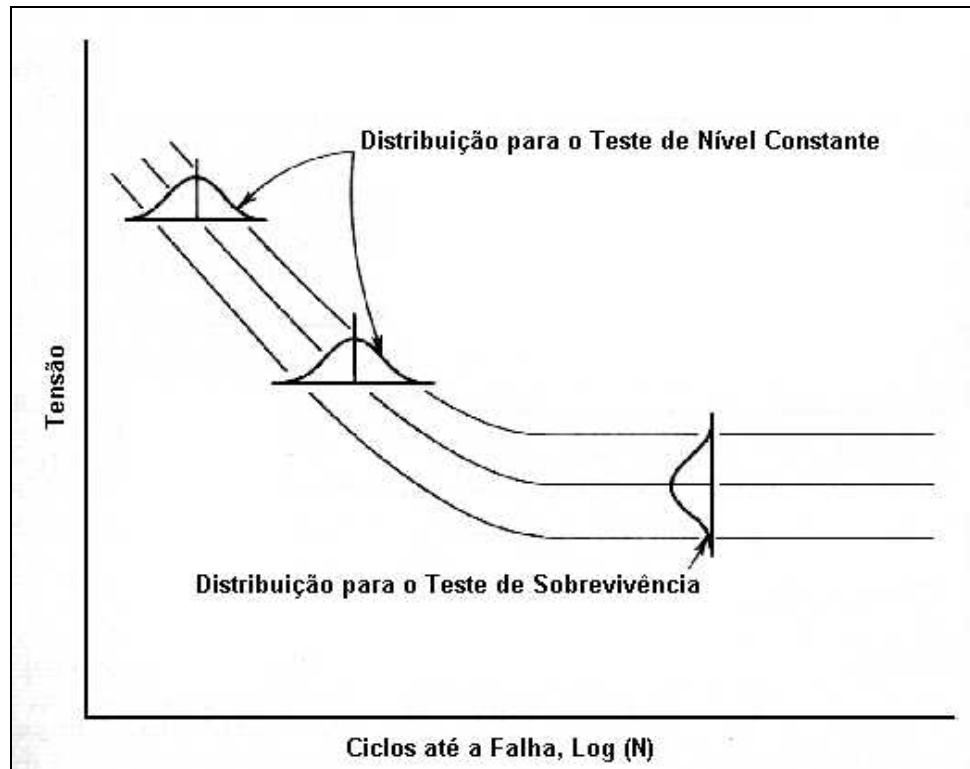


Figura 2.19 – Curvas S-N-P determinadas pelo Método da Tensão Constante e pelo Método da Sobrevivência (Collins, 1993)

Entre os métodos para a determinar o Limite de Resistência à Fadiga pode-se destacar o Método “Up-And-Down” que além de usar um número pequeno de corpos-de-prova permite uma análise da variância e da confiabilidade dos resultados. Devido a estas qualidades este método é bastante difundido.

O Método da Sobrevivência pode fornecer o Limite de Resistência à Fadiga e sua distribuição porém, o grande número de corpos-de-prova e tempo necessários podem torná-lo inviável no que se refere ao custo do ensaio.

Já o Método do Degrau, sendo uma variação do Método da Sobrevivência, reduz o número de corpos-de-prova, ao contrário do Método Prot que usa grande número de corpos-de-prova além de máquinas mais sofisticadas.

Assim, a escolha de um método que possa proporcionar bons resultados depende sobretudo dos objetivos que se pretende atingir.

No geral, pode-se sugerir o uso concomitante do Método da Tensão Constante para tensões altas e o Método “Up-And-Down” para a determinação do Limite de Resistência à Fadiga. (Collins, 1993).

### 2.1.3 Fadiga Controlada pela Deformação

O Método da Fadiga Controlada pela Deformação é usado quando as tensões cíclicas aplicadas são altas, tendo o material, em consequência, uma curta vida. Este método pode modelar melhor o comportamento mecânico do material, principalmente em locais críticos como nos entalhes (Collins,1993; Bannantime,1990; Goswami,1997).

Este método pode ser de grande importância para componentes que requerem grande confiabilidade e possuem entalhes e grande acúmulo de danos, ou mesmo que rodem poucos milhares de ciclos em sua vida útil.

Nas regiões de componentes próximas a estes entalhes pode ocorrer o aparecimento indesejado de altas tensões que ocasionam deformações plásticas no material. Esta região está envolvida por uma área de deformação elástica e é considerada controlada pela deformação. O objetivo deste método é prever o aparecimento de uma trinca nesta região baseado no conceito de tensão-deformação. Assume-se que um corpo-de-prova imaginário (Fig. 2.20) que atravessa a região de deformação plástica, possa simular danos de fadiga na origem do entalhe.

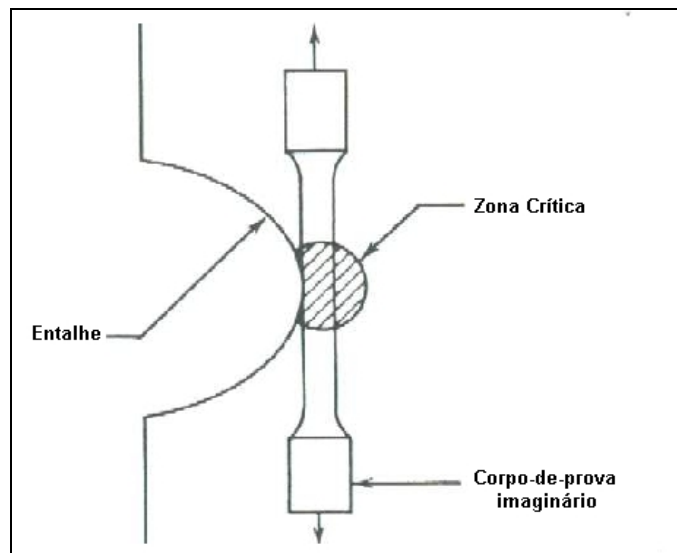


Figura 2.20 – Volume de material igualmente tensionado (Bannantine,1990)

### 2.1.3.1 Comportamento cíclico da tensão-deformação

As curvas cíclicas de tensão-deformação são usadas para analisar a durabilidade de componentes e estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos.

A resposta de um material sujeito a um carregamento plástico cíclico ocorre na forma de um “loop” de histerese, como mostrado na Fig. 2.21.

A largura total do “loop” é “ $\Delta\epsilon$ ” (variação total da deformação) e a altura total do “loop” é “ $\Delta\sigma$ ” (variação total de tensão). A deformação total é a soma das variações das deformações elásticas e plásticas, ou seja:

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (2.14)$$

Usando a Lei de Hooke para o termo elástico tem-se:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (2.15)$$

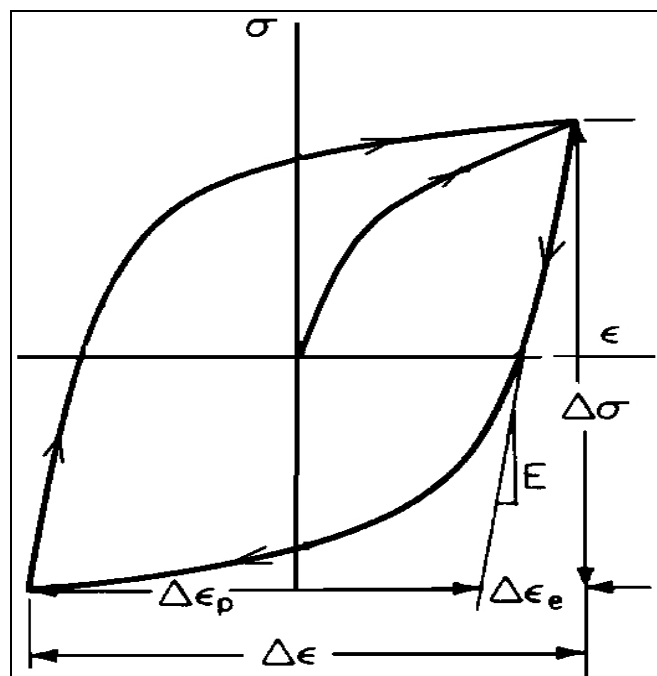


Figura 2.21 – “Loop” de Histerese (Bannantine,1990)

Nota-se que abaixo do carregamento de compressão, as deformações plásticas são desenvolvidas antes que a tensão de escoamento seja alcançada.

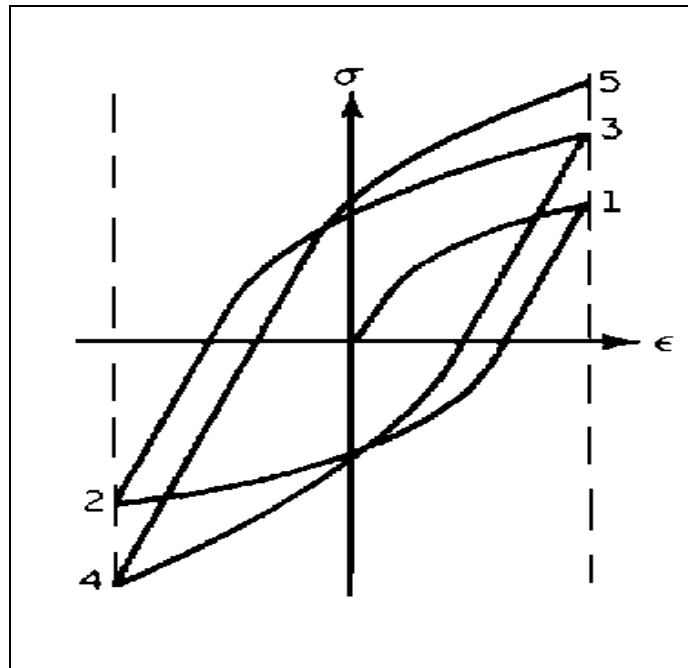


Figura 2.22 – Endurecimento Cíclico (Bannantine, 1990)

Ao sofrer carregamentos cíclicos um metal pode:

- Endurecer ciclicamente;
- Amolecer ciclicamente;
- Ser ciclicamente estável; ou
- Ter um comportamento misto (dependendo da variação da deformação).

É mostrado na Fig. 2.22 um “loop” de histerese para os dois primeiros ciclos do endurecimento cíclico, onde a tensão máxima obtida aumenta a cada ciclo de deformação. Quando ocorre o contrário, a tensão máxima decresce a cada ciclo de deformação, ocorrendo o amolecimento cíclico mostrado na Fig. 2.23.

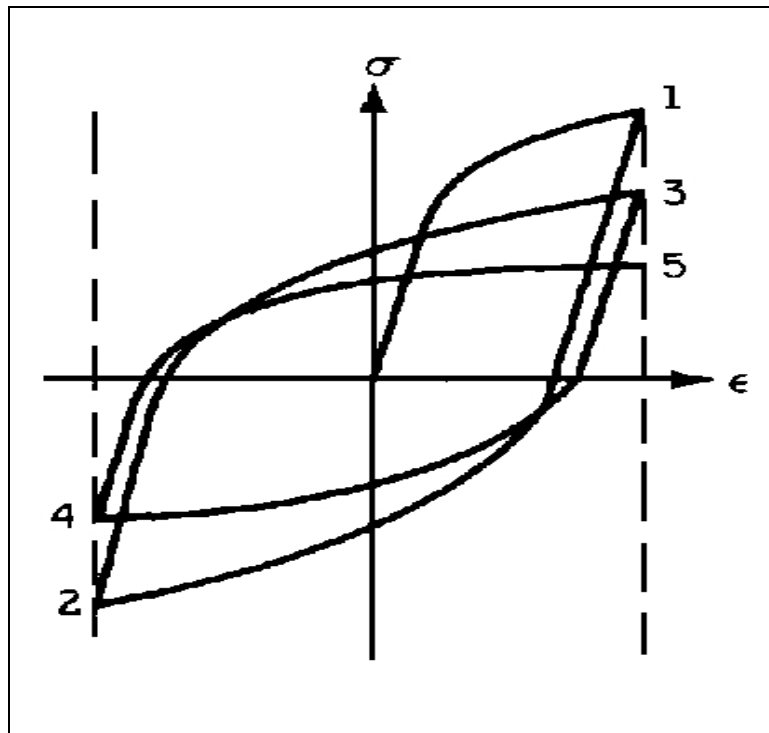


Figura 2.23 – Amolecimento Cíclico (Bannantine, 1990)

Manson e Hirschberg (1964) observaram que a razão entre a tensão de ruptura e a tensão de escoamento pode ser usada para prever se o material endurecerá ou amolecerá.

Se  $\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{esc}} > 1,4$  O material terá endurecimento cíclico

Se  $\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{esc}} < 1,2$  O material terá amolecimento cíclico

### 2.1.3.2 Determinação da curva de tensão-deformação

As curvas de tensão-deformação podem ser obtidas através de ensaio por diversos métodos. Dois destes são (Collins, 1993):

- Simples associação. Os “loops” de histerese estáveis são sobrepostos e suas extremidades são conectadas como mostrado na Fig. 2.24. Este método consome tempo e requer muitas amostras.

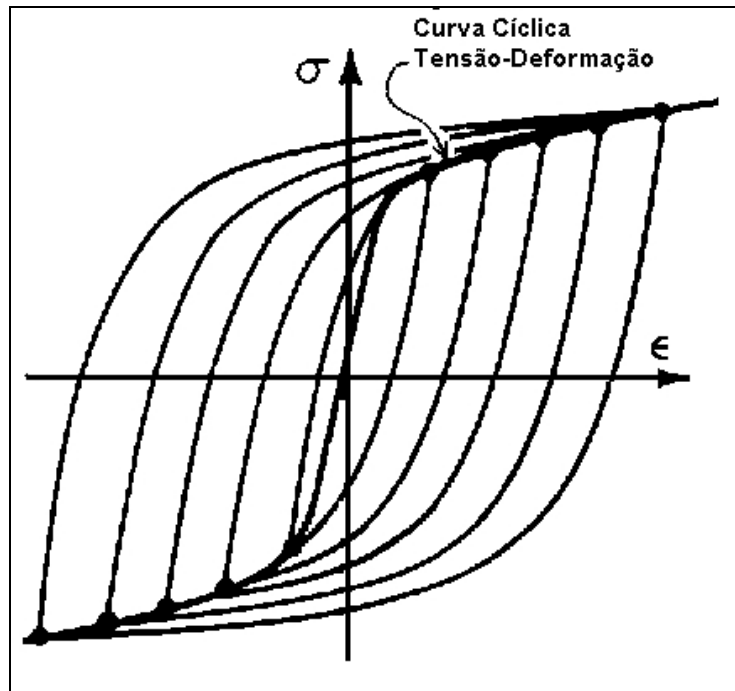


Figura 2.24 – Curva cíclica de tensão-deformação obtida conectando as extremidades dos loops de histerese estabilizados (Bannantine, 1990)

- Ensaio do passo incremental. Este método tem se tornado largamente aceito, pois é muito rápido e produz bons resultados. Uma amostra é sujeita a uma série de blocos de amplitude de deformação gradualmente crescente e decrescente. Depois de alguns blocos o material estabiliza.

Segundo Massing (1926), o “loop” de histerese estabilizado pode ser estimado dobrando-se a curva cíclica de tensão-deformação para um material que exhibe comportamento simétrico em tração e em compressão. Portanto, a equação do “loop” de histerese pode ser derivada da equação da curva cíclica usando esta hipótese. A equação da curva geral de histerese é dada por:

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (2.16)$$

onde:

$\Delta \epsilon$  = amplitude de deformação plástica ciclicamente estável

$\Delta \sigma$  = amplitude de tensão ciclicamente estável

$K'$  = coeficiente de resistência cíclica

$n'$  = expoente de endurecimento da deformação cíclica

### 2.1.3.3 Curva da vida da deformação

A Equação 2.17 é a base do método de análise de fadiga com relação à deformação.

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f) \quad (2.17)$$

Lembrando que a relação elástica e plástica são linhas retas quando traçadas sob um gráfico log-log, a amplitude de deformação total, “ $\Delta\epsilon/2$ ”, pode ser traçada simplesmente pela soma dos valores elástico e plástico como mostrado na Fig. 2.25. Em grandes amplitudes de deformação a curva da vida relacionada à deformação aproxima-se da linha plástica, e em amplitudes baixas a curva se aproxima da linha elástica.

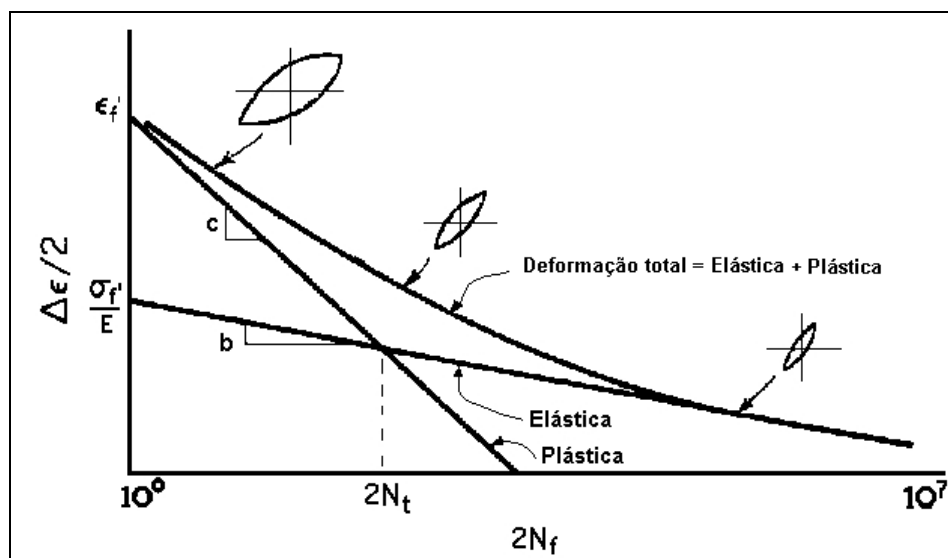


Figura 2.25 – Curva de vida x deformação ( log – log )  
(Bannantine,1990)

A vida de transição, “ $2N_f$ ”, representa a vida na qual as curvas elástica e plástica se interceptam. Uma representação esquemática da forma do “loop” de histerese pode ser vista na Fig. 2.25; em vidas curtas está presente maior deformação plástica e o “loop” é mais longo. Em vidas longas, o “loop” é mais estreito, representando menor deformação plástica.

Da Fig. 2.25 tem-se:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (2.18)$$

$$2N_t = \left( \frac{\epsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{1/(b-c)} \quad (2.19)$$

#### 2.1.3.4 Efeitos da Tensão Média

O efeito da deformação média pode ser desprezada na vida de um componente. Ao contrário, as tensões médias podem ter um efeito significativo sobre a vida do componente. Este efeito é predominante em longas vidas, onde pode aumentar a vida quando atua uma carga média compressiva ou diminuir a vida quando atua uma carga média de tração, como mostrado na Fig. 2.26 (Gong e Norton, 1996).

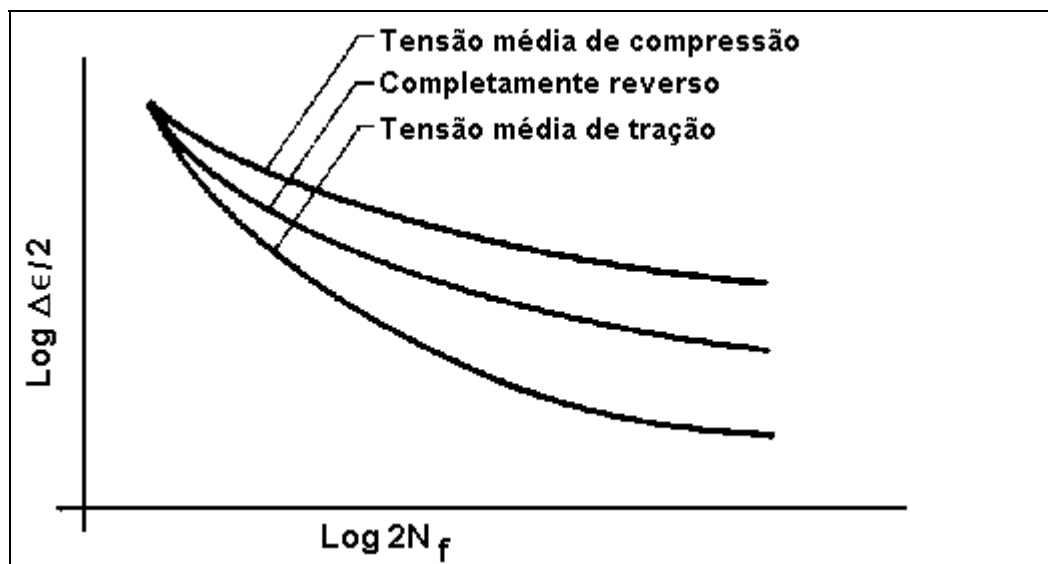


Figura 2.26 – Efeito da tensão média sobre a curva da vida em relação à deformação (Bannantine, 1990)

Algumas modificações na equação da vida pela deformação têm sido feitas para avaliar os efeitos da tensão média. Manson e Halford (1981) modificaram

os termos elástico e plástico da equação da vida pela tensão afim de manter a independência da razão de deformação elástica-plástica da tensão média.

A Equação 2.20 é mostrada graficamente na Fig. 2.27. Esta equação tende a prognosticar o efeito da tensão média em vidas curtas ou, onde a deformação plástica domina. Nota-se que em altas deformações plásticas, ocorre o relaxamento da tensão média.

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f \left( \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{\sigma_m} \right)^{c/b} (2N_f)^c \quad (2.20)$$

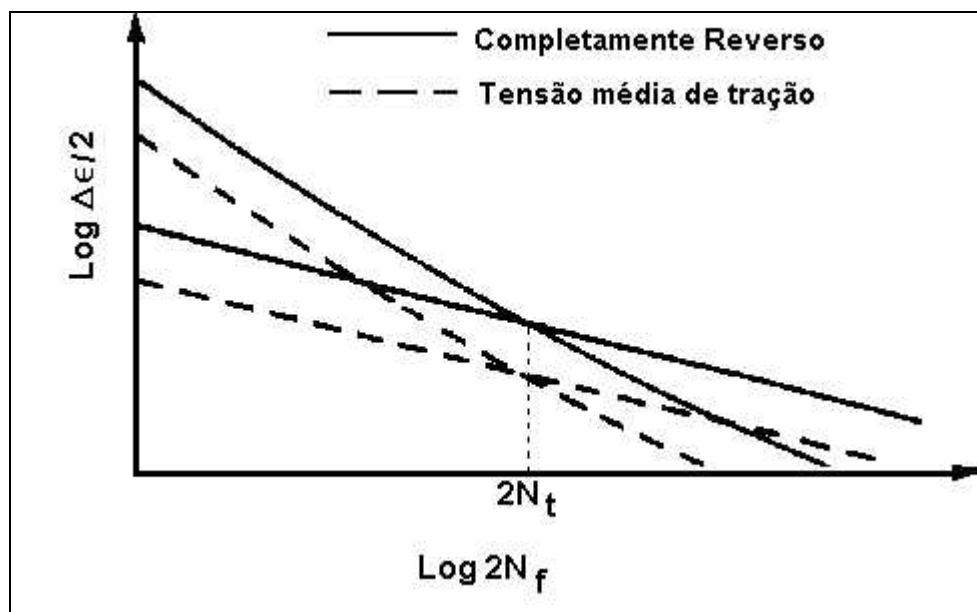


Figura 2.27 – Correção da tensão média para a independência da razão de deformação elástica/plástica (Bannantine, 1990)

#### 2.1.4 Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga

A partir das estimativas de iniciação de trinca do método da fadiga controlada pela deformação, o método da mecânica da fratura tem a função de estimar o tempo de propagação da trinca até a ocorrência da falha. Assim, a vida total do componente pode ser calculada como:

$$N_f = N_i + N_p \quad (2.21)$$

onde: “ $N_f$ ” é a vida total até a falha, “ $N_i$ ” o número de ciclos até a iniciação da trinca e “ $N_p$ ” o número de ciclos necessários da propagação até a falha (Collins, 1993). É mostrada na Fig. 2.28 a distinção entre a iniciação e a propagação da trinca devido à fadiga em um componente.

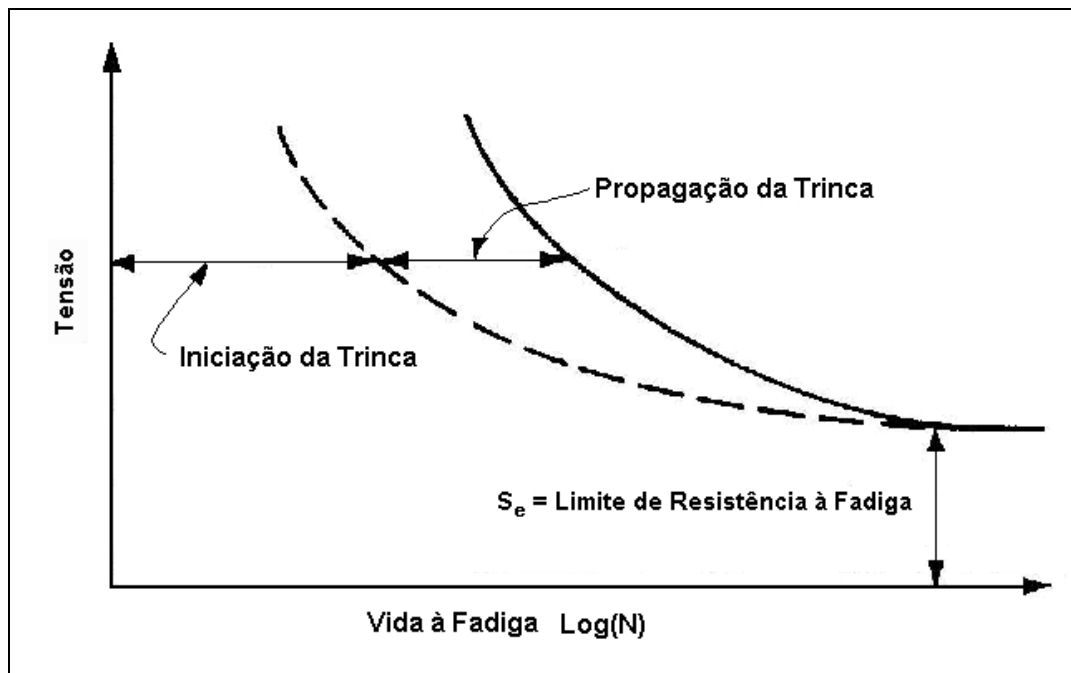


Figura 2.28 – Iniciação e Propagação de trincas (Bannantine,1990)

A distinção entre a vida de iniciação e a vida de propagação é importante. Em tensões baixas podem ser feitos exames de iniciação de trinca até 90% da vida do componente porém, em tensões altas, a maior parte da vida do componente é usada para propagar a trinca.

As aproximações da mecânica da fratura requerem que um tamanho inicial de trinca seja estimado. Para componentes com imperfeições ou defeitos (tais como, porosidades de solda, inclusões, etc.) o tamanho da imperfeição é tomado como trinca inicial. Quando não se tem defeitos no material, as aproximações da mecânica da fratura podem ser usadas para determinar a propagação. Pode-se assim garantir uma extensão de vida ao componente com ilustrado na Fig. 2.29.

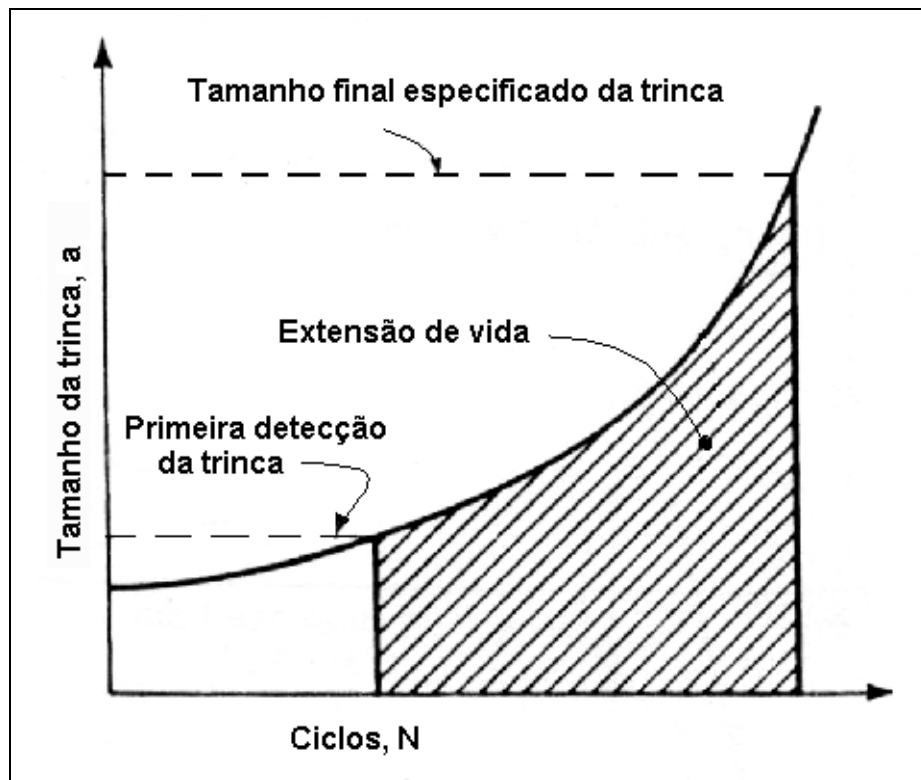


Figura 2.29 – Extensão de vida de um componente trincado (Bannantine, 1990)

Assim, um componente é projetado de modo que uma trinca não atinja o tamanho crítico entre intervalos especificados de inspeção, aumentando sua vida útil.

Curvas de crescimento de trincas mostram que, a maior parte da vida do componente é gasta enquanto a trinca não atingiu um comprimento relativamente grande. A curva de propagação de trinca é mostrada na Fig. 2.30 e dividida em três regiões.

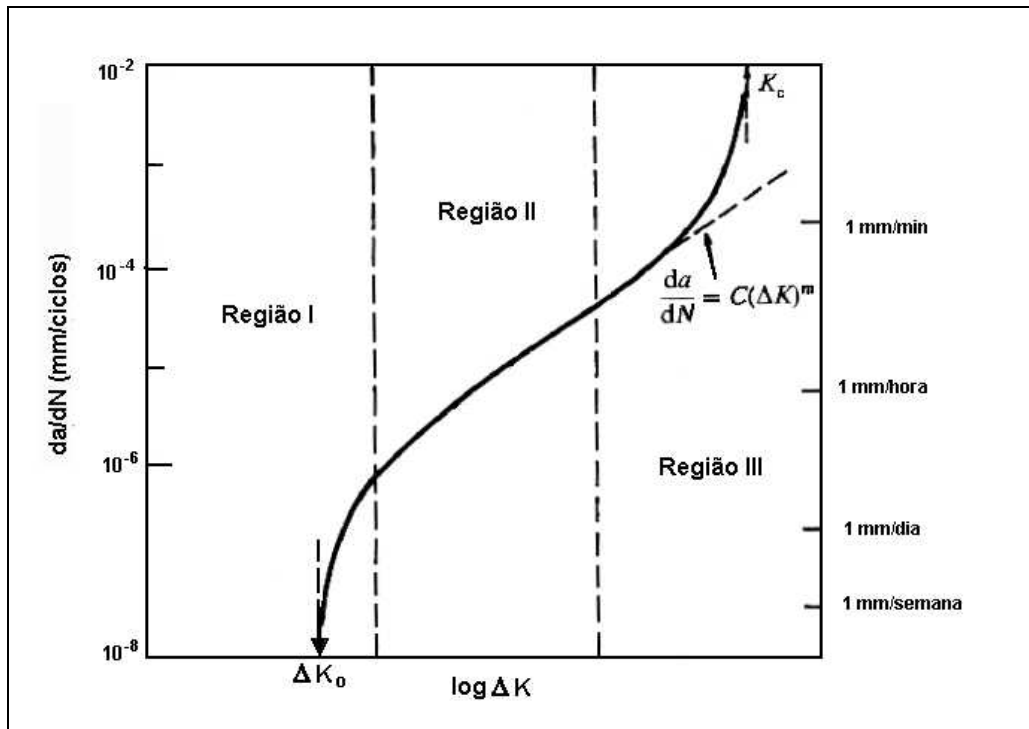


Figura 2.30 – Três regiões da Curva de Crescimento de Trinca (Suresh, 1998)

Em situação de baixas tensões, na região I, o comportamento da trinca é associado à nucleação da trinca, onde se tem uma taxa de crescimento muito lenta. Abaixo do valor do fator de intensidade da tensão no ponto inicial, " $\Delta K_0$ ", o crescimento de trincas não ocorre ou ocorre com uma taxa de propagação muito pequena. O ponto inicial da propagação depende também da frequência do carregamento e do meio-ambiente. Projetar um componente de tal modo que " $\Delta K$ " de serviço seja mais baixo que " $\Delta K_0$ " não é aconselhável, pois na prática isso iria requerer tensões de operação muito baixas.

Na região II, a curva é essencialmente linear e a maioria das aplicações atuais dos conceitos de crescimento de trinca estão associados a esta região. Muitos ajustes a esta região foram sugeridos. A equação de Paris é a mais aceita (Bannantines et al., 1990):

$$\frac{da}{dN} = C * (\Delta K)^{m*} \quad (2.22)$$

onde: " $C^*$ " e " $m^*$ " são constantes do material e " $\Delta K$ " é a faixa do fator de intensidade de tensão.

Na região III, o crescimento da trinca é rápido e instável. Em situações práticas esta região pode ser ignorada porque não afeta significativamente a vida da propagação da trinca. O ponto de transição da região II para a região III depende da tensão de escoamento do material, do fator de intensidade de tensão e da taxa da tensão. A Equação 2.23 modela o comportamento da região III:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C * (\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (2.23)$$

onde  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ . A região III é de maior interesse quando a vida de propagação da trinca está na ordem de  $10^3$  ciclos ou menos. Em tensões elevadas os efeitos da plasticidade começam a influenciar a taxa de propagação de trinca porque o tamanho da zona plasticamente afetada se torna grande comparado às dimensões da trinca. Neste caso, o problema deve ser analisado pelas teorias da mecânica da fratura elasto/plástica.

### 2.1.5 Comparação entre os Métodos

A melhor escolha entre os três métodos apresentados, Fadiga Controlada pela Tensão, Fadiga Controlada pela Deformação e Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga, vem da análise dos pontos fortes e fracos de cada um destes métodos e do tipo de problema a se resolver. Fatores como economia, precisão, desenvolvimento de novos produtos para indústria, desenvolvimento de pesquisa devem ser levados em consideração na escolha do método.

Com relação ao método da Fadiga Controlada pela Tensão, pode-se afirmar que a análise de constantes dos materiais necessárias são bastantes simples. Isto permite estimativas rápidas e razoáveis de vida, envolvendo vida longa de componentes com histórico de cargas constantes, levando-se em conta fatores como acabamento superficial, configuração da carga, ambiente, etc.

Porém, há desvantagens, como o empirismo com relação aos outros métodos, a não consideração da deformação plástica, que são críticas em vidas curtas, e a não distinção entre iniciação e propagação da trinca. Este método é bem empregado para estimativas iniciais de vida, ou em aplicações onde a amplitude do carregamento é constante (Collins, 1993; Bannantine et al., 1990).

As vantagens do método da Fadiga Controlada pela Deformação é o modelamento preciso da iniciação da trinca, podendo ser usado onde a vida é curta e o carregamento é alto. Outra vantagem deste método é levar em consideração o efeito do histórico de cargas, ou seja, o acúmulo de danos em carregamentos variáveis. O uso deste método em peças de geometria complexa e ambientes de alta temperatura é recomendável (Collins,1993).

O uso de uma análise mais complexa, a não estimativa de propagação de trincas, alguns aspectos empíricos e a necessidade de se manter constante as condições dos corpos-de-prova ensaiados são as desvantagens deste método.

A grande vantagem do método da Mecânica da Fratura aplicada à Fadiga é ser o único método que prevê a propagação da trinca, podendo com isso prever uma sobrecarga segura em componentes trincados ou também prever o desenvolvimento de trincas devido a sobrecargas.

As desvantagens são a não previsão do início da trinca, a difícil modelagem em circunstâncias de altos carregamentos com campos de deformação plástica próximos a entalhes e a difícil estimativa dos fatores de intensidade de tensão em componentes de geometria complexa.

Concluindo, o melhor método depende da situação geral do projeto. A utilização de dois métodos simultâneos pode dar mais confiabilidade aos resultados pois cada técnica tem suas próprias vantagens e limitações. A escolha deve ser baseada no material, no histórico de carga, no ambiente de serviço, na geometria do componente e nas conseqüências de uma eventual falha deste componente (Bannantine,1990).

## **2.2 Teorias de Acúmulo de Danos**

A vida útil de um componente, onde a fadiga é uma modalidade de falha importante, pode ser alterada devido às variações ocorridas no espectro de carregamento. Como as curvas S-N são desenvolvidas e traçadas para uma amplitude de tensão constante de operação, estas curvas tornam-se sem aplicação quando as tensões ocorrem em amplitudes variáveis (Collins,1993).

Nota-se que danos impostos a componentes durante a operação são permanentes, cumulativos e, em geral, o alívio das cargas que produzem fadiga não leva à recuperação do estado original do material (Collins,1993).

Quando o dano acumulado total alcança um valor crítico, a falha por fadiga ocorre, sendo que este dano, se causado por operação em diversas tensões e amplitudes diferente, é o resultado da soma dos incrementos de danos ocorridos em cada nível individual de tensão (Suresh,1998).

Consequentemente, para uma estimativa correta da vida útil de um componente, torna-se importante o uso das teorias de acúmulo de danos, verificadas através de experimentos, tendo como base as curvas do S-N de amplitudes constante que estão mais disponíveis.

O objetivo das teorias apresentadas a seguir é prever corretamente a falha sob determinado espectro de carregamento, através da adição de incrementos de danos. Basicamente, são apresentadas a teoria linear e as teorias não lineares de acúmulo de danos.

### 2.2.1 Teoria Linear do Dano

A primeira Teoria de acúmulo de danos foi proposta por Palmgren e mais tarde desenvolvida por Miner (1945). Esta teoria linear, que é ainda usada extensamente, é referida como a Hipótese de Palmgren-Miner ou a Regra Linear dos Danos. A teoria pode ser descrita usando o gráfico S-N mostrado na Fig. 2.31.

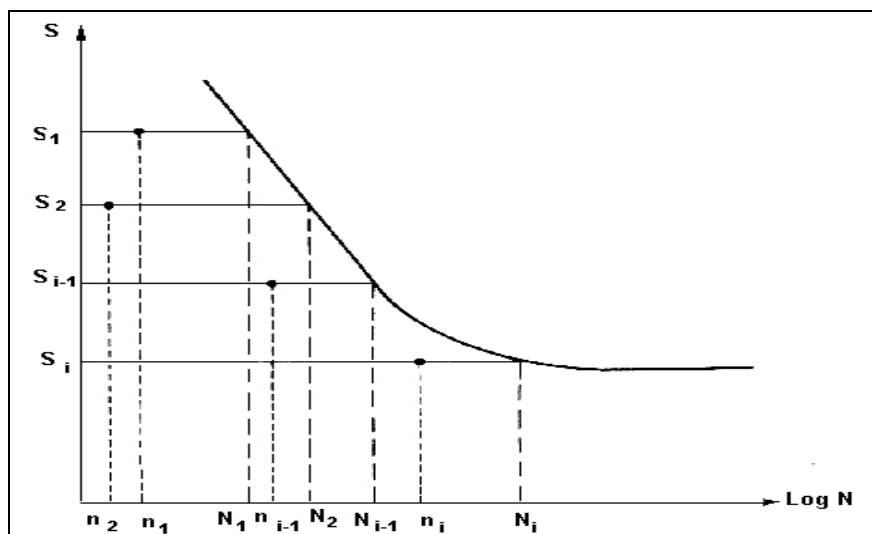


Figura 2.31 - Gráfico S-N demonstrando a Teoria Linear de Acúmulo de Danos (Collins,1993)

Pela definição da curva S-N, a operação em uma tensão constante “ $S_1$ ” pode produzir a falha em “ $N_1$ ” ciclos. Esta mesma operação em uma tensão “ $S_1$ ”, para um número de ciclos “ $n_1$ ”, (menor do que “ $N_1$ ”), irá produzir uma pequena fração de dano, chamado de “ $D_1$ ” ou dano parcial ou fração do dano total. Quando a soma dos danos “ $D_i$ ” atinge uma unidade, a falha é iminente de ocorrer:

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i+1} + D_i \geq 1 \quad (2.24)$$

ou

$$\sum_{j=1}^i \frac{n_j}{N_j} \geq 1 \quad (2.25)$$

onde:  $D_i = n_i/N_i$  .

O uso desta regra é bastante difundido devido a sua simplicidade. Entretanto, ela pode apresentar erros na previsão da falha. Um destes erros mais significativos é o fato de não levar em conta nenhuma influência na ordem de aplicação de vários níveis de tensão, supondo que os danos venham a se acumular na mesma taxa em um mesmo nível de tensão, sem considerar o histórico passado. Valores experimentais para a soma de Miner até a falha estão na faixa de aproximadamente 0,25 até aproximadamente 4, dependendo do tipo de decréscimo e de acréscimo das amplitudes cíclicas de tensão usadas. Se as várias amplitudes de tensões são misturadas de uma maneira quasi-aleatória, a unidade que mais se aproxima da soma de Miner para a falha, é de aproximadamente 0,6 a 1,6. Como muitas aplicações de tensões em serviço envolvem tensões flutuantes quasi-aleatórias, o uso do Regra Linear dos Danos de Palmgren-Miner é freqüentemente satisfatório para a previsão da falha.

Resultados em corpos-de-prova mostram valores experimentais de  $\Sigma(n_i/N_i)$  maiores do que a unidade para a amplitude crescente de tensão e valores menores que a unidade para amplitudes decrescentes de tensão. Resultados observados de ensaios com componentes e estruturas têm mostrado que a amplitude crescente de tensão resulta em danos mais sérios do que os

mesmos blocos do ciclo da amplitude de tensão na seqüência decrescente. Estes resultados não foram explicados adequadamente, mas relacionam-se indubitavelmente às tensões residuais introduzidas no componente e às estruturas, em virtude de concentrações de tensões nas descontinuidades estruturais. As tensões altas aplicadas e aliviadas inicialmente, resultam em um campo de tensões residuais compressivas nas regiões de concentrações de tensões. Já a aplicação mais tardia destas tensões produzem um nível mais baixo de danos.

As teorias não lineares de acúmulo de danos foram desenvolvidas com o objetivo de corrigir os defeitos da Teoria Linear do Dano. Entretanto, estas teorias têm alguns problemas de ordem prática para sua aplicação em experimentos, como requerer propriedades mecânicas iguais entre os corpos-de-prova, e exigir grande quantidade de ensaios e cálculos complicados.

É ilustrada na Fig. 2.32 a Teoria Linear de Danos através da linha reta traçada com fração “D” dos danos em função da taxa de ciclo “n/N”. As curvas 1 e 3 são baseadas em resultados experimentais, mostrando que os danos de fadiga acumulam-se freqüentemente não-linearmente.

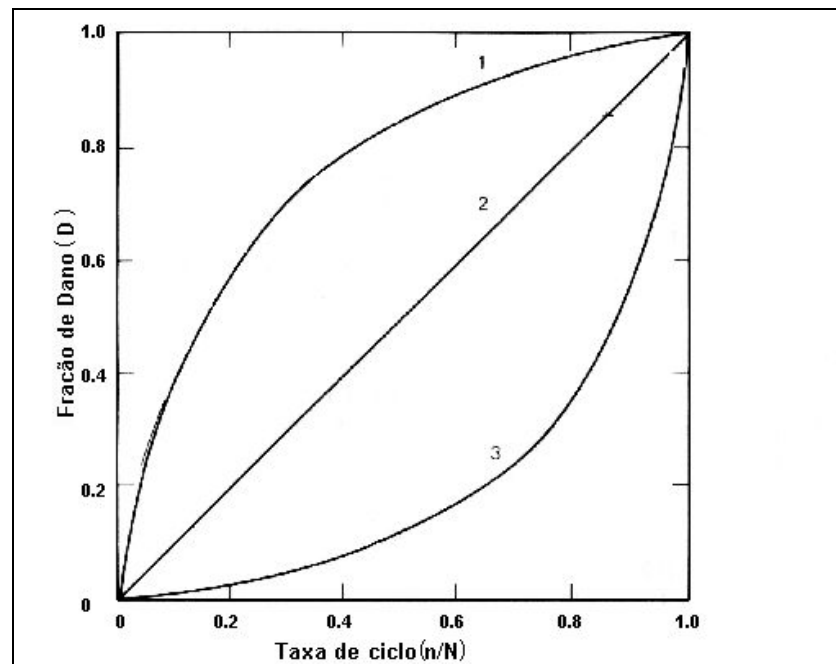


Figura 2.32 – Dano por fadiga em função da taxa de ciclo (Collins.1993]

Dados experimentais indicam que as curvas de baixo correspondem à baixos níveis de tensão. Diversas teorias foram propostas para aproximar o relacionamento não-linear entre os danos e taxa de ciclos.

### 2.2.2 Teoria de Acúmulos de Danos de Marco-Starkey

Uma das primeiras teorias não lineares de acúmulo de dano foi proposta por Marco e Starkey (1954). A teoria de Marco-Starkey é baseada nos seguintes pontos:

- As curvas de danos para cada nível de amplitude da tensão senoidal totalmente reversa podem ser definidas pela relação:

$$D = \left( \frac{n}{N} \right)^{m_i} \quad (2.26)$$

onde: “ $m_i$ ” é uma função do nível da tensão.

- Uma amostra sujeita à seqüências de tensões senoidais totalmente reversas falhará quando “D” alcançar a unidade.
- A falha, ou 100 % de danos, será alcançada quando “ $\sum \left( \frac{n}{N} \right)^{m_i}$ ” alcançar um valor crítico.

A curva de dano  $\sigma_3$  na Fig. 2.33 representa o progresso do dano por fadiga em um corpo-de-prova com baixa tensão aplicada. Já a curva de dano  $\sigma_1$  representa o progresso do dano para uma alta tensão aplicada (Marco e Starkey, 1954).

Para operações com a tensão  $\sigma_1$  seguida da tensão  $\sigma_3$  (seqüência 1), a somatória do dano é menor que a unidade. Já para as operações com  $\sigma_3$  seguida de  $\sigma_1$  (seqüência 2), a somatória do dano é maior que a unidade. Isto está de acordo com resultados experimentais obtidos em ensaios em laboratório.

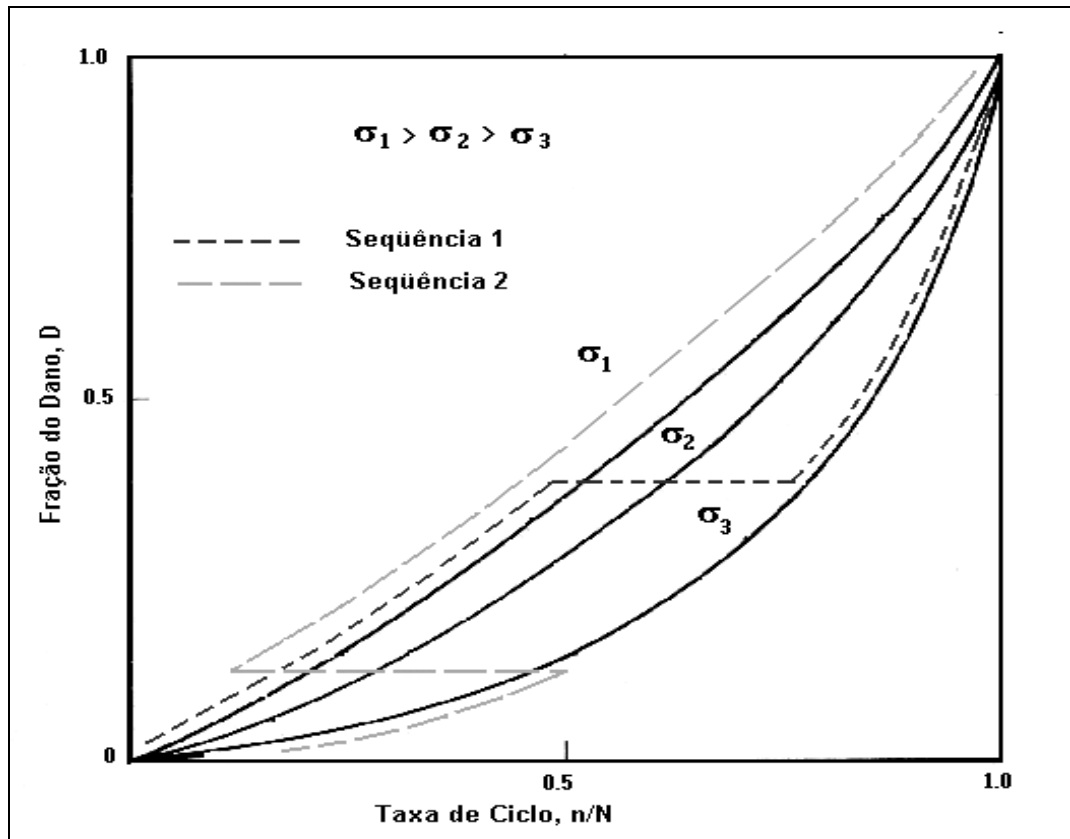


Figura 2.33 – Histórico do dano traçado sobre diferentes tensões  
(Marco e Starkey, 1954)

### 2.2.3 Teoria De Acúmulos de Danos de Henry

A teoria cumulativa dos danos proposta por Henry (1955) é baseada no conceito de que a curva S-N é deslocada com a aplicação do dano por fadiga. Pode-se relacionar uma certa redução do Limite de Resistência à Fadiga a um grau de dano aplicado. Assim, o acúmulo de danos pode ser definido como a taxa de redução do Limite de Resistência à Fadiga de um material virgem. O dano pode ser determinado através da equação relacionada como segue:

$$D = \frac{E_0 - E_A}{E_0} \quad (2.27)$$

onde:

D= dano

Eo= Limite de Resistência à Fadiga original

$E_A$  = Limite de Resistência à Fadiga após o dano

Resolvendo am Eq. 2.27 para “ $E_A$ ”, tem-se:

$$E_A = \frac{S \left(1 - \frac{n}{N}\right)}{\left(\frac{S - E_o}{E_o}\right) + \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad (2.28)$$

Substituindo a Eq. 2.27 na Eq. 2.28 tem-se:

$$D = \frac{\left(\frac{n}{N}\right)}{1 + \left(\frac{E_o}{S - E_o}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad (2.29)$$

onde:

$n$  = número de ciclos aplicados a tensão de amplitude  $S$

$S$  = tensão cíclica aplicada

Ao se estender esta teoria para uma seqüência de níveis diferentes de tensões, na ordem seqüencial em que são aplicadas, o valor de “ $E$ ” deve ser atualizado depois de cada aplicação de amplitude de tensão. Assim, uma seqüência dos valores para o Limite de Resistência à Fadiga é obtida, ( $E_o$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ , etc.). Tal procedimento permite que se estime o menor limite de fadiga com danos crescentes (Henry, 1955).

#### 2.2.4 Teoria de Acúmulo de Danos de Gatts

Algo similar existe entre a teoria de acúmulo de danos postulada por Gatts (1961) e o que está descrito na Teoria de Henry. Gatts, entretanto, diz que a força da fadiga e o limite da fadiga mudam continuamente com a aplicação de ciclos de tensão, e que a mudança é proporcional a alguma função da amplitude da tensão. Assim, a equação para a curva S-N era estabelecida como:

$$kN = \frac{1}{S - S_{e0}} - \frac{1}{S(1 - C)} \quad (2.30)$$

Onde:

$S_{eo}$  = limite de fadiga inicial, quando  $n=0$

$S_e^*$  = limite de fadiga em função do histórico de tensão cíclica, não constante

$S$  = tensão cíclica aplicada

$N$  = número de ciclos aplicado

$C$  = constante do material

$k$  = constante do material

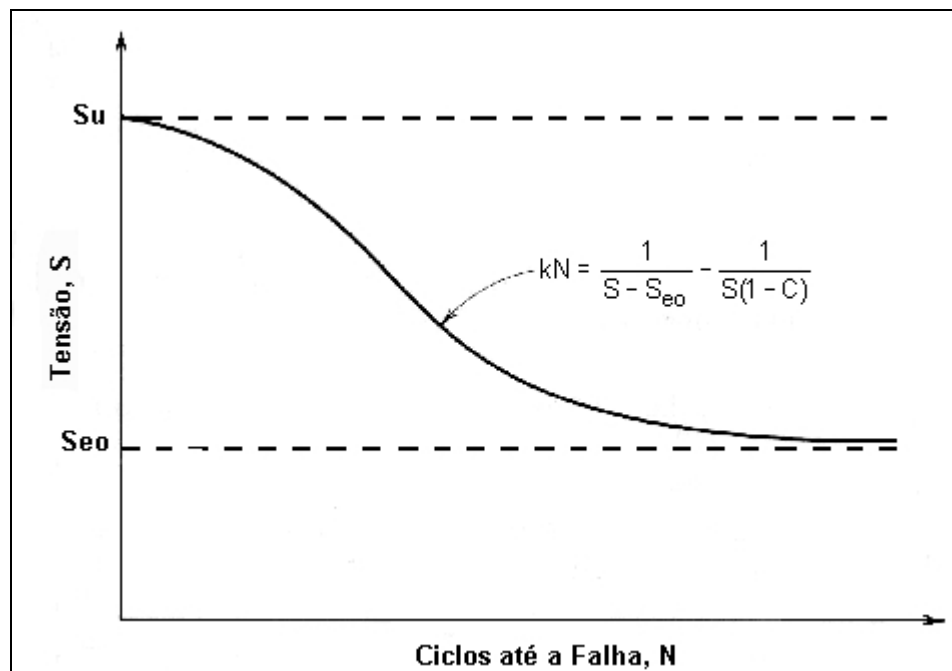


Figura 2.34 – Aproximação da Curva S-N proposta por Gatts (1961)

Esta equação está de acordo com a forma estabelecida experimentalmente pela maioria de curvas S-N (Fig. 2.34). A etapa seguinte da teoria de Gatts consiste em desenvolver uma versão normalizada da curva S-N. Assim, algumas definições foram estabelecidas:

$$\gamma_s = \frac{S}{S_{eo}} = \text{taxa de amplitude de tensão}$$

$$\beta = \frac{n}{N} = \text{taxa de ciclo}$$

$$\gamma_e = \frac{S_e}{S_{eo}} = \text{taxa de limite à fadiga}$$

Pode-se reescrever a Eq. 2.30 com “K = kS<sub>e</sub>” como:

$$kN = \frac{1}{\gamma_s - 1} - \frac{1}{\gamma_s(1 - C)} \quad (2.31)$$

Finalmente, a expressão para Acúmulo de Danos proposta por Gatts é escrita usando-se as definições anteriores :

$$\gamma_e = \gamma_s \left[ 1 - \frac{1}{\frac{\beta}{1 - C} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} (1 - \beta)} \right] \quad (2.32)$$

Comparando esta expressão de acúmulo de danos de Gatts e a equação de acúmulo de danos de Henry nota-se que são muito similares.

### 2.2.5 Teoria de Acúmulo de Danos de Corten-Dolan

A Teoria de Acúmulo de Danos de Corten e Dolan (1956) é baseada em seis suposições:

- Um período de nucleação (possivelmente um número pequeno de ciclos) pode ser requerido para iniciar os danos permanentes da fadiga.
- O número de núcleos de danos que se formaram no material aumenta quando a tensão aumenta.
- Os danos se propagam com uma taxa crescente de ciclos.
- A taxa de danos por ciclo aumenta com a tensão aplicada.
- Os danos totais que constituem a falha em um material são constantes para todos os históricos de carregamento que poderiam ser aplicados.

- Os danos continuam a ser propagados mesmo em níveis de tensões abaixo das quais não se inicia o dano.

Como simplificação, toma-se o início do período de nucleação com “ $N^* = 0$ ” onde, “ $N^*$ ” é o número de ciclos na tensão “ $S$ ” necessários para nuclear um dano. A relação seguinte relaciona danos nucleados e ciclos aplicados:

$$D = mD' = mr_a N^a \quad (2.33)$$

onde:

$D$  = dano de fadiga total

$m$  = número de danos nucleados

$D'$  = Dano por núcleo

$r_a$  = Taxa de propagação de danos

$N$  = número de ciclos

$a$  = expoente de propagação de danos

Supondo um ensaio com dois níveis de tensões cíclicas distintas, “ $S_1$ ” e “ $S_2$ ” aplicadas em blocos, estas tensões podem ser representadas através da linha entre as curvas “ $S_1$ ” e “ $S_2$ ”, como mostrado na Fig. 2.35.

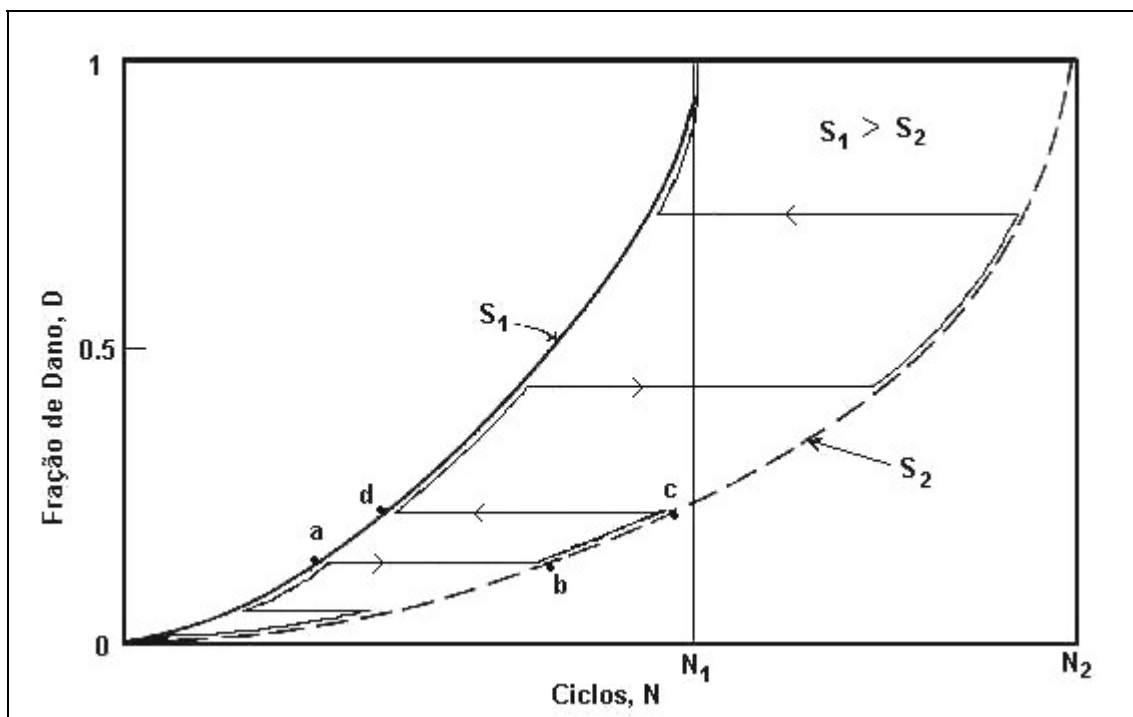


Figura 2.35 – Gráfico Dano x Ciclos para duas diferentes tensões  
(Collins, 1993)

Usando os conceitos de Corten e Dolan, chega-se a uma expressão para estimar o número dos ciclos até a falha, para blocos repetidos com vários níveis de tensão:

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right)\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{d^*} + \left(\frac{n_3}{N_1}\right)\left(\frac{S_3}{S_1}\right)^{d^*} + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right)\left(\frac{S_i}{S_1}\right)^{d^*} = 1 \quad (2.34)$$

onde:  $d^*$  = constante do material.

### 2.2.6 Teoria de Acúmulo de Danos de Marin

A Teoria de Acúmulo de Danos de Marin (1962) considera as relações entre os danos como função da taxa de ciclos e a mudança na curva S-N provocada pelo acúmulo de danos. São apresentadas na Fig. 2.36 as curvas experimentais obtidas em diferentes níveis de tensão ( $S_i$ ). Para cada dano “D”, corresponde uma linha horizontal de dano constante que determina um ponto em cada curva.

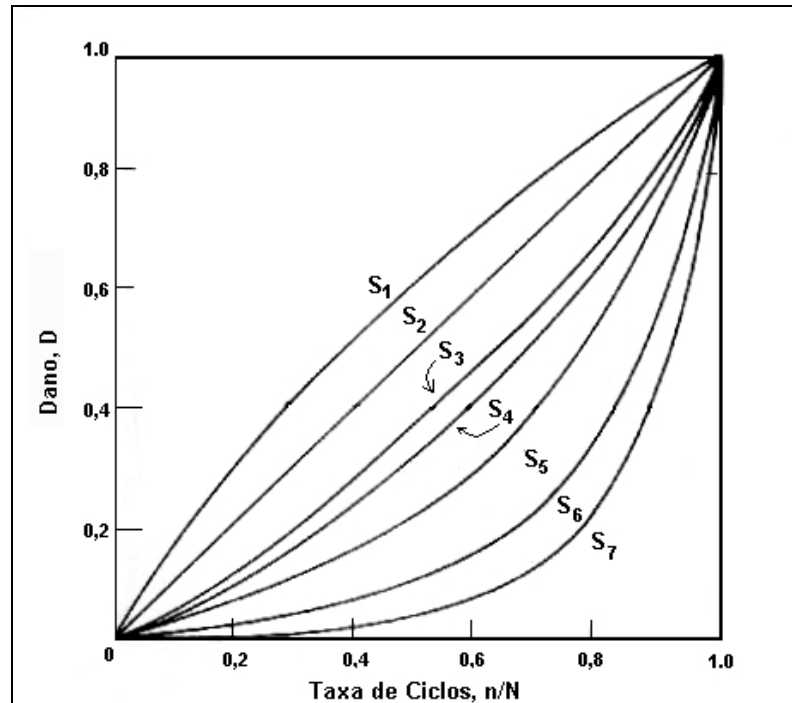


Figura 2.36 – Dano em função da Taxa de Ciclos para vários níveis de tensão (Collins, 1993)

As curvas S-N de danos constantes são mostradas na Fig. 2.37 como resultado da Fig. 2.36, sendo que a curva S-N original é a de “D=1”.

É possível encontrar um número equivalente de ciclos em um nível de tensão que possa produzir os mesmos danos que “ $n_i$ ” ciclos no nível “ $S_i$ ” de tensão.

A partir deste conceito, Marin desenvolveu a expressão:

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right)\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^y + \left(\frac{n_3}{N_1}\right)\left(\frac{S_3}{S_1}\right)^y + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right)\left(\frac{S_i}{S_1}\right)^y = 1 \quad (2.35)$$

que pode ser adequadamente aproximada pela expressão:

$$S^x N = k \quad (2.36)$$

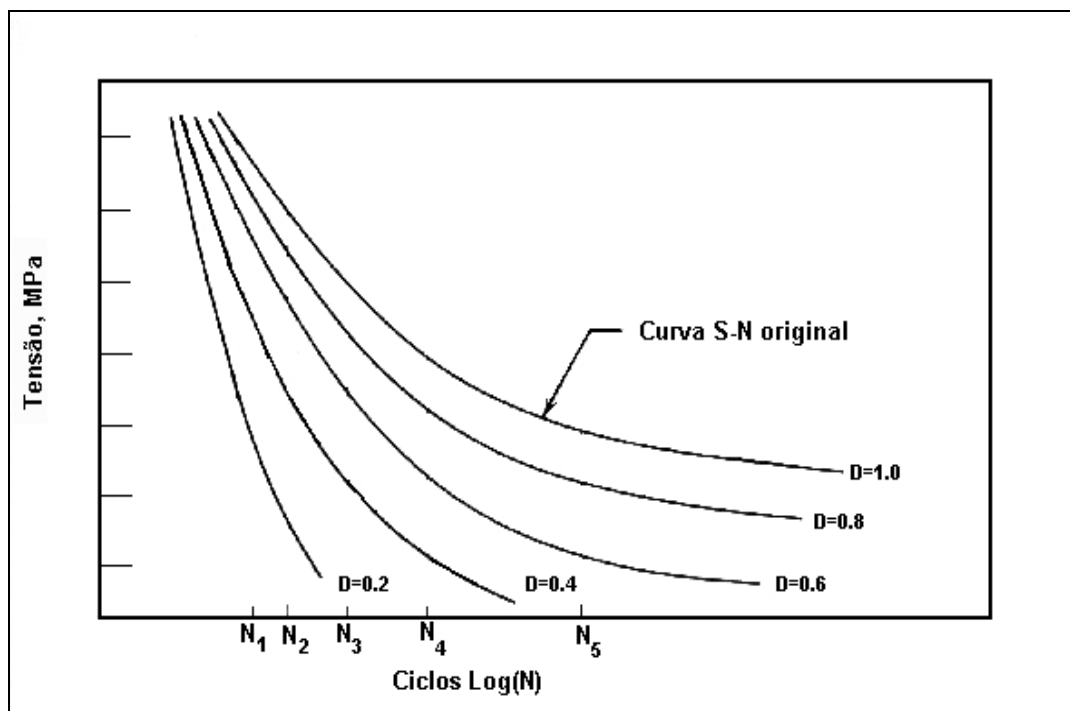


Figura 2.37 – Curvas S-N de danos constantes (Collins,1993)

que combinada com a Eq. 2.35 resulta em:

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right)\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^q + \left(\frac{n_3}{N_1}\right)\left(\frac{S_3}{S_1}\right)^q + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right)\left(\frac{S_i}{S_1}\right)^q = 1 \quad (2.37)$$

onde:

$$q = y - x \quad (2.38)$$

Tomando-se “q=0”, a Eq. 2.37 se reduz à Teoria de Miner.

### 2.2.7 Regra Linear Dupla de Danos de Manson

Estimativas de acúmulo de danos puderam ser melhoradas considerando-se a fase de iniciação da trinca e a fase de propagação de trinca em uma regra linear de danos para cada fase separada. Foi apresentada uma técnica empírica (Manson et al.,1967) para estabelecer as escalas e equações de danos através destas duas fases. Para o período de propagação da trinca tem-se:

$$N_p = PN_f^p \quad (2.39)$$

onde:

$N_p$  = número de ciclos para propagar a trinca, depois de iniciada

$N_f$  = total de ciclos até a falha

$P$  = coeficiente de propagação determinado experimentalmente

$p$  = expoente de propagação determinado experimentalmente

O período de iniciação da trinca pode ser escrito como:

$$N' = N_f - PN_f^p \quad (2.40)$$

Manson determinou os melhores valores para “p” e “P”, como 0,6 e 14, respectivamente. Assim :

$$N' = N_f - 14N_f^{0,6} \quad (2.41)$$

Dados experimentais restringiram as expressões para faixas determinadas de vida com mostrado a seguir:

$$\left. \begin{array}{l} N' = N_f - 14N_f^{0,6} \\ N_p = 14N_f^{0,6} \end{array} \right\} \text{para } N_f \text{ acima de 730 ciclos} \quad (2.42)$$

$$\left. \begin{array}{l} N' = 0 \\ N_p = N_f \end{array} \right\} \text{para } N_f \leq 730 \text{ ciclos} \quad (2.43)$$

A partir destas expressões empíricas, pode-se determinar o número de ciclos para a nucleação das trincas:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.44)$$

As trincas de fadiga propagam-se até a falha quando estas atingem o tamanho crítico:

$$\sum_{j=1}^q \frac{n_j}{(N_j)_j} = 1 \quad (2.45)$$

onde: “n” é o número de ciclos aplicado, “i” na Eq. 2.44 e “j” na Eq. 2.45 são os níveis de tensão.

## Capítulo 3 - Materiais e Métodos

### 3.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho é o aço SAE 8620 ( ASTM 8620 ). São aços similares: ABNT 8620, DIN 21NiCrMo 2 WNr 1.6523, BS 970 Tipos 805A20 e 805M20, JIS G 4103 Tipos SNCM 220, VB-20 (Villares, 1990)

O SAE 8620 é um aço de média temperabilidade, boa resistência ao desgaste na camada cementada e núcleo tenaz (Villares, 1990). Para o aço normalizado, o Limite de Escoamento nominal é 357 MPa, e o Limite de Resistência à Tração é 633 MPa (Smith, 1981). A composição química prevista para este aço é mostrada na Tab. 3.1 (SAE Handbook, 1993).

Tabela 3.1 – Composição química prevista para o aço SAE 8620.

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Co	Pb	Cu	Al	U	W
% min.	0,18	0,15	0,70	0,40	0,40	0,15	<0,03	<0,04	<0,1	0	<0,3	<0,1	<0,1	0
% max.	0,23	0,30	0,90	0,60	0,70	0,25				0,15				0,1

Foram adquiridas no mercado 20 barras do aço SAE 8620. Destas, retiraram-se 20 amostras, uma de cada barra, e foi realizada análise química do material através do Método de Fluorescência de raios X. O percentual dos elementos Mo, Cu, Ni, Mn, Cr, Si, S, P, e Al das amostras estão dentro dos valores médios esperados para este aço conforme mostrado no Certificado de Análise Química – Número IN00425/98 – CDTN – M.G (Anexo I).

Os corpos - de - prova foram fabricados com rugosidade superficial  $R_a = 0,020 \pm 0,005 \mu\text{m}$  (Anexo II).

Retiraram-se seis amostras do aço SAE 8620, de seis barras distintas e foram realizados ensaios para identificação do percentual e tamanho de grão da ferrita, bem como uma análise de microdureza Vickers (Anexo III).

As amostras analisadas apresentaram uma microestrutura típica de um aço perlítico, com grãos de ferrita com lamelas de perlita. Um exemplo é mostrado na Figura 3.1.

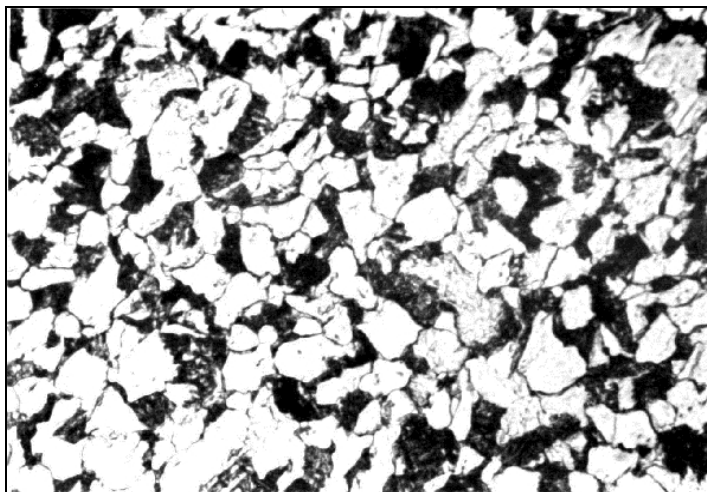


Figura 3.1 – Microestrutura do CP-10, grãos de ferrita ( partes brancas ), lamelas de perlita ( partes escuras ). Aumento de 500 vezes .

Utilizando-se o software QUANTIKOV (CDTN), determinou-se o teor de ferrita. Os resultados estão mostrados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados da análise do percentual de ferrita dos corpos-de-prova 02, 06, 08, 10, 12 e 20 .

CP	02	06	08	10	12	20	Média	Desvio Padrão
% ferrita	64,53	65,73	64,38	64,42	69,56	65,32	65,66	1,99 %

O diâmetro médio dos grãos de ferrita das amostras é apresentado na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados da análise do diâmetro médio do grão de ferrita dos corpos-de-prova 02, 06, 08, 10, 12 e 20 .

CP	02	06	08	10	12	20	Média	Desvio Padrão
$\phi$ da ferrita ( $\mu\text{m}$ )	10,31	11,67	12,77	11,25	11,13	11,16	11,38	0,81 %

### 3.2 Equipamentos utilizados

Para os ensaios de fadiga optou-se pelo ensaio flexo-rotativo, que é um método simples de determinação das propriedades de fadiga com tensão média nula. A máquina de fadiga flexo-rotativa (CDTN) utilizada é mostrada na Fig. 3.2.



Figura 3.2 – Máquina de fadiga flexo-rotativa aberta.

O detalhe do sistema de refrigeração da máquina é mostrado na Fig. 3.3.

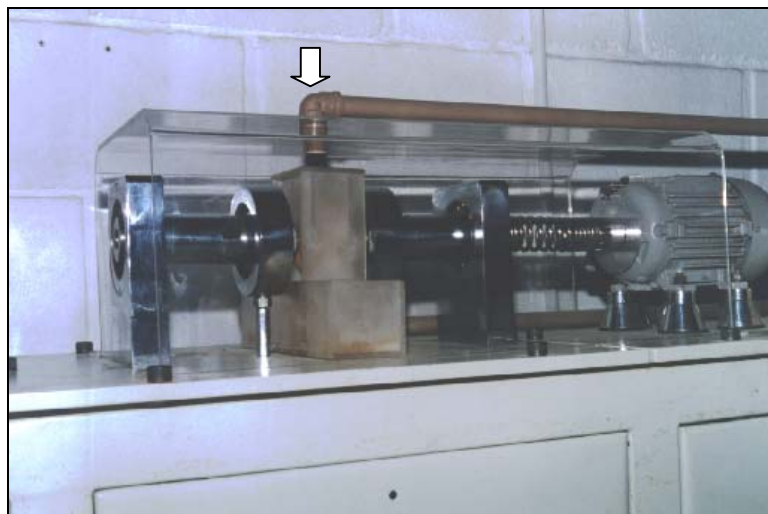


Figura 3.3 – Detalhe do sistema de refrigeração.

Neste tipo de máquina, a aplicação da tensão é realizada através de um sistema de balança. Num dos lados da balança existe um peso de compensação e, no outro, aplicam-se pesos, conforme a tensão desejada. O sistema de aplicação de tensões é mostrado esquematicamente na Fig. 3.4.

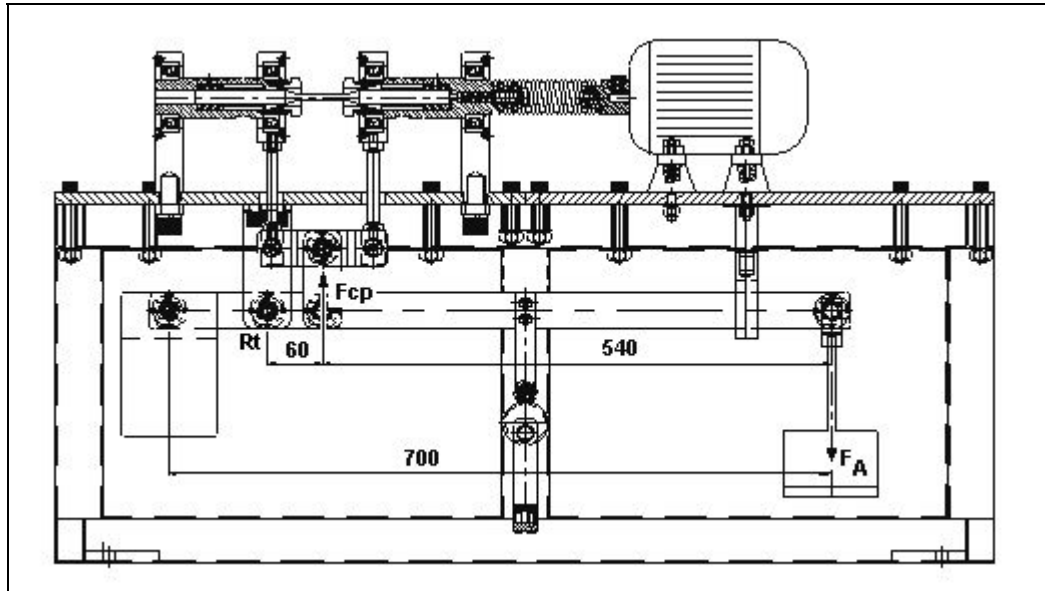


Figura 3.4 – Esquema que mostra a aplicação de tensões.

Nesta máquina o fator de multiplicação de força é de 10. Isto significa que se for colocado uma força de 20 Newtons na balança, ela aplicará no corpo-de-prova 200 Newtons. Da Figura 3.4 tem-se que:

$$\sum M_R = 0 \quad (3.1)$$

$$F_A 600 = F_{CP} 60 \quad (3.2)$$

$$F_{CP} = \frac{F_A 600}{60} = 10F_A \quad (3.3)$$

$$F_{CP} = 10F_A \quad (3.4)$$

onde:

- $F_A$  é a força aplicada pelo peso morto;
- $F_{CP}$  é a força aplicada no corpo-de-prova;
- $R_t$  é a rótula.

Um motor elétrico de 3500 rpm produz as rotações no corpo-de-prova. Estas rotações são registradas por um contador eletrônico com capacidade de contar até  $10^9$  ciclos. Ocorre o desligamento automático da máquina após a falha do corpo-de-prova.

Foram utilizadas duas máquinas de fadiga por flexo-rotativas idênticas. Uma característica destas máquinas utilizadas, que as diferenciam das máquinas de outros centros de pesquisa, é a utilização de um sistema de refrigeração dos corpos-de-prova, o que permite ensaios em temperaturas constantes, independente da tensão aplicada.

Deve-se observar que a fixação do corpo-de-prova, na máquina é feita em dois pontos. Assim, o corpo-de-prova fica submetido a um momento fletor constante no seu centro, logo, nesta região do corpo-de-prova atua apenas o momento fletor.

O esquema referente a este tipo de montagem é mostrado na Figura 3.5, onde A e D são os apoios e, B e C são os pontos de aplicação das tensões.

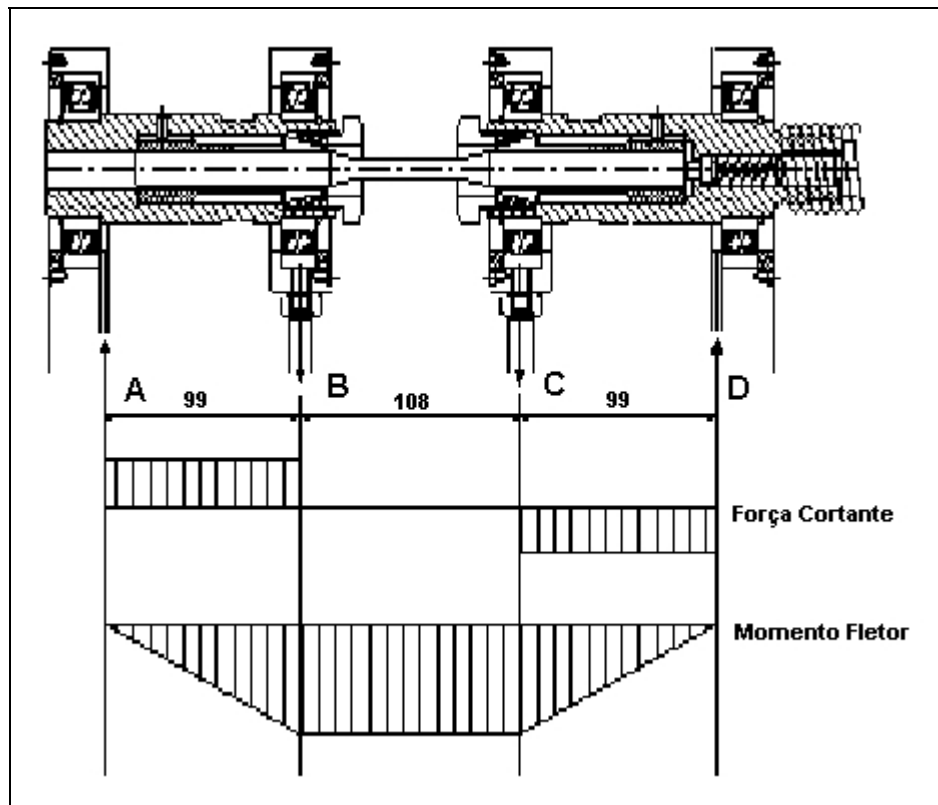


Figura 3.5 – Diagrama dos momentos fletores e força cortante

### 3.3 Corpos-de-Prova Utilizados

O desenho dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios flexo-rotativos é mostrado na Fig. 3.6 onde a geometria e acabamento superficial é uma composição sugerida por Cazaud (1957) e Norma ASTM E 466-96 (1996).

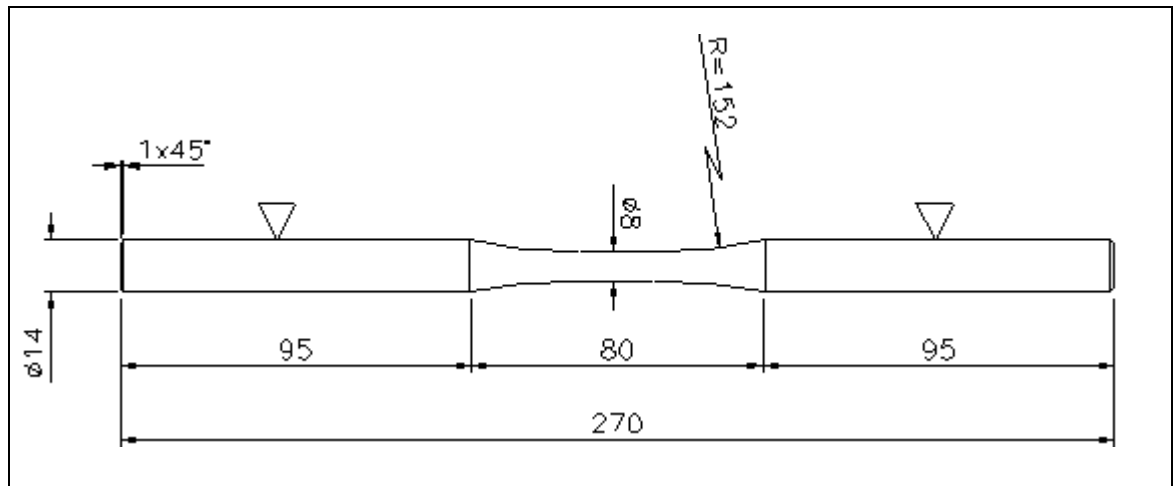


Figura 3.6 – Corpo-de-prova e respectivas dimensões (em mm)

Considerando-se que o corpo-de-prova tem seção transversal circular e que está perfeitamente alinhado, tem-se a linha neutra passando exatamente pelo ponto central da seção transversal. A tensão aplicada no corpo-de-prova é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (3.5)$$

onde: “M” é o momento fletor e “W” o módulo de resistência da seção transversal. O momento fletor máximo “M<sub>m</sub>” será:

$$M_m = \frac{F_{CP} L}{2} \quad (3.6)$$

onde: “F<sub>CP</sub>/2” é a força atuante nos dois pontos equidistantes do corpo-de-prova e “L” é a distância do apoio ao ponto de aplicação de “F<sub>CP</sub>/2”.

O módulo de resistência para a seção circular é:

$$W = \frac{I}{r} = \frac{\pi r^3}{4} \quad (3.7)$$

onde: “I” é o momento de inércia da seção transversal e “r” é o raio da mesma. Levando-se em consideração as dimensões do corpo-de-prova, o ponto de aplicação das forças e as Eq. 3.4 a 3.7, calcula-se que:

$$F_A = 0,1015\sigma \quad (3.8)$$

onde: “F<sub>A</sub>” é a força aplicada e “σ” é a tensão que se deseja aplicar ao corpo-de-prova, que será chamada de “tensão alternada aplicada”.

### **3.4 Metodologia dos Ensaios**

#### **3.4.1 Ensaios de Tração**

Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM E-23, em máquina universal, marca INSTRON (CDTN), com capacidade de 98 KN, velocidade do cabeçote de 0,002 m/min e temperatura de ensaios de 22 °C.

#### **3.4.2 Ensaios de Dureza**

Os ensaios de dureza foram realizados segundo a norma ASTM E-92 em máquina WOLPERT (CDTN). As durezas obtidas foram do tipo Vickers, com força de 196 N e penetrador pirâmide 136°.

#### **3.4.3 Ensaios de Microdureza**

Os ensaios de microdureza foram realizados em equipamento de microdureza Modelo DURIMET marca LEITZ-WETZLAR (CDTN) com força de 1,96 N. As amostras em corte transversal foram lixadas e polidas até a pasta de diamante de granulometria 0,25 μm.

#### **3.4.4 Análise Metalográfica**

As amostras em corte transversal foram lixadas e polidas até a pasta de diamante de granulometria 0,25 μm. Em seguida foram atacadas com solução de Nital 2% (2% de ácido nítrico em álcool etílico), para revelação de sua microestrutura. Após o ataque químico, as amostras foram fotografadas com câmera digital. A imagem digital foi processada para melhor identificação dos detalhes da microestrutura, como por exemplo, os contornos de grão da ferrita e as lamelas de perlita. Posteriormente as imagens foram analisadas com um

“software” de análise de imagens digitais QUANTIKOV (CDTN), que forneceu os resultados do percentual de ferrita e o diâmetro médio do grão de ferrita.

### 3.4.5 Ensaio de Acúmulo de Danos

Foram realizados dois tipos de ensaios de fadiga na máquina flexo-rotativa conforme Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Tipos de ensaios realizados

Ensaio de quatro passos	Tensões crescentes
	Tensões decrescentes
	Tensões crescentes/decrescentes - seqüência 1
	Tensões crescentes/decrescentes - seqüência 2
Ensaio de dois passos	Tensões crescentes
	Tensões decrescentes

O incremento do valores das tensões aplicadas foi determinado em função do dano imposto ao corpo-de-prova e da disponibilidade de pesos da máquina. A descrição de cada ensaio segue abaixo:

- Ensaio de quatro passos com tensões crescentes: o primeiro corpo-de-prova é fixado na máquina flexo-rotativa refrigerada. A refrigeração é acionada. A máquina roda o número de ciclos relacionados à primeira tensão. A máquina é desligada e uma nova tensão é aplicada rodando-se o número de ciclos previamente determinado. Este procedimento segue até a última tensão conforme mostrado na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Seqüência de tensões crescentes

Ordem de aplicação	Tensão (MPa)	Ciclos previstos (n)
1	198	195.983
2	217	100.512
3	236	51.548
4	259	22.970

- Ensaio com tensões decrescentes: o procedimento é idêntico ao do item anterior porém, a seqüência das tensões obedece à Tab. 3.6.

Tabela 3.6 – Seqüência de tensões decrescentes

Ordem de aplicação	Tensão (MPa)	Ciclos previstos (n)
1	259	22.970
2	236	51.548
3	217	100.512
4	198	195.983

- Ensaio com Tensões Crescentes e Decrescentes – Seqüência 1: o procedimento é o mesmo do ensaio com tensões decrescentes porém, após a aplicação da primeira tensão, a seqüência muda conforme a Tab. 3.7. Durante a aplicação da última tensão, a máquina roda até o rompimento do corpo-de-prova.

Tabela 3.7 – Seqüência 1 de tensões crescentes e decrescentes

Ordem de aplicação	Tensão (MPa)	Ciclos previstos (n)
1	259	25.000
2	198	200.000
3	236	60.000
4	217	Romper

- Ensaio com Tensões Crescentes e Decrescentes – Seqüência 2: o procedimento é o mesmo do ensaio com tensões crescentes porém, após a aplicação da primeira tensão, a seqüência muda conforme a Tab. 3.8. Durante a aplicação da última tensão, a máquina roda até o rompimento do corpo-de-prova.

Tabela 3.8 – Seqüência 2 de tensões crescentes e decrescentes

Ordem de aplicação	Tensão (MPa)	Ciclos previstos (n)
1	198	200.000
2	236	60.000
3	217	100.000
4	259	Romper

- Ensaio com Tensões Crescentes – 2 Passos: o primeiro corpo-de-prova é fixado na máquina flexo-rotativa refrigerada. Aplica-se a tensão de 236 MPa. A refrigeração é acionada e a máquina roda por aproximadamente 85.914 ciclos. A máquina é parada e altera-se a tensão para 259 MPa. O procedimento de ligar a máquina é repetido e esta irá rodar até romper o corpo-de-prova, quando será anotado o número de ciclos. O corpo-de-prova é retirado e a operação se repete com os corpos-de-prova seguintes.
- Ensaio com Tensões Decrescentes – 2 Passos: o primeiro corpo-de-prova é fixado na máquina flexo-rotativa refrigerada. Aplica-se a tensão de 259 MPa. A refrigeração é acionada e então a máquina roda por aproximadamente 38.283 ciclos. A máquina é parada e altera-se a tensão para 236 MPa. O procedimento de ligar a máquina é repetido e esta irá rodar até romper o corpo-de-prova, quando será anotado o número de ciclos. O corpo-de-prova é retirado e a operação se repete com os corpos-de-prova seguintes.

### 3.4.6 Determinação das Curvas S-N-P

Para a determinação das curvas S-N-P foi utilizada a máquina de fadiga flexo-rotativa, com fixação bilateral dos corpos-de-prova. Este tipo de fixação corresponde a uma viga bi-apoiada, com tensões aplicadas, simetricamente, em relação ao centro do corpo-de-prova. Este tipo de solicitação provoca entre as tensões aplicadas momento fletor constante e força cortante nula ( item 3.2). Os ensaios mecânicos para a coleta de informações para o estudo de fadiga foram realizados na forma de testes de vida acelerada (Cazaud,1957), onde a

variável resposta de interesse é o tempo até a ocorrência da falha e a variável de tensão é o nível de tensão aplicada ao corpo-de-prova .

O Plano Experimental escolhido para condução dos ensaios foi o Plano de Compromisso apresentados por Meeke e Halen (1985). Este plano é uma proposta intermediária entre os tradicionais e os ótimos. Utilizam-se três níveis de tensão: alto, intermediário e baixo. Assume-se que o nível “alto” é escolhido por considerações práticas. Os níveis “médio” e “baixo” são escolhidos de forma a minimizar a variância assintótica do estimador percentual de interesse. Existe o “compromisso” de que a alocação será sempre na proporção 4:2:1, para os níveis baixo, intermediário e alto. Neste trabalho, foram utilizados sete níveis de tensão, sendo quatro objeto do planejamento e dois obtidos por interpolação linear. O nível de tensão mais alto  $\sigma_a = V_a$  foi escolhido como 59% do limite de escoamento e, o nível mais baixo  $\sigma_0 = V_0$  como 46% do limite de escoamento. Estes valores foram selecionados com base nos resultados do teste “Up-And-Down”.

### 3.4.7 Determinação do Limite de Resistência à Fadiga

Utilizou-se para a determinação do Limite de Resistência à Fadiga o método “Up-And-Down” (ou método da escada) e o Método de Modelos de Regressão para Dados Oriundos de Testes de Vida Acelerados (Mansur et al., 2000).

Estes métodos serão aplicados e comparados entre si, visando a determinação do Limite de Resistência à Fadiga para um tempo de vida de  $2 \times 10^6$  ciclos. Assim, a aplicação do Método “Up-And-Down” foi feita de 2 maneiras: uma simulada e outra experimental.

Para a realização dos ensaios experimentais “Up-And-Down”, utilizaram-se 15 corpos-de-prova, para o tempo de vida de interesse. Os passos podem ser resumidos como se segue:

- O primeiro corpo-de-prova é fixado na máquina flexo-rotativa refrigerada e testado em um nível tensão um pouco acima do Limite de Resistência à Fadiga preestabelecido. A refrigeração é acionada e a máquina roda até ocorrer a falha do corpo-de-prova ou até atingir sua vida útil.

- Se este corpo-de-prova vier a falhar antes de atingir a vida útil, neste caso  $2 \times 10^6$  ciclos, o valor da tensão para o corpo-de-prova seguinte sofre um decréscimo.
- Se este corpo-de-prova não falhar, o nível de tensão do próximo corpo-de-prova sofre um acréscimo.
- O corpo-de-prova é retirado e a operação prossegue com os corpos-de-prova seguintes.
- Este procedimento continua desta maneira, sempre com o corpo-de-prova subsequente sendo ensaiado em um nível de tensão superior ou inferior ao do seu antecessor, dependendo da ocorrência de falha ou não.

Os dados obtidos podem ser analisados estatisticamente e a seqüência de cálculo está descrita no item (2.1.2.5).

A simulação do Método “Up-And-Down” foi realizada no software MINITAB (CDTN) e seguiu os procedimentos utilizados no método “Up-And-Down”. Os níveis de tensão escolhidos para a simulação foram aqueles que correspondem aos seguintes valores da função de confiabilidade para o modelo base:  $R(T) = 10\%, 50\%$  e  $90\%$ . Foram realizadas 5 simulações para cada um dos dois casos, refrigerado e não refrigerado, com 22 corpos-de-prova para cada simulação. Os valores de tensão correspondentes a  $R(T) = 10\%, 50\%$  e  $90\%$  apresentam entre si um passo constante, “d”.

A simulação foi feita da seguinte maneira:

Com os valores obtidos para  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\Gamma$  dos dados experimentais do traçado das curvas S-N-P, calculou-se  $x_0$  para  $R(T) = 10\%, 50\%$  e  $90\%$ .

Depois de calculado  $x_0$ , calculou-se  $\mu(x)$ .

Com os valores obtidos para  $\mu(x)$  e  $\Gamma$ , procede-se da seguinte maneira na utilização do programa computacional MINITAB Versão 12.

1. Calc – Randon Data → Log-normal.

2. Generate .

Store in columns

Location

Scale

3. Aparece o 1º valor de ciclos gerado.
4. Debaixo deste valor anota-se o valor da tensão que o gerou.
5. Se este valor for menor que  $t = 2 \times 10^6$  significa que o corpo-de-prova falhou, então , retorna-se a “1” com o valor de tensão menor. Se o valor for maior que  $2 \times 10^6$  aumenta-se o valor da tensão.
6. Repete-se esta seqüência até se ter os 22 valores desejados.

De posse dos 22 valores gerados em “3” aplica-se o “Up-And-Down” convencional (Palma et al., 1999).

## Capítulo 4 - Resultados Experimentais

### 4.1 Resultados Preliminares

Os resultados do ensaio de tração obtidos em cinco amostras do aço SAE 8620 (Anexo IV) para o material virgem são mostrados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de ensaios de tração para o aço SAE 8620 virgem

Limite de Escoamento - $\sigma_{0,2}$ (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento A (%)	Redução de Área S (%)	Limite de Ruptura (MPa)
$370 \pm 10$	$602 \pm 24$	$21 \pm 2$	$39 \pm 1$	$432 \pm 19$

O valor médio de Dureza Vickers para o aço SAE 8620 obtido em vinte corpos-de-prova (Anexo V) é de  $185 \pm 10$  Vickers para o material virgem.

Resultados de microdureza Vickers com carga de 200 gramas obtidos em seis corpos-de-prova (Anexo III) é de  $290 \pm 15$  Vickers para o material virgem.

A rugosidade média (Ra) encontrada foi  $Ra = 0,020 \pm 0,005 \mu\text{m}$ , feita em três corpos-de-prova, escolhidos aleatoriamente e executadas noventa medições, trinta 30 em cada corpo-de-prova (Anexo II).

Os resultados dos ensaios obtidos em dezesseis corpos-de-prova através de ensaios “Up-And-Down” para o aço SAE 8620 virgem são mostrados na Fig. 4.1.

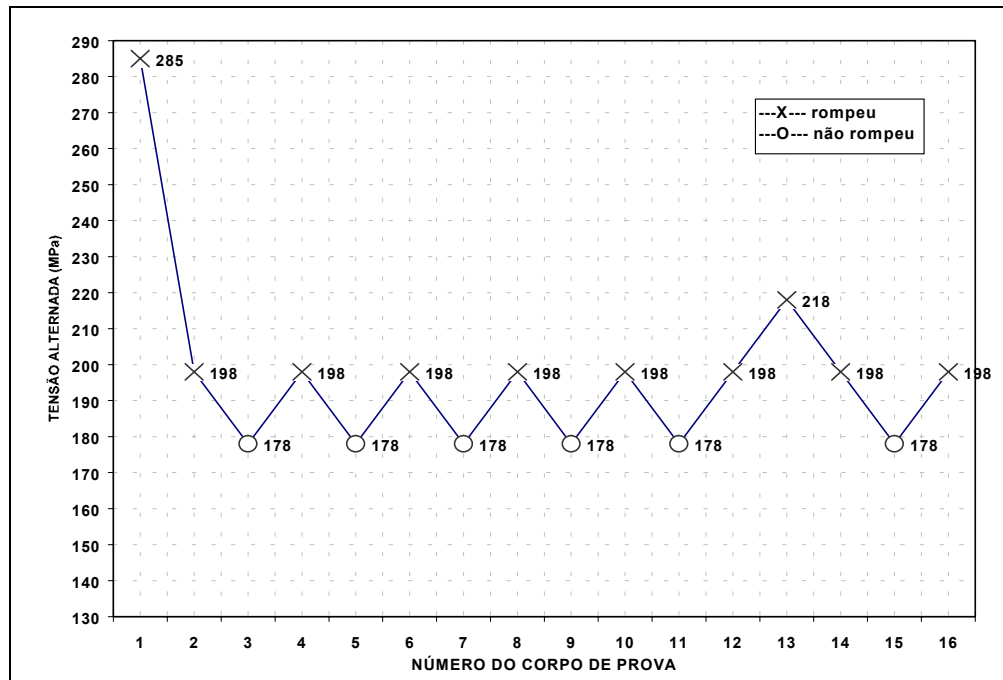


Figura 4.1 – Ensaio “Up-And-Down” material virgem

Aplicando a seqüência de cálculos apresentada no item 2.1.2.6, chegou-se ao Limite de Resistência à Fadiga ( $S_e$ ) de  $194 \pm 5$  MPa para uma confiabilidade de 95%.

## 4.2 Curvas S-N

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga flexo-rotativa estão apresentados nas Fig. 4.2 e 4.3 sem e com refrigeração, respectivamente. Em cada figura são apresentadas curvas com três probabilidades de falha distintas, 1%, 50% e 99%. A determinação destas curvas foi feita através de Distribuição de Gauss, conforme item 2.1.2.

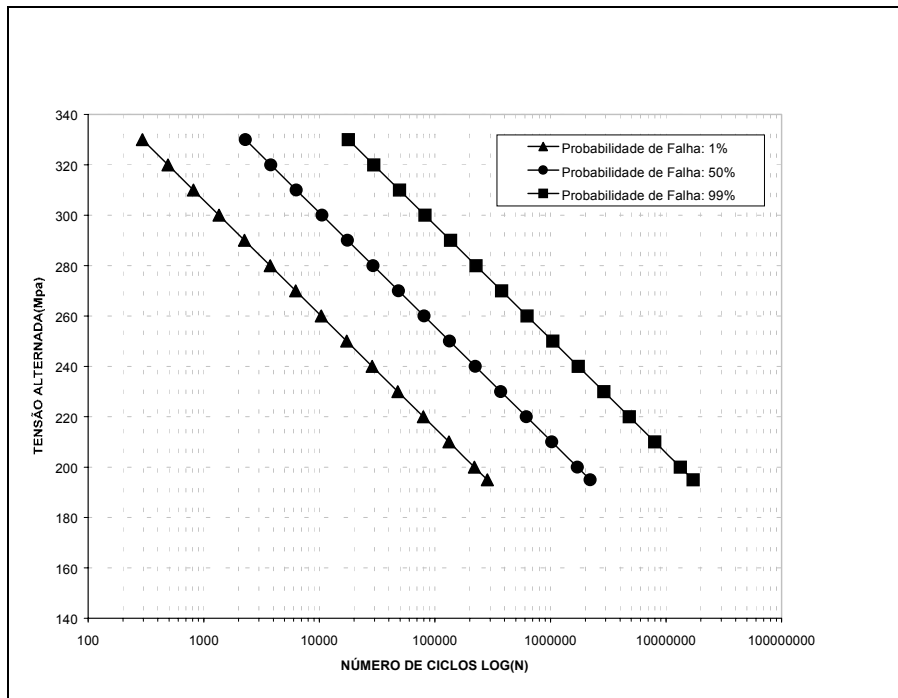


Figura 4.2 - Ensaio em corpos-de-prova sem refrigeração

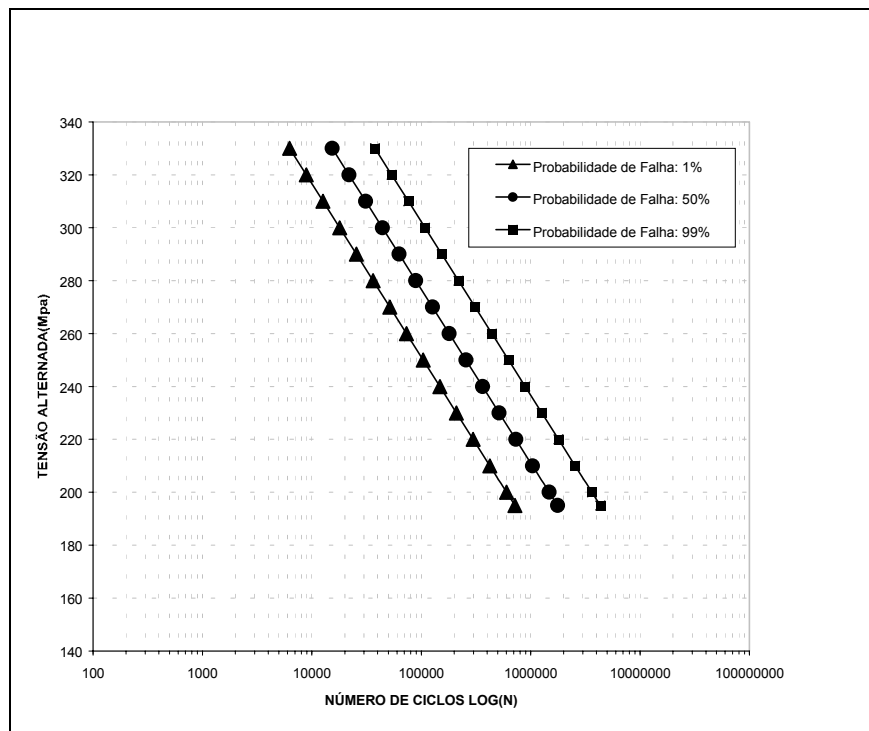


Figura 4.3 – Ensaio em corpos-de-prova refrigerados

São apresentados na Tab. 4.2 os parâmetros obtidos nos ajustes das equações das curvas S-N para os ensaios de fadiga flexo-rotativos. Estes parâmetros foram determinados utilizando-se o “software” ORIGIN (CDTN), usando-se distribuição de Gauss.

Tabela 4.2 – Parâmetros das Equações de Fadiga

Parâmetro	Percentuais para ensaios não refrigerados			Percentuais para ensaios refrigerados		
	1%	50%	99%	1%	50%	99%
a	441,7093	482,0178	522,3259	578,9886	604,5737	630,1601
b	-45,2483	-45,2486	-45,2486	-65,5171	-65,5171	-65,5173
Qui Quadrado	$3,16 \times 10^{-7}$	$2,85 \times 10^{-7}$	$2,64 \times 10^{-7}$	0,0011	0,0011	0,0011
Coefficiente de Determinação ( $R^2$ )	1	1	1	1	1	1
Intervalo de Confiança	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

A equação de Fadiga é dada por:

$$\sigma_a = a + b \log [N] \quad (4.1)$$

$$N = 10^{\frac{\sigma_a - a}{b}} \quad (4.2)$$

onde: “a” é o coeficiente linear da reta, intercepta no eixo das tensões, “b” é o coeficiente angular ou declividade da reta, ou seja, tangente do ângulo formado pela reta e a parte positiva do eixo dos ciclos. Como o ângulo é obtuso ( $90 < \alpha < 180^\circ$ ), a tangente é negativa.

A Figura 4.4 é o resultado da aplicação do Limite de Resistência à Fadiga para uma confiabilidade de 95% obtido no ensaio "Up-And-Down" (Fig.4.1) à curva S-N-P refrigerada (Fig.4.3).

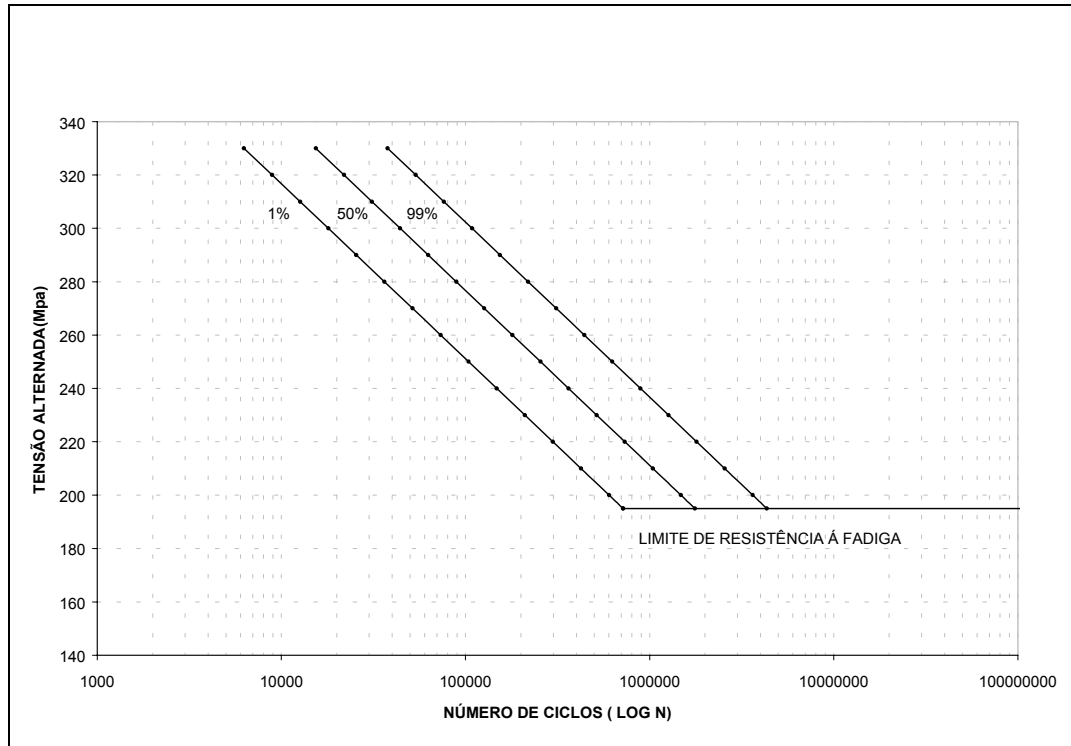


Figura 4.4 – Gráfico das Curvas S-N-P probabilidade de falha para o aço SAE 8620

Para efeito de cálculo do número de ciclos do ensaio de acúmulo de danos para cada tensão, é considerada a curva de 1% de probabilidade de falhas, pois em geral, as peças produzidas com este aço são de alta responsabilidade.

### 4.3 Acúmulo de danos

Uma série de onze corpos-de-prova foi submetida a tensões crescentes (Anexo VI) mostradas na Tab. 4.3. Para cada tensão tem-se um número de ciclos (N) que corresponde à vida para a probabilidade de falha de 1% na curva S-N-P do ensaio refrigerado. O número de ciclos (n) corresponde a 30% da vida (N), que é a condição de ensaio para a tensão relacionada.

Tabela 4.3 – Ensaio de 4 passos - tensões crescentes e número de ciclos

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) $n = 30\%$ de N
198	653.279	195.983
217	335.041	100.512
236	171.829	51.548
259	76.567	22.970

A distribuição das tensões em relação às curvas S-N-P são apresentadas na Fig. 4.5. A tensão alternada começa com o valor de 198 MPa e sobe conforme mostrado na Tab. 4.3.

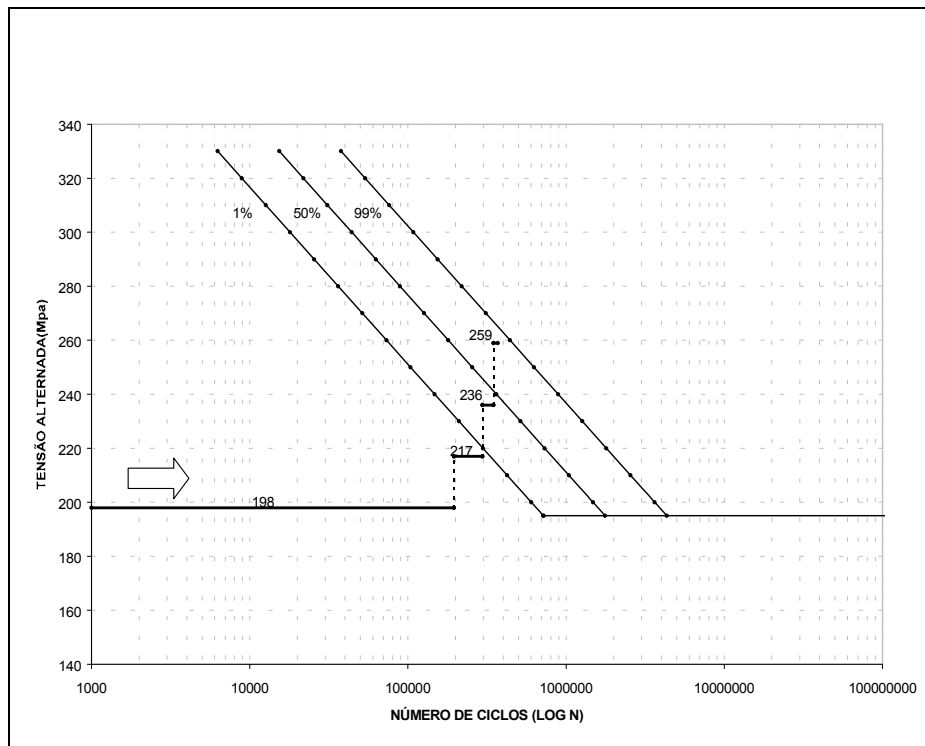


Figura 4.5 – Acúmulo de Danos com tensões crescentes

Uma série de onze corpos-de-prova foram submetidos a tensões decrescentes (Anexo VII) mostrada na Tab. 4.4. Para cada tensão tem-se um número de ciclos (N) que corresponde à 1 % de probabilidade de falha na curva S-N-P do ensaio refrigerado. O número de ciclos “n” corresponde a 30% da vida “N” que é a condição de ensaio para a tensão relacionada.

Tabela 4.4 – Ensaio de 4 passos - tensões decrescentes e número de ciclos

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) n =30% de N
259	76.567	22.970
236	171.829	51.548
217	335.041	100.512
198	653279	195.983

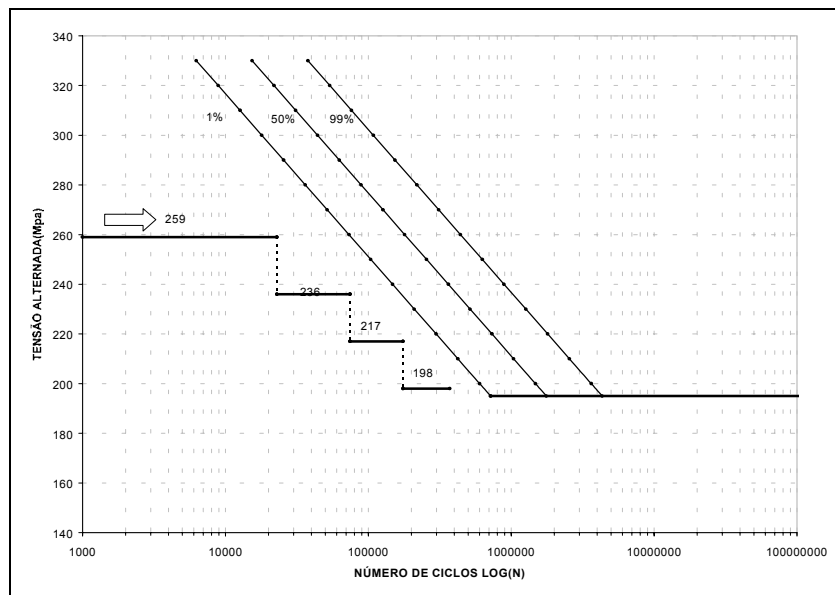


Figura 4.6 – Acúmulo de danos com tensões decrescentes

A distribuição das tensões decrescentes em relação às curvas S-N-P são mostradas na Fig.4.6.

Uma série de seis corpos-de-prova foram submetidos a tensões crescentes e decrescentes (Anexo VIII) na seqüência mostrada na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Ensaio 4 passos - tensões crescentes e decrescentes e número de ciclos correspondentes – seqüência 1

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) $n \cong 30\%$ de N
259	76.567	25.000
198	171.829	200.000
236	335.041	60.000
217	653279	até romper

A distribuição das tensões em relação às curvas S-N-P é mostrada na Fig.4.7. Deve-se notar que neste ensaio o corpo-de-prova é levado à ruptura.

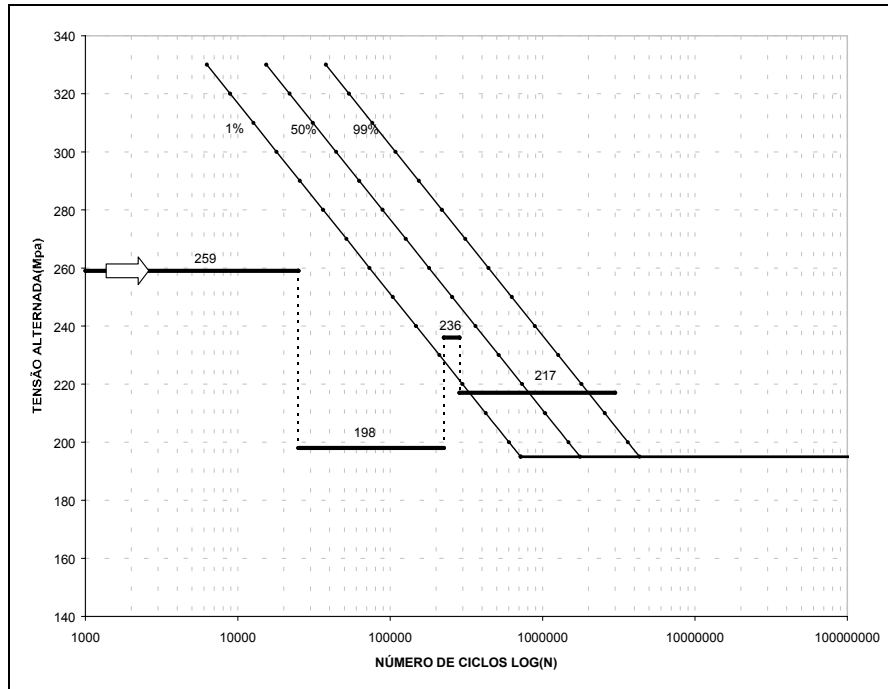


Figura 4.7 - Tensões crescentes e decrescentes – Seqüência 1

Os corpos-de-prova romperam em uma média de  $(615 \pm 160) \times 10^3$  ciclos.

Uma série de seis corpos-de-prova foram submetidos à tensões crescentes e decrescentes (Anexo IX) na seqüência mostrada na Tab. 4.6.

Tabela 4.6 – Ensaio 4 passos - Tensões crescentes e decrescentes e número de ciclos correspondentes – Seqüência 2

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) $n \cong 30\%$ de N
198	171.829	25.000
236	335.041	200.000
217	653279	60.000
259	76.567	até romper

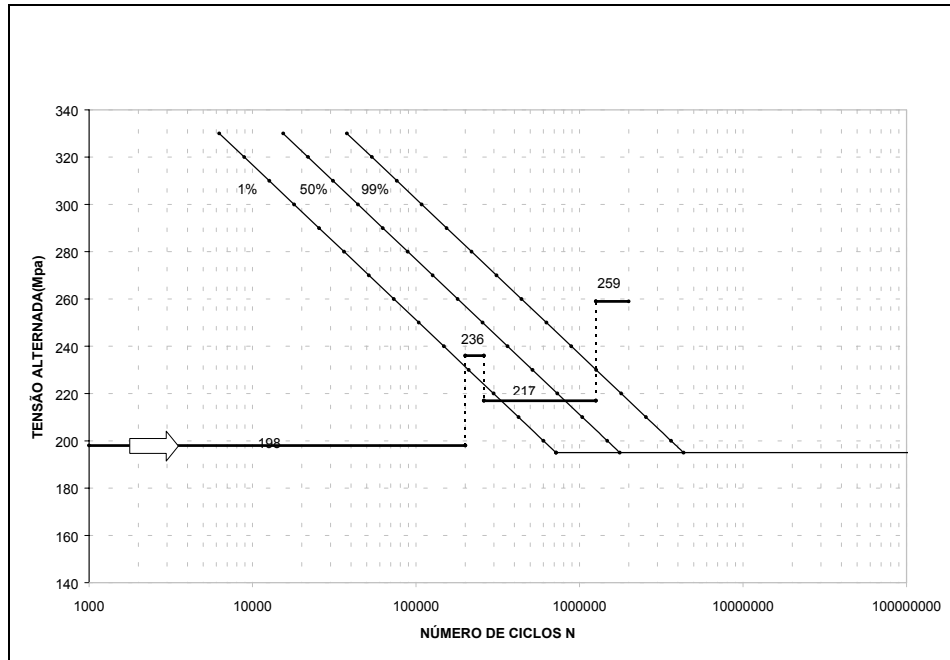


Figura 4.8 – Acúmulo de danos com tensões crescentes e decrescentes -  
Seqüência 2

A distribuição das tensões em relação às curvas SNP é mostrada na Fig. 4.8. Deve-se notar também que neste ensaio o corpo-de-prova é levado à ruptura.

Uma série de três corpos-de-prova foram submetidos a duas tensões crescentes (Anexo X) na seqüência mostrada na Tab. 4.7.

Tabela 4.7 – Ensaio 2 passos - Tensões crescentes e número de ciclos correspondentes

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) n = 50% de N
236	171.829	85.914
259	76.567	até romper

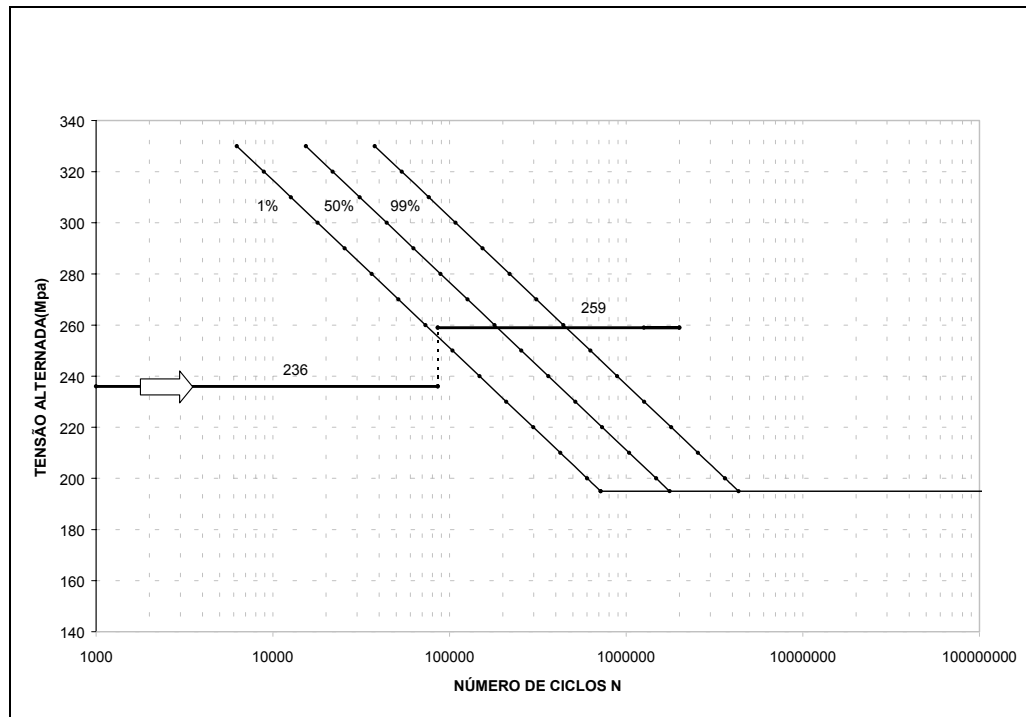


Figura 4.9 – Acúmulo de danos com tensões crescentes – dois passos

A distribuição das tensões em relação às curvas S-N-P é mostrada na Fig.4.9. Deve-se notar também que neste ensaio o corpo-de-prova é levado até a ruptura no segundo passo.

Uma série de seis corpos-de-prova foram submetidos a duas tensões decrescentes (Anexo XI) na seqüência mostrada na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 – Ensaio 2 passos - Tensões decrescentes e número de ciclos correspondentes

Níveis de tensões (MPa)	Número de ciclos previstos para 1% de probabilidade de falha (N)	Condição de ensaio - dano (em ciclos) $n = 50\%$ de N
259	76.567	38.283
236	171.829	até romper

A distribuição das tensões em relação às curvas SNP é mostrada na Fig.4.10. Nota-se que neste ensaio o corpo-de-prova é levado até a ruptura no segundo passo.

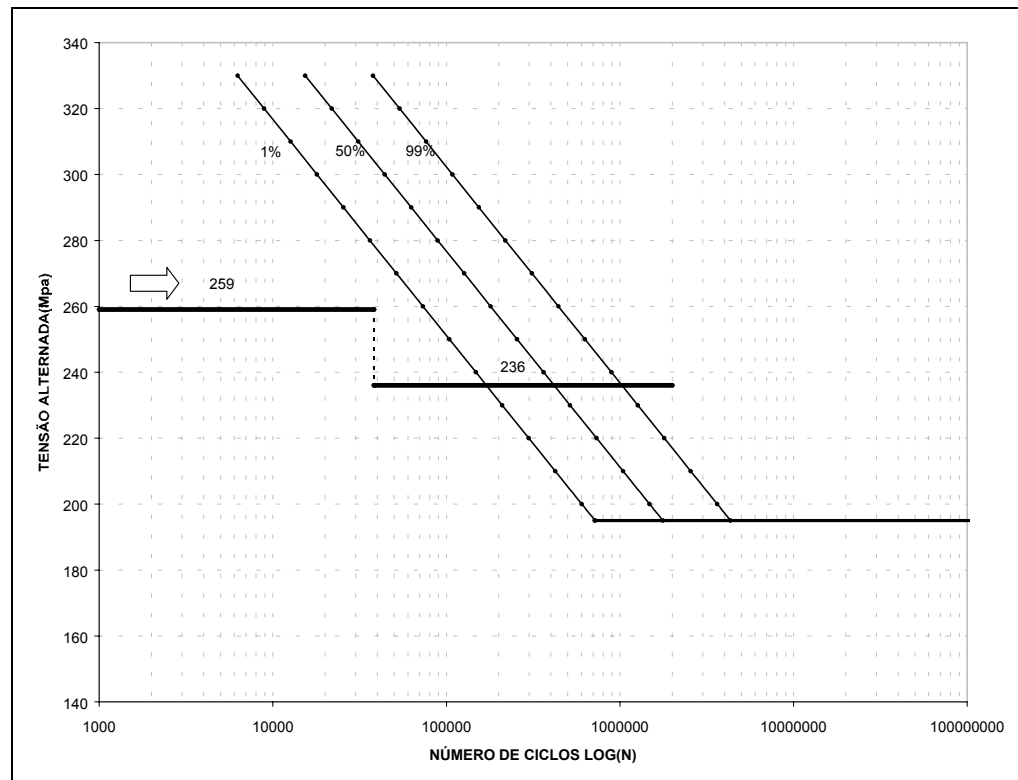


Figura 4.10 – Tensões crescentes – dois passos

Os resultados dos ensaios experimentais de "Up-and-Down" para os corpos-de-prova danificados no ensaio de 4 passos com tensões crescentes (Anexo XII) são mostrados na Fig. 4.11. O ensaio foi iniciado com uma tensão igual a 198 MPa, superior ao limite de resistência à fadiga esperado. Usou-se um gradiente "d" de acréscimo ou decréscimo das tensões variando entre 20 e 10 MPa de acordo com a disponibilidade de pesos disponíveis na máquina flexo-rotativa. Utilizando-se a seqüência de cálculo detalhada no item 2.1.2.6, obteve-se o valor de  $S_e=165\pm 6$  MPa para uma confiabilidade de 95%.

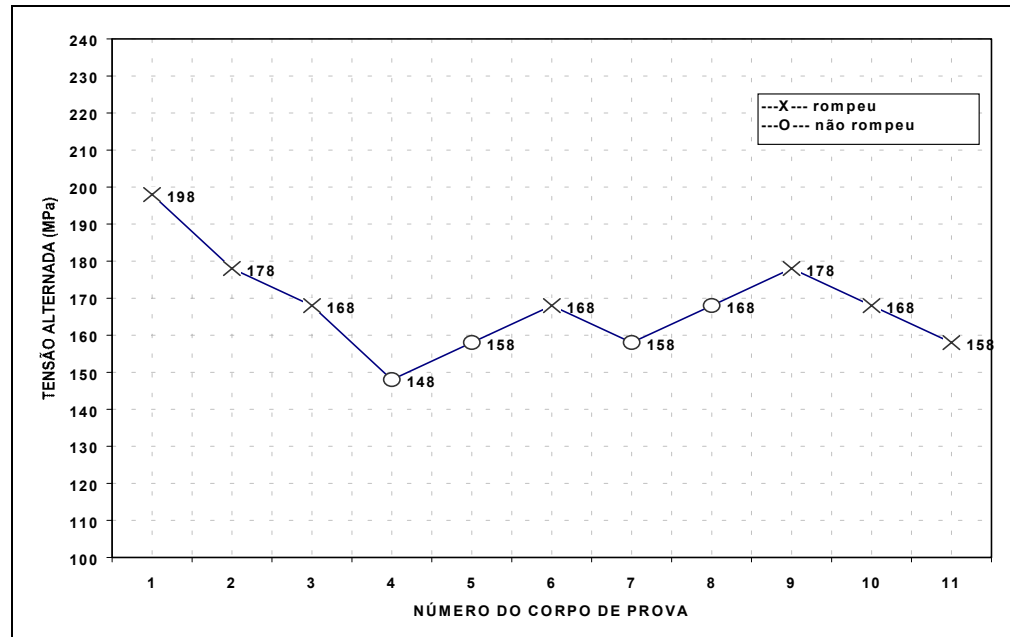


Figura 4.11 - Ensaio experimental de "Up-and-Down" para corpos-de-prova danificados com tensões crescentes

Os resultados dos ensaios experimentais de "Up-and-Down" para os corpos-de-prova danificado no ensaio de 4 passos com tensões decrescentes (Anexo XIII) são mostrados na Fig. 4.12. O ensaio foi iniciado com uma tensão igual a 234 MPa, superior ao limite de resistência à fadiga esperado. Usou-se um gradiente "d" de acréscimo ou decréscimo das tensões variando entre 10 e 36 MPa de acordo com a disponibilidade de pesos disponíveis na máquina flexo-rotativa. Utilizando-se a seqüência de cálculo detalhada no item 2.1.2.6. obteve-se o valor de  $S_e = 145 \pm 19$  MPa para uma confiabilidade de 95%.

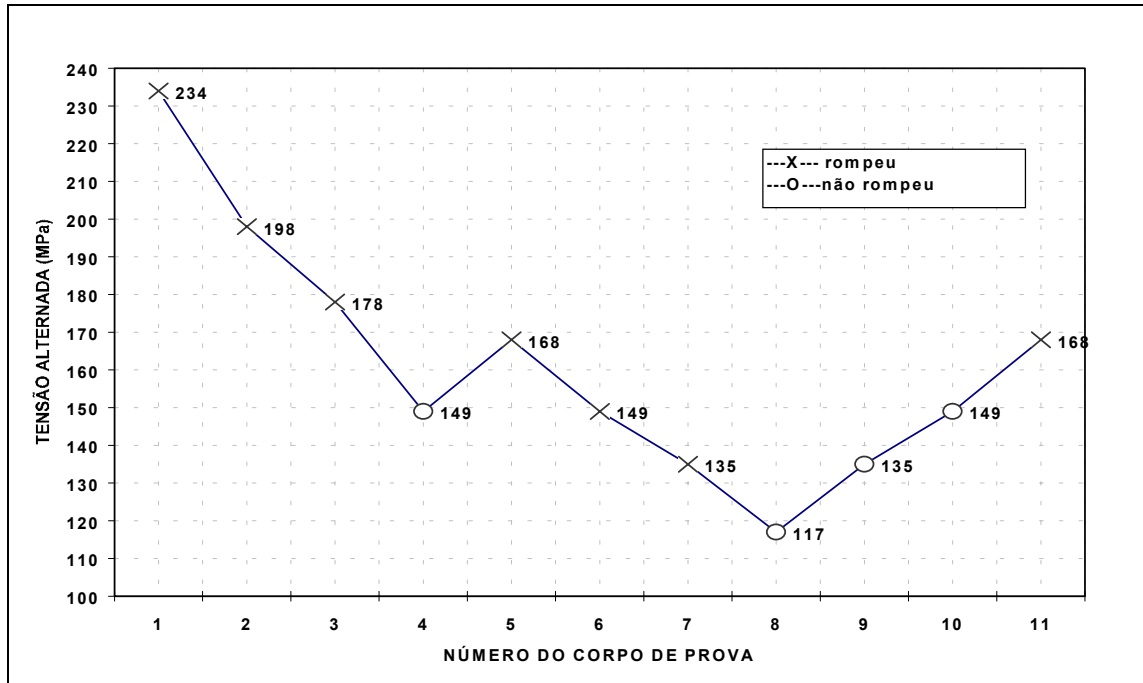


Figura 4.12 - Ensaio experimental de "Up-and-Down" para corpos-de-prova danificados com tensões decrescentes

#### 4.4 Ensaio de Micro-dureza

Utilizou-se 4 corpos-de-prova sendo que dois provenientes do ensaio de 4 passos com tensões crescentes e dois do ensaio de 4 passos com tensões decrescentes. Retirou-se duas amostras de cada corpo-de-prova conforme procedimento do item 3.4.3. Os resultados do ensaio são apresentados na íntegra no Anexo XIV e um resumo é apresentado na Tab. 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de micro-dureza vickers

Número do C.P.	Número da amostra	Média da Dureza Vickers
C.P 4 ensaio 4 passos com tensões decrecentes	1 (virgem)	246 ± 4
	5 (com dano)	231 ± 5
C.P 8 ensaio 4 passos com tensões decrecentes	2 (virgem)	227 ± 6
	6 (com dano)	214 ± 2
C.P 10 ensaio 4 passos com tensões crescentes	3 (virgem)	252 ± 6
	7 (com dano)	229 ± 5
C.P 13 ensaio 4 passos com tensões crescentes	4 (virgem)	257 ± 18
	8 (com dano)	217 ± 6

## Capítulo 5 - Discussão dos Resultados

### 5.1 Introdução

A análise dos resultados da Tab. 4.1 indica que as propriedades Limite de Escoamento, Limite de Resistência à fadiga e Limite de Ruptura encontrados experimentalmente estão dentro da faixa nominal do aço 8620 (Smith, 1981). Para se obter uma análise completa do Limite de Resistência à Fadiga, além do método experimental e empírico, uma simulação do Método “Up-and-down” foi realizada no software MINITAB conforme item 3.4.7. Para tanto utilizou-se uma tensão inicial de 230 Mpa, sendo realizadas cinco simulações do ensaio. Os resultados são apresentados na Tab. 5.1. Encontrou-se um valor médio de  $S_e = 197 \pm 9$  MPa.

Tabela 5.1 – Resultados das simulações do método “Up-And-Down”

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

É mostrada na Tab. 5.2 uma comparação entre os valores experimental, empírico e simulado. Nota-se que não há grande dispersão entre os resultados apesar do valor empírico ser menor que os demais, provavelmente devido aos fatores de correção estarem super dimensionados.

Tabela 5.2 – Comparação entre valores de  $S_e$

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

Para efeitos comparativos com os dados obtidos dos corpos-de-prova danificados, utilizou-se o Limite de Resistência à Fadiga experimental de 194±5 MPa.

Os parâmetros obtidos nos ajustes das equações das curvas S-N para os ensaios de fadiga flexo-rotativos (Tab.4.2), determinados utilizando-se o programa ORIGIM, apresentaram-se bem adequados ao traçado das curvas S-N-P, obtendo-se ótima linearização destas.

## 5.2 Influência da Refrigeração

Notou-se durante os ensaios flexo-rotativos não refrigerados, uma grande elevação da temperatura nos corpos-de-prova, produzida pelo trabalho de flexão na parte central deste, principalmente em tensões elevadas. Isto se deve à natureza acelerada deste tipo de ensaio que produz uma grande geração interna de calor no corpo-de-prova, que não é capaz de dissipá-la. Para atingir os objetivos deste trabalho, tomou-se como base para os ensaios as curvas S-N-P do ensaio refrigerado, eliminando-se assim a influência da temperatura no comportamento mecânico do material. Desta forma, o corpo-de-prova mantém-se muito próximo à temperatura ambiente durante todo o ensaio.

As curvas S-N-P para 1% probabilidade de falha levantada por meio dos dados dos ensaios refrigerados e não refrigerados são mostradas na Fig. 5.1.

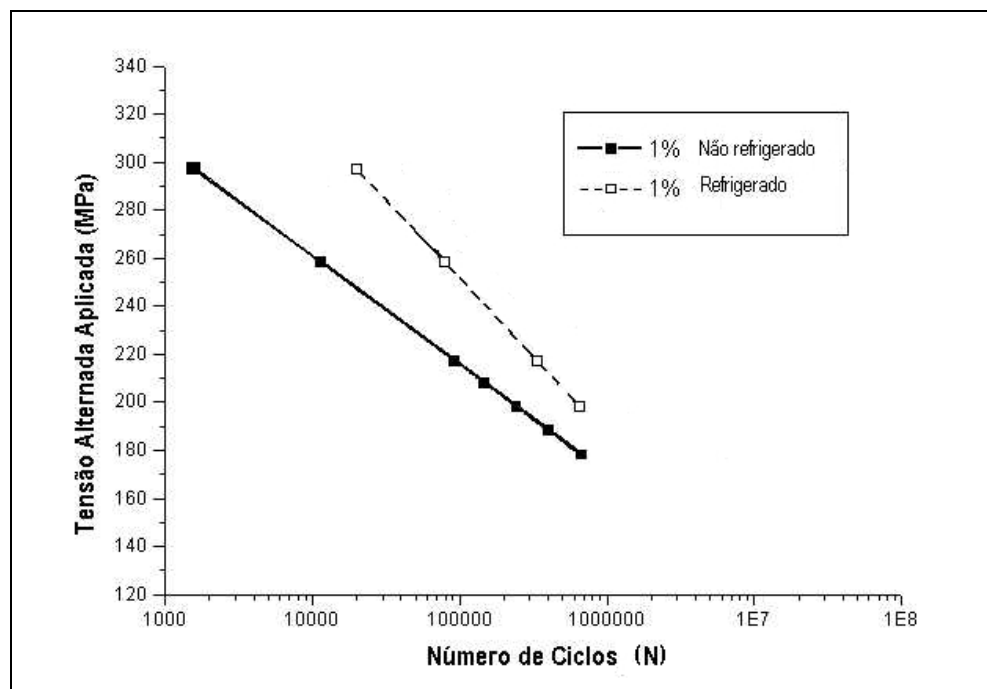


Figura 5.1- Comparação entre as curvas S-N-P para corpos-de-prova não refrigerados e refrigerados

Nota-se através deste gráfico que as curvas dos ensaios refrigerados são mais conservativas do que as curvas do ensaio não refrigerado. As curvas dos dois ensaios têm inclinações diferentes entre si, sendo que a do ensaio refrigerado tem maior inclinação e está deslocada para a direita, o que indica que o corpo-de-prova refrigerado rodará, em uma mesma tensão, um maior número de ciclos até atingir a curvas de probabilidade de falha de 1%. Observa-se também que quanto maior a tensão alternada aplicada, tanto maior será o números de ciclos que o corpo-de-prova refrigerado irá rodar em relação ao corpo-de-prova não refrigerado, em função da maior geração de calor.

Outra conseqüência é que o Limite de Resistência à Fadiga caiu no ensaio não refrigerado em relação ao refrigerado. Uma análise do quanto este limite caiu não é interesse deste estudo já que se optou por trabalhar apenas com ensaios refrigerados.

### 5.3 Relação entre as propriedades quasi-estáticas

Uma comparação entre Limite de escoamento, Limite de Resistência à Tração e o Limite de Ruptura para o material virgem e danificado é mostrado na Tab. 5.3:

Tabela 5.3 – Ensaio de tração no aço SAE 8620 virgem e danificado

	Limite de Escoamento - (MPa)	Limite de Resistência à Tração- (MPa)	Limite de Ruptura – (MPa)
SAE 8620 virgem	370 ± 10	602 ± 23	432 ± 19
SAE 8620 danificado tensões crescentes	389 ± 9	588 ± 10	418 ± 0
SAE 8620 danificado tensões decrescentes	400 ± 8	571 ± 12	419 ± 1

Os dados indicam um aumento do Limite de Escoamento no material danificado em relação ao material virgem. Em contrapartida, nota-se uma

queda do Limite de Resistência à Tração e do Limite de Ruptura do material danificado, o que pode ser mais facilmente evidenciado nas Fig. 5.2 e 5.3.

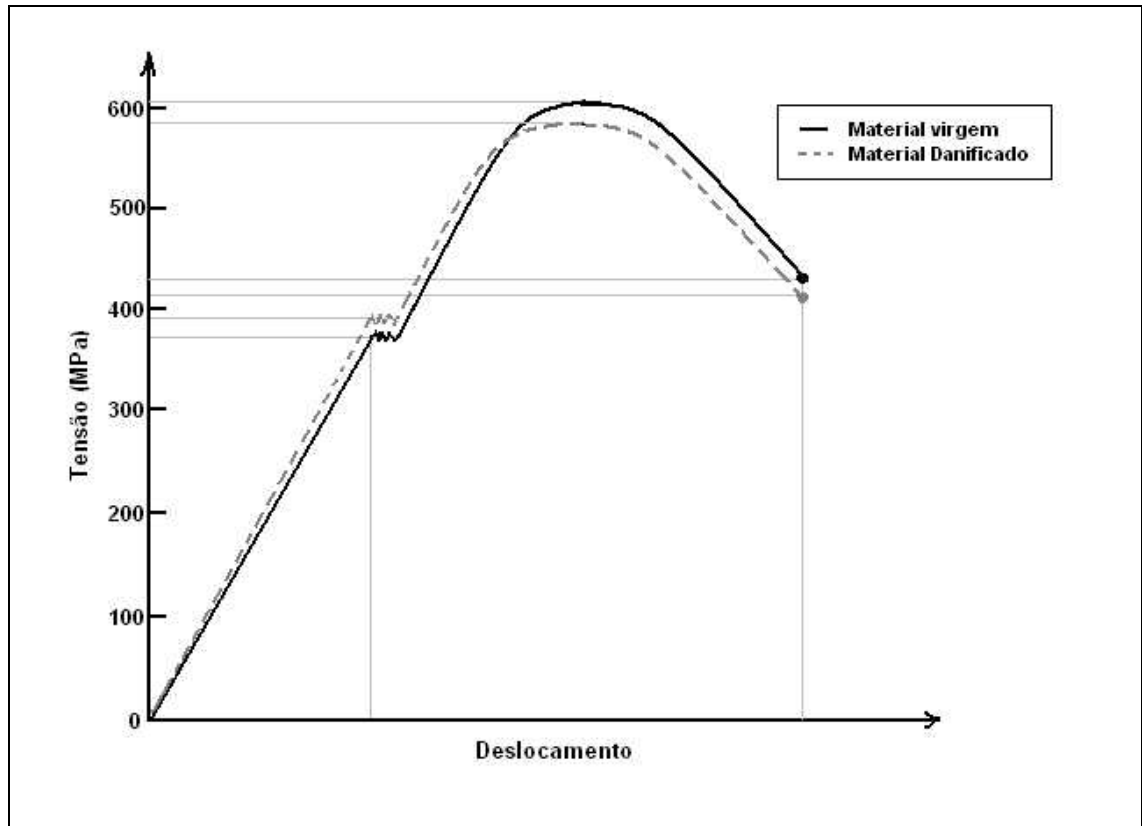


Figura 5.2 – Esboço do ensaio de tração – aço SAE 8620 virgem e danificado

É mostrado na Fig. 5.2 uma esboço das curvas resultantes do ensaio de tração em corpos-de-prova virgens e danificados. Nota-se neste gráfico que o Limite de Escoamento para o material danificado é maior do que para o material virgem. Apesar da dureza do material danificado ser menor do que a dureza do material virgem, como apresentado na Tab. 5.4, a tensão de Escoamento observada segue a tendência contrária. Porém, na fase final do ensaio, o Limite de Resistência à Tração e o Limite de Ruptura apresentam-se menores no material danificado.

Já na Fig. 5.3 é mostrada a diferença entre duas curvas do ensaio de tração, ambas realizadas com material danificado, sendo que uma curva representa um corpo de prova danificado com tensões crescentes e a outra curva representa um corpo de prova danificado com tensões decrescentes. Nota-se que a curva do corpo-de-prova danificado com tensões decrescentes apresenta

um valor maior do Limite de Escoamento, o que é indicativo de um maior encruamento inicial no material. O Limite de Resistência à Tração sofreu uma maior queda nos ensaios com tensões crescentes, o que sugere que a seqüência de cargas crescentes causa maior dano no material.

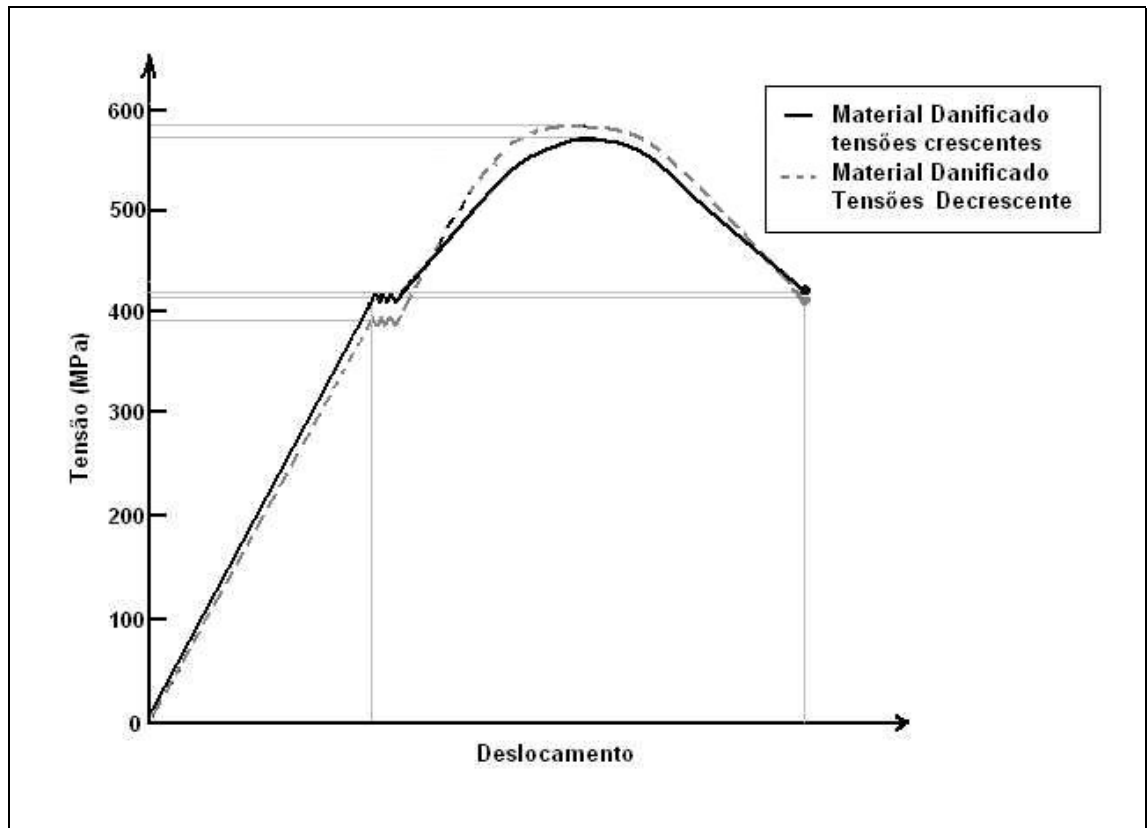


Figura 5.3 – Esboço do ensaio de tração – Curvas dos materiais danificados com tensões crescentes e decrescentes

A dureza inicial caiu em ambas as situações, sendo que o material danificado com tensões crescentes apresenta uma redução maior da dureza do que o material danificado com tensões decrescente, como mostrado na Tab. 5.4. Isto está de acordo com a suposição de que o material com a seqüência de tensões crescentes sofre danos maiores do que aquele com tensões decrescentes (Collins, 1993).

Tabela 5.4 – Ensaio de Dureza no aço SAE 8620 virgem e danificado

SAE 8620 danificado tensões crescentes	
Dureza Vickers Material Virgem	208 ± 3
Dureza Vickers Material Danificado	195 ± 6

SAE 8620 danificado tensões decrescentes	
Dureza Vickers Material Virgem	200 ± 5
Dureza Vickers Material Danificado	192 ± 4

Realizaram-se dois ensaios com o objetivo de confirmar a queda da dureza do material à medida que ocorre o dano. O primeiro ensaio envolveu um corpo-de-prova que foi danificado com cargas crescentes, sendo que a cada troca de cargas foi realizada uma medição de dureza, até o seu rompimento na última carga, como mostrado na Tab. 5.5.

Tabela 5.5 – Ensaio de variação de dureza - Tensões crescentes

Carga (MPa)	Ciclos rodados (n)	Dureza (Vickers)
virgem	-	203
198	195.975	204
217	100.552	202
236	51.528	200
259	22.967	198
259	22.952	196
259	57.854 - rompeu	196

O segundo ensaio envolveu um corpo-de-prova que foi danificado com tensões decrescentes, sendo que a cada troca de tensões foi realizada uma medição

de dureza, até que o seu rompimento na última carga como mostrado na Tab. 5.6.

Tabela 5.6 – Ensaio de variação de dureza - Tensões decrescentes

Carga (MPa)	Ciclos rodados (N)	Dureza (Vickers)
virgem	-	191
259	22.931	185
236	51.785	179
217	100.562	183
198	145.397	183

Nota-se através destes dados que a dureza caiu em torno de 4% em ambos os ensaios. Como o objetivo destes ensaios é somente demonstrar a tendência de queda da dureza, não há dados suficientes para uma análise estatística.

Os resultados dos ensaios de microdureza comparativa entre amostras de um mesmo corpo-de-prova virgem e danificado são mostrados na Tab. 5.5 (os resultados estão em detalhes no Anexo XIV ).

Para ensaios flexo-rotativos realizados com tensões crescentes, registrou-se uma queda da microdureza média de 32 Vickers representando aproximadamente uma queda de 13 a 18 % da dureza virgem.

Para ensaios flexo-rotativos realizados com tensões decrescentes, registrou-se uma queda média da microdureza de 14 Vickers representado aproximadamente uma queda de 6 a 5 % da dureza virgem.

Resumindo-se, pode-se observar que não houve uma tendência clara na variação do Limite de escoamento em função do sentido de aplicação das tensões. O Limite de escoamento depende fundamentalmente do encruamento do material. Em ambos os casos ocorreu um endurecimento cíclico.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de microdureza

Número do C.P.	Número da amostra	Média da Dureza (HV)
C.P 4 ensaio 4 passos com tensões decrescentes	1 sem dano	246 ± 4
	5 com dano	231 ± 5
C.P 8 ensaio 4 passos com tensões decrescentes	2 sem dano	227 ± 6
	6 com dano	214 ± 2
C.P 10 ensaio 4 passos com tensões crescentes	3 sem dano	252 ± 6
	7 com dano	229 ± 5
C.P 13 ensaio 4 passos com tensões crescentes	4 sem dano	257 ± 18
	8 com dano	217 ± 6

De maneira oposta, houve uma tendência maior de queda no Limite de Resistência a Tração e dureza de corpos-de-prova submetidos a tensões crescentes, quando comparados a aqueles submetidos a tensões decrescentes. Este fato está de acordo com outros estudos (Collins, 1993).

#### 5.4 Análise de acúmulo de danos

Nos ensaios de acúmulo de danos executados por flexo-rotação procurou-se aplicar sempre o mesmo dano, tanto nos ensaios com tensões crescentes quanto nos ensaios com tensões decrescentes. Para tal, uma tensão sempre esteve relacionada a um mesmo número de ciclos rodados, não importando a ordem de aplicação das tensões, conforme a Tab. 4.3 até a Tab. 4.8.

Os valores do Limite de Resistência à Fadiga para o material virgem e danificado são apresentados na Tab. 5.6. No caso do material danificado com tensões crescentes houve uma queda média de 15% no Limite de Resistência à Fadiga e no caso do material danificado com tensões decrescentes houve uma queda média de 25% no Limite de Resistência à Fadiga. Em ambos os casos o Limite de Resistência à Fadiga do material danificado teve uma queda significativa. Nota-se porém que, o material danificado com tensões decrescentes apresentou menor Limite de Resistência à Fadiga do que o material danificado com tensões crescentes, ocorrendo assim o oposto do que se esperava. Entretanto o material danificado com tensões decrescentes apresentou uma dispersão maior no resultado, uma faixa de 38 MPa, fazendo com que se aproxime do Limite de Resistência à Fadiga do material danificado com tensões crescentes, na faixa mais alta.

Tabela 5.6 – Comparação entre Limite de Resistência à Fadiga -  $S_e$

$S_e$ - Material virgem (MPa)	$S_e$ – Material Danificado com tensões crescentes (MPa)	$S_e$ – Material danificado com tensões decrescentes (MPa)
$194 \pm 5$	$165 \pm 6$	$145 \pm 19$

Outro fato de interesse é a faixa de dispersão nos dados de ciclos até a falha apresentados na Fig. 5.4. e 5.5. Nestes gráficos, nota-se que a faixa de ciclos até a falha para corpos-de-prova danificados por tensões decrescentes (161.000 até 2.000.000 ciclos) é maior do que a faixa de ciclos até a falha para corpos-de-prova danificados com tensões crescentes ( 90.000 até 152.000 ciclos), provavelmente porque a última tensão a provocar o dano do ensaio com tensões decrescentes não ultrapassou a curva de 1% de probabilidade de falha.

Neste caso, fica mais evidente que a seqüência de tensões crescentes produz rompimentos do corpo-de-prova numa faixa mais reduzida de ciclos (N), o que também reflete em uma menor dispersão do resultado do ensaio “Up-And-Down” para determinar o Limite de Resistência à Fadiga no ensaio com este tipo de seqüência (vide Tab. 5.6).

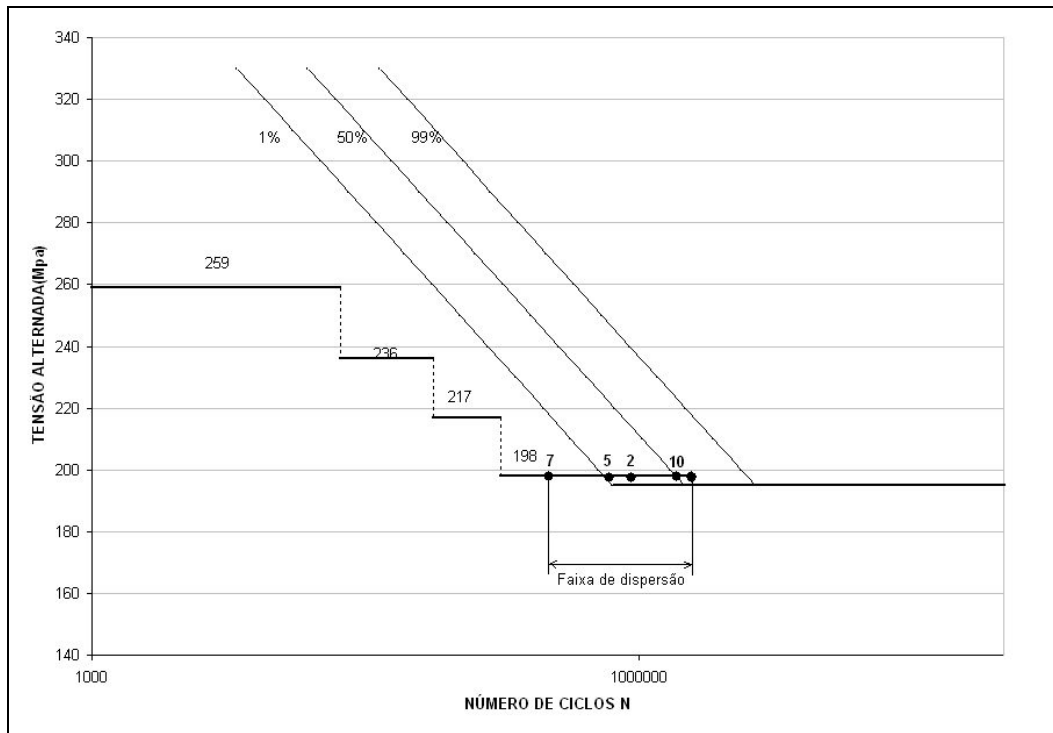


Figura 5.4 – Faixa de dispersão de ciclos até a falha para ensaios com tensões decrescentes

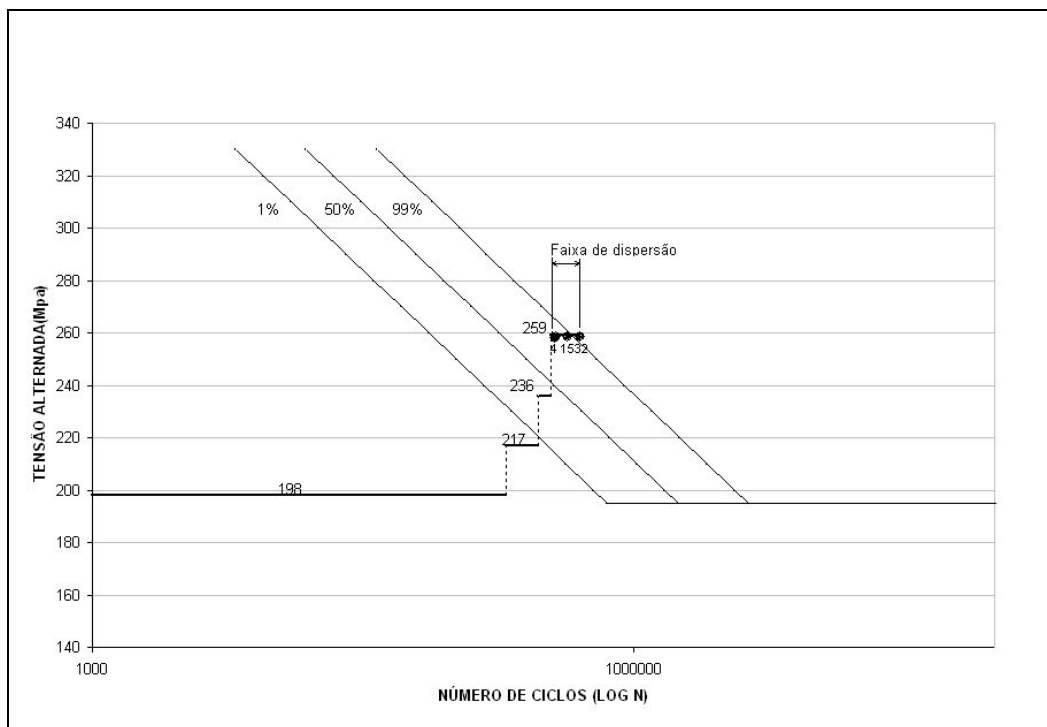


Figura 5.5 – Faixa de dispersão de ciclos até a falha para ensaios com tensões crescentes

### 5.4.1 Comparação dos ensaios de acúmulo de danos

Nota-se através dos dados da Tab. 5.7 que o dano causado pelo ensaio com tensões crescentes é maior (em torno de 3%) do que o dano causado pelo ensaio com tensões decrescentes. Esta mesma tendência reflete-se no número de ciclos rodados no ensaio com tensões crescentes, que é menor ao do descendente. Nota-se ainda que, a dispersão do resultado do número de ciclos é maior no caso das tensões decrescentes, o que foi observado em todas as comparações realizadas.

Tabela 5.7 – Comparação entre os ensaios de quatro passos com tensões crescentes e decrescentes

	Ensaio com tensões crescentes	Ensaio com tensões decrescentes
Número médio de ciclos rodados até a falha ( $\times 10^3$ )	470 $\pm$ 34 (Anexo VI)	1.276 $\pm$ 533* (Anexo XV)
Valor médio do dano segundo a Regra de Palmgren-Miner	2,48 (Anexo XVI)	2,41 (Anexo XVI)

(\*)= média de 5 corpos-de-prova aleatórios da tabela (Anexo XV).

A diferença básica da seqüência 1 para a seqüência 2 é o fato de que a primeira tensão na seqüência 1 (que é o nível mais alto de tensão, 259 MPa) é rodada como a última carga na seqüência 2, fazendo com que a seqüência 2 se assemelhe mais com o teste de tensões crescentes. Assim, é possível observar na Tab. 5.8, o maior dano e o menor número de ciclos rodados para o ensaio com a seqüência 2 .

Tabela 5.8 – Comparação entre os ensaios quatro passos com tensões crescentes/decrescentes seqüência 1 e 2

	Ensaio com tensões crescentes/decrescentes seqüência 1	Ensaio com tensões crescentes/decrescentes seqüência 2
Número médio de ciclos rodados até a falha ( $\times 10^3$ )	627 $\pm$ 159 (Anexo VIII)	523 $\pm$ 269 (Anexo IX)
Valor médio do dano segundo a Regra de Palmegren-Miner	2,00 (Anexo XVI)	3,21 (Anexo XVI)

A mesma tendência observada na Tab. 5.7 volta a se repetir na Tab. 5.9, ou seja, o dano causado pelo ensaio com tensões crescentes é maior (neste caso em torno de 19%) do que o dano causado pelo ensaio com tensões decrescentes. O número de ciclos rodados no ensaio com tensões crescentes é menor, bem como a dispersão do resultado.

Tabela 5.9 – Comparação entre os ensaios 2 passos com tensões crescentes e decrescentes

	Ensaio com tensões crescentes 2 passos	Ensaio com tensões decrescentes 2 passos
Número médio de ciclos rodados até a falha ( $\times 10^3$ )	259 $\pm$ 23 (Anexo X)	331 $\pm$ 158 (Anexo XI)
Valor médio do dano segundo a Regra de Palmegren-Miner	2,76 (Anexo XVI)	2,20 (Anexo XVI)

Realizou-se uma análise dos resultados dos diversos ensaios frente as teorias de acúmulo de danos e observou-se que as teorias de Marco – Starkey, Henry

e Gatts não se aplicam aos dados obtidos. A primeira devido a falta de quantificação do dano durante as várias fases do ensaio, e as outras duas devido ao número elevado de ciclos rodados, fazendo com que haja uma inversão no sinal dos resultados, tornado as equações não aplicáveis.

É mostrado nas Tab. 5.10 e 5.11 os resultados obtidos através das teorias de acúmulo de danos que são aplicáveis ao caso.

Tabela 5.10 - Análise das teorias de acúmulo de danos – Cargas crescentes e decrescentes para ensaios com rompimento do corpo-de-prova

Teoria	Valor médio do dano – Cargas crescentes com rompimento do corpo-de-prova	Valor médio do dano – Cargas decrescentes com rompimento do corpo-de-prova
Palmgren-Miner	2,49 – Anexo XVI	2,42 – Anexo XVI
Corten-Dolan	2,80 – Anexo XVII	3,55 – Anexo XVII
Marin	2,91- Anexo XVIII	4,09 – Anexo XVIII
Manson	Início da trinca em 53.400 ciclos – Anexo XIX	Início da trinca em 89.400 ciclos – Anexo XIX

Tabela 5.11 - Análise das teorias de acúmulo de danos – Cargas crescentes e decrescentes para ensaios sem rompimento do corpo-de-prova

Teoria	Valor médio do dano – Cargas crescentes sem rompimento do corpo-de-prova	Valor médio do dano – Cargas decrescentes sem rompimento do corpo-de-prova
Palmgren-Miner	1,99 – Anexo XVI	1,20 – Anexo XVI
Corten-Dolan	1,51 – Anexo XVII	1,52 – Anexo XVII
Marin	1,63 - Anexo XVIII	1,63 - Anexo XVIII
Manson	Início da trinca em 56.600 ciclos – Anexo XIX	Início da trinca em 93.400 ciclos – Anexo XIX

## **Capítulo 6 - Conclusões e sugestões**

Pode-se obter as seguintes conclusões a partir dos resultados apresentados e das discussões:

- ◆ A simulação do método “Up-And-Down” pelo software MINITAB forneceu uma boa estimativa inicial para Limite de Resistência à Fadiga ( $S_e$ ).
- ◆ Os ensaios de fadiga flexo-rotativos não refrigerados alteram a curva S-N-P, sendo aconselhável a introdução da refrigeração para que os resultados obtidos reflitam o comportamento mecânico do componente sem influência da temperatura.
- ◆ O Limite de Resistência à Fadiga ( $S_e$ ) caiu tanto na aplicação do dano com tensões crescentes, quanto na aplicação do dano com tensões decrescentes. Os valores finais mantiveram-se em faixas próximas.
- ◆ Houve uma tendência para que o dano causado por tensões decrescente provocasse um Limite de Resistência à Fadiga menor porém, este tipo de ensaio apresentou uma dispersão maior nos resultados.
- ◆ A Dureza, o Limite de Resistência à Ruptura e o Limite de Resistência à Tração caíram bastante após a aplicação do dano. Observou-se uma queda maior nos resultados dos ensaios com tensões crescentes sendo que a propriedade dureza teve uma queda mais acentuada.
- ◆ O Limite de escoamento do material danificado foi maior do que o material virgem, contrariando a tendência das outras propriedades mecânicas. A razão deve-se ao endurecimento cíclico.
- ◆ A análise das teorias de acúmulo de danos apresentou dados que indicam um maior dano se o ensaio é conduzido com tensões crescentes

Pode-se fazer as seguintes sugestões para desenvolvimento futuro:

- ◆ A comparação do dano entre corpos-de-prova com e sem tratamento superficial.
- ◆ A comparação do dano entre corpos-de-prova e componentes simples.
- ◆ A verificação da influência de entalhes na vida do componente.

## Referências Bibliográficas

- ASM *Fractography*, 1987, *ASM Handbook*, Vol. 12, 9ª edição, Metals Park, Ohio.
- ASTM E 466-96, “Standart Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials”.
- Bannantine, J.A, et al., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Pretice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Canfield, R.E. e Villaire, M. A., 1992, “*The Development of Accelerated Component Durability Test Cycles Using Fatigue Sensitive Editing Techniques*”, Congresso Internacional da SAE, n.920660, Anais em CD-Rom, pág. 69-81.
- Catálogo Villares, 1992, *Aços para Construção Mecânica – Aços para Cimentação*, ref. 4203.5.
- Cazaud, R., 1957, *La Fadiga de los Metales*, Editora Aguilar, Madrid, Espanha, Tradução da 3ª edição francesa, pág. 144-146
- Collins, J.A., 1993, *Failure of Materials in Mechanical Design*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, USA.
- Corten, H.T., e Dolan, T.J., 1956, “*Cumulative Fatigue Damage*”, *Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals*”, ASME and IME, pág.235.
- Gatts, R.R, 1961, “*Application of a Cumulative Damage Concept to Fatigue*”, ASME Transaction, 83, Series D, N° 4, pág. 529.
- Gong, Y. e Norton, M.P., 1996, “*Fatigue Under Stress Cycling With Nonzero Means*”, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol.24, n. 4, july 1996, pág. 263-267.
- Goswami, T., 1997, “*Low Cycle Fatigue Life Prediction – A New Model*”, *Int. J. Fatigue*, Vol.19, n.2 pág. 109-115.
- Henry, D.L., 1955, “*Theory of a Fatigue Damage Accumulation in Steel*”, ASME Transactions, 77 pág.913.

- Manson, S.S., e Halford, G.R., 1981, “*Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve Approach for Treating Cumulative Fatigue Damage*”, Int. J. Fract., Vol. 17, N° 2, pág. 169-172.
- Manson, S.S., e Hirschberg, M.H., 1964, “*Fatigue: An Interdisciplinary Approach*”, Syracuse University Press, Syracuse, N.Y., pág. 133.
- Manson, S.S., et al., 1967, “*Applications of a Double Linear Damage Rule to Cumulative Fatigue*”, Fatigue Crack Propagation, STP-415, ASTM, Philadelphia, pág.384.
- Mansur, T. R., et al., 2000, “*Limite de Resistência à Fadiga: Uma nova proposta para sua determinação*”, XII ENFIR - Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, Anais em CD-Rom.
- Marco, S.M., e Starkey, 1954 W.L., “*A Concept of Fatigue Damage*”, ASME Transactions, 76, pág. 627.
- Marin, J., 1962, *Mechanical Behavior of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y.
- Massing, G., 1926, “*Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Cong. Appl. Mech.*”, Zurich.
- Miner, M.A., 1945, “*Cumulative Damage in Fatigue*”, ASME – Journal of Applied Mechanics, september, 1945, pág. A/159-A/164.
- Palma, E. S. et al., 1999, “*Determinação do Limite de Resistência à Fadiga: Comparação Entre Ensaios Experimentais e Simulações Estatísticas*”, XV Cobem – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
- Prot, E.M., 1952, “*Fatigue Testing Under Progressive Loading*”, A New Technique for Testing Materials, WADC TR52-148, September.
- Ridder, R.L., et al., 1993, “*Reliability Analysis of an Automotive Wheel Assembly*”, Congresso Internacional da SAE, n.930406, Anais em CD-Rom, pág. 225-235.
- SAE Handbook, 1993, “*Chemical Compositions of SAE Alloy Steels*”, SAE J404 Apr 1994, pág. 1.12-1.13.

- Smith, W.F., 1981, *Structure and Properties of Engineering Alloys*, McGraw-Hill Book Company, U.S.A, pág. 149.
- Suresh, S., 1998, *Fatigue of Materials*, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wöhler, A., 1860, “*Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagen-Achsen*”, Zeitschrift für Bauwesen.
- Yang, X., et al., 1997, “*A Continuous Low Cycle Fatigue Damage Model and Its Application in Engineering Materials*”, Int. J. Fatigue, Vol.19, n.10 pág. 687-692.

## Anexos

### Anexo I – Análise química

Certificado de análise Química N° IN00425/98

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Total de amostras 20 – Método empregado: Fluorescência de raios X

AMOSTRA	Mo %	Cu %	Ni %	Mn %	Cr %	Si %	S %	P %	Al %
Amostra 01	0,14	0,039	0,41	0,79	0,49	0,33	0,008	0,015	0,009
Amostra 02	0,13	0,039	0,41	0,78	0,48	0,35	0,009	0,016	0,010
Amostra 03	0,14	0,035	0,42	0,79	0,49	0,33	0,008	0,014	0,009
Amostra 04	0,14	0,037	0,43	0,80	0,49	0,34	0,008	0,014	0,008
Amostra 05	0,14	0,038	0,42	0,80	0,49	0,33	0,008	0,014	0,010
Amostra 06	0,14	0,039	0,42	0,82	0,51	0,31	0,008	0,014	0,008
Amostra 07	0,15	0,040	0,42	0,81	0,49	0,34	0,008	0,014	0,010
Amostra 08	0,13	0,042	0,42	0,82	0,50	0,31	0,008	0,015	0,009
Amostra 09	0,14	0,040	0,43	0,82	0,51	0,33	0,009	0,015	0,009
Amostra 10	0,14	0,036	0,43	0,82	0,49	0,33	0,008	0,014	0,009

AMOSTRA	Mo %	Cu %	Ni %	Mn %	Cr %	Si %	S %	P %	Al %
Amostra 11	0,13	0,033	0,44	0,84	0,51	0,32	0,008	0,015	0,008
Amostra 12	0,12	0,041	0,41	0,77	0,47	0,34	0,008	0,014	0,009
Amostra 13	0,14	0,038	0,43	0,82	0,51	0,33	0,008	0,014	0,010
Amostra 14	0,12	0,037	0,43	0,83	0,51	0,33	0,008	0,015	0,009
Amostra 15	0,13	0,044	0,43	0,83	0,50	0,33	0,009	0,016	0,009
Amostra 16	0,12	0,034	0,42	0,81	0,49	0,32	0,008	0,015	0,009
Amostra 17	0,13	0,037	0,42	0,83	0,51	0,33	0,008	0,015	0,009
Amostra 18	0,13	0,038	0,43	0,83	0,50	0,37	0,009	0,015	0,010
Amostra 19	0,12	0,038	0,43	0,84	0,52	0,32	0,007	0,015	0,009
Amostra 20	0,13	0,038	0,43	0,82	0,51	0,31	0,008	0,015	0,009

### Anexo II – Ensaio de rugosidade superficial

Conforme Relatório Técnico RC-AT1-001/1999 do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN - M.G.

A medição da rugosidade, foi feita em 3 corpos-de-prova, escolhidos aleatoriamente. Foram executadas 90 medições, 30 em cada corpo-de-prova.

A rugosidade média (Ra) encontrada foi :

CP-01 – 0,015  $\mu\text{m}$ ;

CP-02 – 0,02  $\mu\text{m}$ ;

CP-03 – 0,025  $\mu\text{m}$ .

### Anexo III – Ensaio de microdureza

Tabela – Resultados de microdureza Vickers com carga de 200 gramas nos corpos-de-prova 02, 06, 08, 10, 12 e 20 – material virgem.

Número da medida	CP-02	CP-06	CP-08	CP-10	CP-12	CP-20
1	283	357	306	309	281	256
2	266	290	276	311	270	238
3	285	266	294	294	294	258
4	285	317	292	299	268	317
5	285	327	322	314	330	262
6	268	309	262	290	290	294
Média por CP	279	311	292	303	289	271
Desvio Padrão	9	31	21	10	23	29
Média Total	290 $\pm$ 15					

**Anexo IV – Ensaio de Tração**

Tabela – Valores de ensaios de tração para o aço SAE-8620

CP	Limite de Escoamento (0,2%) MPa	Limite de Resistência MPa	A (%)	S (%)	Limite de Ruptura (MPa)
1	372	588	23	39	418
2	353	588	21	41	418
3	382	627	18	40	458
4	372	627	21	37	448
5	372	578	24	39	418
Média	370,2	601,6	21,4	39,2	432
Desvio Padrão	10,54	23,54	2,30	1,48	19,49

Na, “A” é o alongamento do corpo-de-prova e “S” é a redução de área.

**Anexo V – Ensaio de dureza**

Tabela – Dureza do aço SAE 8620 virgem

Corpo-de-prova	Dureza Média (Vickers)	Corpo-de-prova	Dureza Média (Vickers)
01	178	11	191
02	156	12	184
03	190	13	174
04	190	14	178
05	179	15	184
06	200	16	191
07	195	17	175
08	194	18	187
09	192	19	190
10	182	20	190

**Anexo VI - Ensaio flexo-rotativo – Tensões crescentes**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
Tensões Crescentes ( Primeiros 5 corpos-de-prova foram levados à ruptura, demais foram levados à 30 % de dano)			08-2000
Número Máquina	Número Corpo de Prova	Carga	Ciclos
2	1	198	195.918
		217	100.520
		236	51.538
		259	89.260 - rompeu
2	2	198	195.926
		217	100.548
		236	51.525
		259	153.584 – rompeu
2	3	198	195.931
		217	100.519
		236	51.499
		259	152.921 - rompeu
2	4	198	195.921
		217	100.531
		236	51.541
		259	83.916 – rompeu
2	5	198	195.916
		217	100.527
		236	51.526
		259	128.374 – rompeu
2	6	198	195.949
		217	100.534
		236	51.611
		259	22.908 – íntegro
2	7	198	195.860
		217	100.504
		236	51.506
		259	22.944 – íntegro
2	8	198	195.962
		217	103.516
		236	51.577
		259	22.900 – íntegro
2	9	198	Corpo-de-prova eliminado devido à problemas de fixação
		217	
		236	
		259	

2	10	198	195.926
		217	100.538
		236	51.545
		259	22.931 - íntegro
2	11	198	196.005
		217	100.546
		236	51.535
		259	23.000 - íntegro
2	12	198	195.996
		217	100.554
		236	51.557
		259	22.997 - íntegro
2	13	198	195.993
		217	100.563
		236	51.573
		259	22.952 - íntegro
2	14	198	195.960
		217	100.574
		236	51.586
		259	23.049 - íntegro
2	15	198	196.135
		217	100.571
		236	52.009
		259	22.999 - íntegro
2	16	198	196.042
		217	100.583
		236	51.597
		259	23.006
2	17	198	196.181
		217	100.631
		236	51.637
		259	23.088
2	18	198	195.981
		217	100.577
		236	51.586
		259	23.043
2	19	198	196.028
		217	100.660
		236	51.574
		259	22.971
2	20	198	195.967
		217	100.569
		236	53.645
		259	23.000
2	21	198	195.935
		217	100.538
		236	51.536
		259	23.032

Resultados : 16 corpos de prova íntegros; 4 rompidos

N. corpos-de-prova para o ensaio de tração = 16,17,18

N. corpos-de-prova para metalografia = 19

N. corpos-de-prova para o Ensaio Up-And-Down = 06, 07, 08, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21.

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. De Análise de Tensões - CDTN/CNEN

### Anexo VII – Ensaio flexo-rotativo – Tensões decrescentes

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
Tensões Decrescentes (Todos os Corpos-de-Prova foram levados à 30% de dano)			08 - 2000
Número Máquina	Número Corpo de Prova	Carga	Ciclos
1	1	259	22.921
		236	51.553
		217	100.539
		198	195.978
1	2	259	22.969
		236	51.556
		217	100.168
		198	196.008
1	3	259	22.935
		236	51.547
		217	100.532
		198	196.692
1	4	259	22.916
		236	51.529
		217	100.511
		198	196.226
1	5	259	22.979
		236	51.542
		217	100.544
		198	198.434

1	6	259	22.941
		236	51.540
		217	100.465
		198	195.949
1	7	259	23.727
		236	51.539
		217	100.551
		198	195.955
1	8	259	22.983
		236	51.573
		217	100.525
		198	195.966
1	9	259	22.934
		236	51.585
		217	100.525
		198	197.185
1	10	259	22.948
		236	51.545
		217	100.558
		198	195.987
1	11	259	22.956
		236	51.553
		217	100.558
		198	195.986
1	12	259	22.962
		236	51.543
		217	100.552
		198	196.021
1	13	259	22.967
		236	51.555
		217	100.538
		198	196.010
1	14	259	22.948
		236	51.541
		217	100.591
		198	195.998
1	15	259	22.930
		236	51.559
		217	100.594
		198	195.988

Resultados: todos íntegros

N. corpos-de-prova para ensaio de tração: 11, 12, 13.

N. corpos-de-prova para Metalografia: 14.

N. corpos-de-prova para Ensaio Up-And-Down: 01 ao 10 e 15

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. De Análise de Tensões - CDTN/CNEN

**Anexo VIII - Ensaio flexo-rotativo – Tensões crescentes/decrescentes seqüência 1**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
Tensões Crescente e Decrescente Seqüência 1			03-10-2000
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga	Ciclos
2	1	259	25.023
		198	200.027
		236	60.131
		217	588.670- Rompeu
2	2	259	25.070
		198	200.050
		236	60.118
		217	105.560- Rompeu
2	3	259	25.018
		198	200.053
		236	60.020
		217	396.228- Rompeu
2	4	259	25.042
		198	200.050
		236	61.270
		217	382600- Rompeu
2	5	259	25.825
		198	201.060
		236	61.121
		217	273.380- Rompeu
2	6	259	25.024
		198	200.138
		236	60.050
		217	300.334- Rompeu

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. Análise de Tensões – CDTN/CNEN

**Anexo IX - Ensaio flexo-rotativo – Tensões crescentes/decrescentes  
seqüência 2**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
Tensões Crescentes e Decrescentes - Seqüência 2			
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga	Ciclos
2	1	198	200.326
		236	60.051
		217	100.252
		259	680.063 - Rompeu
2	2	198	200.067
		236	60.057
		217	100.010
		259	29.163 - Rompeu
2	3	198	200.212
		236	60.034
		217	100.051
		259	129.483 - Rompeu
2	4	198	200.024
		236	60.017
		217	100.083
		259	185.701 - Rompeu
2	5	198	200.022
		236	60.014
		217	23.638 – Rompeu
		259	-----
2	6	198	200.171
		236	60.027
		217	100.019
		259	31.694 - Rompeu

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. Análise de Tensões - CDTN/CNEN

**Anexo X - Ensaio flexo-rotativo – Tensões crescentes – 2 passos**

Tipo de ensaio flexo-rotativo		Data	
		22-09-2000	
<b>Tensões Crescentes – 2 Passos</b> (Corpos-de-prova levados à ruptura na segunda carga)			
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga	Ciclos
M2	1	236	86.561
		259	153.632
M2	2	236	85.936
		259	198.470
M2	3	236	86.548
		259	165.414

Resultados: **Todos os corpos-de-prova rompidos.**

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. De Analise de Tensões - CDTN/CNEN

**Anexo XI - Ensaio flexo-rotativo – Tensões decrescentes – 2 passos**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
<b>Tensões Decrescentes - 2 Passos</b> (Corpos-de-prova levados à ruptura na segunda carga)			<b>22-09-2000</b>
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga (MPa)	Ciclos
M2	1	259	38.244
		236	416.333
M2	2	259	38.254
		236	215.258
M2	3	259	38.287
		236	129.066
M2	4	259	38.243
		236	502.418
M2	5	259	38.264
		236	201.680

**Resultados: Todos os corpos-de-prova rompidos.**

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. De Analise de Tensões - CDTN/CNEN

**Anexo XII – Ensaio Up-And-Down – Tensões crescentes**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
Up-And-Down do ensaio com Tensões Crescentes (o corpo-de-prova é levado à ruptura ou à 2.000.000 de ciclos usando-se uma carga pré - determinada)			
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga	Ciclos
M2	6	198	Rompeu com 974.109
M2	7	178	Rompeu com 1.260.373
M2	8	168	Rompeu com 589.158
M2	10	148	Não rompeu
M2	11	158	Não rompeu
M2	12	168	Rompeu com 1.161.297
M2	13	158	Não rompeu
M2	14	168	Não rompeu
M2	15	178	Rompeu com 1.566.359
M2	20	168	Rompeu com 937.323
M2	21	158	Rompeu com 771.831

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. Análise de Tensões - CDTN/CNEN

**Anexo XIII – Ensaio Up-And-Down – Tensões decrescentes**

Tipo de ensaio flexo-rotativo			Data
<b>Up-And-Down do ensaio com Tensões Decrescentes</b> (o corpo-de-prova é levado à ruptura ou à 2.000.000 de ciclos usando-se uma carga pré - determinada)			<b>09-2000</b>
Número Máquina	Número Corpo de prova	Carga	Ciclos
M1	1	235	Rompeu com 8.356
M1	2	198	Rompeu com 780.447
M1	3	178	Rompeu com 1.334.216
M1	4	149	Não rompeu
M1	5	168	Rompeu com 1.625.765
M1	6	149	Rompeu com 905.795
M1	7	135	Rompeu com 235.593
M1	8	117	Não rompeu
M1	9	135	Não rompeu
M1	10	149	Não rompeu
M1	15	168	Rompeu com 772.792

Realizado por: Álvaro Alvarenga Júnior

Local: Lab. Análise de Tensões - CDTN/CNEN

## Anexo XIV – Ensaio de microdureza após dano

Ensaio de Microdureza para determinação de variação sob acúmulo de danos							
Número do C.P.	Número da amostra	Número da medida	Diagonal 1	Diagonal 2	Média da diagonal	Dureza (HV)	Média da Dureza (HV)
C.P 4 ensaio 4 passos com tensões decrecentes	1 sem dano	1	38,75	38,75	38,75	247	246 ± 4
		2	38,25	40,00	39,12	242	
		3	38,75	38,00	38,37	252	
		4	37,75	40,00	38,87	242	
		5	40,00	38,25	39,12	242	
	5 com dano	1	39,75	40,75	40,25	229	231 ± 5
		2	39,50	40,00	39,75	235	
		3	40,75	40,75	40,75	224	
		4	40,00	40,25	40,12	231	
		5	39,75	39,75	39,75	235	
C.P 8 ensaio 4 passos com tensões decrecentes	2 sem dano	1	39,25	41,00	40,12	231	227 ± 6
		2	40,00	40,25	40,12	231	
		3	40,50	41,00	40,75	224	
		4	41,00	41,75	41,37	217	
		5	41,00	40,00	40,05	232	
	6 com dano	1	42,25	41,00	41,62	214	214 ± 2
		2	41,25	42,25	41,75	213	
		3	42,25	40,25	41,25	218	
		4	41,00	42,75	41,87	212	
		5	43,00	40,50	41,75	213	
C.P 10 ensaio 4 passos com tensões crescentes	3 sem dano	1	38,50	38,00	38,25	254	252 ± 6
		2	38,50	39,50	39,00	244	
		3	37,75	38,00	37,87	260	
		4	39,00	38,00	38,50	250	
		5	38,50	38,00	38,25	254	
	7 com dano	1	39,25	40,50	39,87	234	229 ± 5
		2	40,00	40,00	40,00	232	
		3	41,75	40,00	40,87	223	
		4	40,00	40,00	40,00	232	
		5	42,00	39,50	40,75	224	
C.P 13 ensaio 4 passos com tensões crescentes	4 sem dano	1	40,00	40,00	40,00	232	257 ± 18
		2	38,25	38,25	38,25	254	
		3	39,75	37,00	38,37	253	
		4	37,50	37,00	37,25	268	
		5	36,25	36,50	36,37	280	
	8 com dano	1	42,00	41,00	41,50	215	217 ± 6
		2	40,00	41,00	40,50	226	
		3	43,50	40,00	41,75	213	
		4	40,00	42,00	41,00	221	
		5	42,00	41,00	41,75	213	

**Anexo XV – Ensaio flexo-rotativo – Tensões decrescentes**

Tipo de ensaio			Data
Cargas Descendentes – SSD (este ensaio levou o corpo-de-prova à ruptura ou à 2.000.000 de ciclos)			05-2000
Número Máquina	Número Corpo de Prova	Carga	Ciclos
M2	2	259	22.989
		236	51.649
		217	100.611
		198	780.482 - rompeu
M2	5	259	28.758
		236	51.493
		217	100.593
		198	625.662 - rompeu
M2	7	259	22.953
		236	51.708
		217	100.576
		198	161.401 - rompeu
M2	10	259	22.956
		236	51.577
		217	100.585
		198	1.799.476 - rompeu
M2	14	259	22.953
		236	51.570
		217	101.091
		198	1.127.731 - rompeu
M2	18	259	22.958
		236	51.598
		217	100.596
		198	1.547.665 - rompeu
M2	19	259	22.646
		236	51.497
		217	101.429
		198	1.660.861 - rompeu
M2	23	259	22.948
		236	51.574
		217	100.599
		198	744.842 - rompeu

Obs.: estão relacionados apenas os corpos-de-prova que romperam antes de atingir a vida útil de 2.000.000 ciclos  
 Realizado por: Tanius Rodrigues Mansur ( C.P. 1 ao 22) e Álvaro Alvarenga Júnior ( C.P. 23 e 24 )

**Anexo XVI – Análise do dano pela regra de Palmgrem-Miner**

Regra Palmgrem-Miner - Descendente - com rompimento do corpo-de-prova														
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Σ ni/Ni	Valor Médio de Σ ni/Ni
	259			236			217			198				
	Cícl	Cícl	n1/N1	Cícl	Cícl	n2/N	Cícl	Cícl	n3/N	Cícl	Cícl	n4/N		
Aplica	1%		Aplica	1%	2	Aplica	1%	3	Aplica	1%	4			
dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha				
2	22989	76567	0,30	51649	171829	0,30	100611	335041	0,30	780482	653279	1,19	2,10	2,42
5	28758	76567	0,38	51493	171829	0,30	100593	335041	0,30	625662	653279	0,96	1,93	
7	22953	76567	0,30	51708	171829	0,30	100576	335041	0,30	161401	653279	0,25	1,15	
10	22965	76567	0,30	51577	171829	0,30	100585	335041	0,30	1799476	653279	2,75	3,65	
14	22953	76567	0,30	51570	171829	0,30	101091	335041	0,30	1127731	653279	1,73	2,63	
18	22958	76567	0,30	51598	171829	0,30	100596	335041	0,30	1547665	653279	2,37	3,27	
19	22646	76567	0,30	51497	171829	0,30	101429	335041	0,30	1660861	653279	2,54	3,44	
22	22950	76567	0,30	51571	171829	0,30	100474	335041	0,30	413915	653279	0,63	1,53	
23	22948	76567	0,30	51574	171829	0,30	100599	335041	0,30	744842	653279	1,14	2,04	

Regra Palmgrem-Miner - Ascendente - com rompimento do corpo-de-prova														
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Σ ni/Ni	Valor Médio de Σ ni/Ni
	198			217			236			259				
	Cícl	Cícl	n1/N	Cícl	Cícl	n2/N	Cícl	Cícl	n3/N	Cícl	Cícl	n4/N		
Aplica	1%	1	Aplica	1%	2	Aplica	1%	3	Aplica	1%	4			
dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha				
1	195918	653279	0,30	100520	335041	0,30	51538	171829	0,30	89260	76567	1,17	2,07	2,49
2	195926	653279	0,30	100548	335041	0,30	51525	171829	0,30	153584	76567	2,01	2,91	
3	195931	653279	0,30	100519	335041	0,30	51499	171829	0,30	152921	76567	2,00	2,90	
4	195921	653279	0,30	100531	335041	0,30	51541	171829	0,30	83916	76567	1,10	2,00	
5	195916	653279	0,30	100527	335041	0,30	51526	171829	0,30	128374	76567	1,68	2,58	

Regra Palmgrem-Miner Ascendente/descendente – sequência 1- com rompimento do corpo-de-prova														
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Σ ni/Ni	Valor Médio de Σ ni/Ni
	259			198			236			217				
	Cícl	Cícl	n1/N1	Cícl	Cícl	n2/N	Cícl	Cícl	n3/N3	Cícl	Cícl	n4/N		
Aplica	1%		Aplica	1%	2	Aplica	1%		Aplica	1%	4			
dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha		dos	Falha				
1	25023	76567	0,33	200027	653279	0,31	60131	171829	0,35	588670	335041	1,76	2,74	2,01
2	25070	76567	0,33	200050	653279	0,31	60118	171829	0,35	105560	335041	0,32	1,30	
3	25018	76567	0,33	200053	653279	0,31	60020	171829	0,35	396228	335041	1,18	2,16	
4	25042	76567	0,33	200050	653279	0,31	61270	171829	0,36	382600	335041	1,14	2,13	
5	25825	76567	0,34	201060	653279	0,31	61121	171829	0,36	273380	335041	0,82	1,82	
6	25024	76567	0,33	200138	653279	0,31	60050	171829	0,35	300334	335041	0,90	1,88	

Regra Palmegrem-Miner Ascendente/descendente - sequência 2 - com rompimento do corpo-de-prova														
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			$\Sigma$ ni/Ni	Valor Médio de $\Sigma$ ni/Ni
	198			236			217			259				
	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n1/N1	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n2/N2	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n3/N3	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n4/N4		
1	200326	653279	0,31	60051	171829	0,35	100252	335041	0,30	680063	76567	8,88	9,84	3,22
2	200067	653279	0,31	60057	171829	0,35	100010	335041	0,30	29163	76567	0,38	1,34	
3	200212	653279	0,31	60034	171829	0,35	100051	335041	0,30	129483	76567	1,69	2,65	
4	200024	653279	0,31	60017	171829	0,35	100083	335041	0,30	185701	76567	2,43	3,38	
5	200022	653279	0,31	60014	171829	0,35	23638	335041	0,07	0	76567	0,00	0,73	
6	200171	653279	0,31	60027	171829	0,35	100019	335041	0,30	31694	76567	0,41	1,37	

Regra Palmegrem-Miner Ascendente 2 Passos - com rompimento do corpo-de-prova								
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			$\Sigma$ ni/Ni	Valor Médio de $\Sigma$ ni/Ni
	236			259				
	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n1/N1	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n2/N2		
1	86561	171829	0,50	153632	76567	2,01	2,51	2,76
2	85936	171829	0,50	198470	76567	2,59	3,09	
3	86548	171829	0,50	165414	76567	2,16	2,66	

Regra Palmegrem-Miner Descendente 2 Passos - com rompimento do corpo-de-prova								
Corpo de Prova	Tensão Alternada, Mpa			Tensão Alternada, Mpa			$\Sigma$ ni/Ni	Valor Médio de $\Sigma$ ni/Ni
	259			236				
	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n1/N1	Círculos Aplicados	Círculos 1% Falha	n2/N2		
1	38244	76567	0,50	416333	171829	2,42	2,92	2,20
2	38254	76567	0,50	215258	171829	1,25	1,75	
3	38287	76567	0,50	129066	171829	0,75	1,25	
4	38243	76567	0,50	502418	171829	2,92	3,42	
5	38264	76567	0,50	201680	171829	1,17	1,67	

## Anexo XVII - – Análise do dano pela regra de Corten-Dolan

Teoria Corten-Dolan - 1%									
Cargas Descendentes com Rompimento									
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - N1	Constante do Material - d	ni/N1	(Si/S1)^d	Dano Parcial	Dano	Média Dano
2	259	22989	76567	6.57	0.300246843	1	0.300246843	2,823286745	3,549217113
	236	51649	76567	6.57	0.674559536	0.542816	0.366161514		
	217	100611	76567	6.57	1.314025625	0.312724	0.41092715		
	198	780482	76567	6.57	10.19345149	0.171282	1.745951238		
5	259	28758	76567	6.57	0.375592618	1	0.375592618	2,551118134	
	236	51493	76567	6.57	0.672522105	0.542816	0.365055565		
	217	100593	76567	6.57	1.313790536	0.312724	0.410853632		
7	198	625662	76567	6.57	8.171431557	0.171282	1.399616319	1,438197381	
	259	22953	76567	6.57	0.299776666	1	0.299776666		
	236	51708	76567	6.57	0.675330103	0.542816	0.36657979		
10	217	100576	76567	6.57	1.313568509	0.312724	0.410784199	5,101745676	
	198	161401	76567	6.57	2.107970797	0.171282	0.361056726		
	259	22956	76567	6.57	0.299815848	1	0.299815848		
14	236	51577	76567	6.57	0.673619183	0.542816	0.365651076	3,601018775	
	217	100585	76567	6.57	1.313686053	0.312724	0.410820957		
	198	1799476	76567	6.57	23.50197866	0.171282	4.025457795		
	259	22953	76567	6.57	0.299776666	1	0.299776666		
18	236	51570	76567	6.57	0.67352776	0.542816	0.36560145	4,538660199	
	217	101091	76567	6.57	1.320294644	0.312724	0.412887622		
	198	1127731	76567	6.57	14.72868207	0.171282	2.522753037		
	259	22958	76567	6.57	0.299841968	1	0.299841968		
19	236	51598	76567	6.57	0.673893453	0.542816	0.365799954	4,790492879	
	217	100596	76567	6.57	1.313829718	0.312724	0.410865885		
	198	1547665	76567	6.57	20.21321196	0.171282	3.462152392		
	259	22646	76567	6.57	0.295767106	1	0.295767106		
19	236	51497	76567	6.57	0.672574347	0.542816	0.365083922	4,790492879	
	217	101429	76567	6.57	1.324709078	0.312724	0.41426812		
	198	1660861	76567	6.57	21.69160343	0.171282	3.71537373		

Teoria Corten-Dolan - 1%									
Cargas Ascendentes com Rompimento									
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - N1	Constante do Material - d	ni/N1	(Si/S1)^d	Dano Parcial	Dano	Média Dano
1	198	195918	76567	6.57	2.558779	0.171282	0.438272	2,379978	2,802457225
	217	100520	76567	6.57	1.312837	0.312724	0.410555		
	236	51538	76567	6.57	0.67311	0.542816	0.365375		
	259	89260	76567	6.57	1.165776	1	1.165776		
2	198	195926	76567	6.57	2.558883	0.171282	0.43829	3,220119	
	217	100548	76567	6.57	1.313203	0.312724	0.41067		
	236	51525	76567	6.57	0.67294	0.542816	0.365282		
3	259	153584	76567	6.57	2.005877	1	2.005877	3,211169	
	198	195931	76567	6.57	2.558948	0.171282	0.438301		
	217	100519	76567	6.57	1.312824	0.312724	0.410551		
	236	51499	76567	6.57	0.6726	0.542816	0.365098		
4	259	152921	76567	6.57	1.997218	1	1.997218	2,310256	
	198	195921	76567	6.57	2.558818	0.171282	0.438279		
	217	100531	76567	6.57	1.312981	0.312724	0.4106		
	236	51541	76567	6.57	0.673149	0.542816	0.365396		
5	259	83916	76567	6.57	1.095981	1	1.095981	2,890764	
	198	195916	76567	6.57	2.558752	0.171282	0.438267		
	217	100527	76567	6.57	1.312929	0.312724	0.410584		
	236	51526	76567	6.57	0.672953	0.542816	0.36529		
5	259	128374	76567	6.57	1.676623	1	1.676623		

Teoria Corten-Dolan - 1%									
Cargas Descendentes sem Rompimento									
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - N1	Constante do Material - d	ni/N1	(Si/S1)^d	Dano Parcial	Dano	Média Dano
1	259	22921	76567	6,57	0,299359	1	0,299359	1,513879	1,516384
	236	51553	76567	6,57	0,673306	0,542816	0,365481		
	217	100539	76567	6,57	1,313085	0,312724	0,410633		
	198	195978	76567	6,57	2,559562	0,171282	0,438406		
2	259	22969	76567	6,57	0,299986	1	0,299986	1,513079	
	236	51556	76567	6,57	0,673345	0,542816	0,365502		
	217	100168	76567	6,57	1,30824	0,312724	0,409118		
	198	196008	76567	6,57	2,559954	0,171282	0,438473		
3	259	22935	76567	6,57	0,299542	1	0,299542	1,515588	
	236	51547	76567	6,57	0,673227	0,542816	0,365438		
	217	100532	76567	6,57	1,312994	0,312724	0,410604		
	198	196692	76567	6,57	2,568887	0,171282	0,440003		
4	259	22916	76567	6,57	0,299293	1	0,299293	1,514084	
	236	51529	76567	6,57	0,672992	0,542816	0,365311		
	217	100511	76567	6,57	1,31272	0,312724	0,410519		
	198	196226	76567	6,57	2,562801	0,171282	0,438961		
5	259	22979	76567	6,57	0,300116	1	0,300116	1,520073	
	236	51542	76567	6,57	0,673162	0,542816	0,365403		
	217	100544	76567	6,57	1,313151	0,312724	0,410654		
	198	198434	76567	6,57	2,591639	0,171282	0,4439		
6	259	22941	76567	6,57	0,29962	1	0,29962	1,513681	
	236	51540	76567	6,57	0,673136	0,542816	0,365389		
	217	100465	76567	6,57	1,312119	0,312724	0,410331		
	198	195949	76567	6,57	2,559183	0,171282	0,438341		
7	259	23727	76567	6,57	0,309885	1	0,309885	1,524304	
	236	51539	76567	6,57	0,673123	0,542816	0,365382		
	217	100551	76567	6,57	1,313242	0,312724	0,410682		
	198	195955	76567	6,57	2,559262	0,171282	0,438355		

Teoria Corten-Dolan - 1%									
Cargas Ascendentes sem Rompimento									
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - N1	Constante do Material - d	ni/N1	(Si/S1)^d	Dano Parcial	Dano	Média Dano
6	198	195949	76567	6,57	2,559183	0,171282	0,438341	1,514035	1,515947767
	217	100534	76567	6,57	1,31302	0,312724	0,410613		
	236	51611	76567	6,57	0,674063	0,542816	0,365892		
	259	22908	76567	6,57	0,299189	1	0,299189		
7	198	195860	76567	6,57	2,558021	0,171282	0,438142	1,513439	
	217	100504	76567	6,57	1,312628	0,312724	0,41049		
	236	51506	76567	6,57	0,672692	0,542816	0,365148		
	259	22944	76567	6,57	0,299659	1	0,299659		
8	198	195962	76567	6,57	2,559353	0,171282	0,43837	1,525898	
	217	103516	76567	6,57	1,351966	0,312724	0,422792		
	236	51577	76567	6,57	0,673619	0,542816	0,365651		
	259	22900	76567	6,57	0,299084	1	0,299084		
10	198	195926	76567	6,57	2,558883	0,171282	0,43829	1,513832	
	217	100538	76567	6,57	1,313072	0,312724	0,410629		
	236	51545	76567	6,57	0,673201	0,542816	0,365424		
	259	22931	76567	6,57	0,299489	1	0,299489		
11	198	196005	76567	6,57	2,559915	0,171282	0,438466	1,514872	
	217	100546	76567	6,57	1,313177	0,312724	0,410662		
	236	51535	76567	6,57	0,673071	0,542816	0,365353		
	259	23000	76567	6,57	0,300391	1	0,300391		
12	198	195996	76567	6,57	2,559797	0,171282	0,438446	1,515001	
	217	100554	76567	6,57	1,313281	0,312724	0,410694		
	236	51557	76567	6,57	0,673358	0,542816	0,365509		
	259	22997	76567	6,57	0,300351	1	0,300351		
13	198	195993	76567	6,57	2,559758	0,171282	0,43844	1,514557	
	217	100563	76567	6,57	1,313399	0,312724	0,410731		
	236	51573	76567	6,57	0,673567	0,542816	0,365623		
	259	22952	76567	6,57	0,299764	1	0,299764		

**Anexo XVIII – Análise do dano pela regra de Marin**

Teoria Marin - 1%											
Cargas Descendentes com Rompimento											
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para a Tensão relativa - Ni	Constante do Material - y	Constante do material - x	Constante do Material - q	ni/N1	(Si/S1)^q	Dano Parcial	Dano	Média Dano
2	259	22989	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300246843	1	0.300246843	3,215934987	
	236	51649	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.30058372	1,218168	0,366161514		
	217	100611	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300294591	1,45567	0,437129833		
	198	780482	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	1,194714662	1,768118	2,112396797		
5	259	28758	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.375592618	1	0.375592618	2,871071861	
	236	51493	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299675841	1,218168	0,365055565		
	217	100593	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300240866	1,45567	0,437051628		
	198	625662	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.957725566	1,768118	1,693372051		
7	259	22953	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299776666	1	0.299776666	1,540170634	
	236	51708	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300927084	1,218168	0,36657979		
	217	100576	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300190126	1,45567	0,436977767		
	198	161401	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.247062893	1,768118	0,436836411		
10	259	22956	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299815848	1	0.299815848	5,972816919	4,092147507
	236	51577	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300164699	1,218168	0,365651076		
	217	100585	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300216988	1,45567	0,43701687		
	198	1799476	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	2,754529076	1,768118	4,870333126		
14	259	22953	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299776666	1	0.299776666	4,156829552	
	236	51570	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.30012396	1,218168	0,36560145		
	217	101091	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.301727251	1,45567	0,439215314		
	198	1127731	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	1,726262439	1,768118	3,052236121		
18	259	22958	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299841968	1	0.299841968	5,291506055	
	236	51598	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.300286913	1,218168	0,365799954		
	217	100596	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.30024982	1,45567	0,437064662		
	198	1547665	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	2,36907202	1,768118	4,188799471		
19	259	22646	76567	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.295767106	1	0.295767106	5,596702543	
	236	51497	171829	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.299699119	1,218168	0,365083922		
	217	101429	335041	6.57	8.692109238	-2.12210924	0.302736083	1,45567	0,44068384		
	198	1660861	653279	6.57	8.692109238	-2.12210924	2,542345613	1,768118	4,495167674		

Teoria Marin - 1%											
Cargas Ascendentes com Rompimento											
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - Ni	Constante do Material - y	Constante do material - x	Constante do Material - q	ni/N1	(Si/S1)^q	Dano Parcial	Dano	Média Dano
1	198	195918	653279	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299899	1,768118	0.530258	2,498143	
	217	100520	335041	6.57	8.69210924	-2.122109	0.300023	1,45567	0,436734		
	236	51538	171829	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299938	1,218168	0,365375		
	259	89260	76567	6.57	8.69210924	-2.122109	1,165776	1	1,165776		
2	198	195926	653279	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299912	1,768118	0.530279	3,338295	
	217	100548	335041	6.57	8.69210924	-2.122109	0.300107	1,45567	0,436856		
	236	51525	171829	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299862	1,218168	0,365282		
	259	153584	76567	6.57	8.69210924	-2.122109	2,005877	1	2,005877		
3	198	195931	653279	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299919	1,768118	0.530293	3,329339	2,920626445
	217	100519	335041	6.57	8.69210924	-2.122109	0.30002	1,45567	0,43673		
	236	51499	171829	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299711	1,218168	0,365098		
	259	152921	76567	6.57	8.69210924	-2.122109	1,997218	1	1,997218		
4	198	195921	653279	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299904	1,768118	0.530266	2,428425	
	217	100531	335041	6.57	8.69210924	-2.122109	0.300056	1,45567	0,436782		
	236	51541	171829	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299955	1,218168	0,365396		
	259	83916	76567	6.57	8.69210924	-2.122109	1,095981	1	1,095981		
5	198	195916	653279	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299896	1,768118	0.530252	3,00893	
	217	100527	335041	6.57	8.69210924	-2.122109	0.300044	1,45567	0,436765		
	236	51526	171829	6.57	8.69210924	-2.122109	0.299868	1,218168	0,36529		
	259	128374	76567	6.57	8.69210924	-2.122109	1,676623	1	1,676623		

Teoria Marin - 1%											
Cargas Descendentes sem Rompimento											
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - Ni	Constante do Material - y	Constante do material - x	Constante do Material - q	ni/N1	(Si/S1)^q	Dano Parcial	Dano	Média Dano
1	259	22921	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299359	1	0.299359	1,632077	
	236	51553	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300025	1.218168	0.365481		
	217	100539	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300008	1.45567	0.436817		
	198	195978	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299991	1.768118	0.53042		
2	259	22969	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299986	1	0.299986	1,631194	
	236	51556	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300042	1.218168	0.365502		
	217	100168	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.298972	1.45567	0.435205		
	198	196008	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.300037	1.768118	0.530501		
3	259	22935	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299542	1	0.299542	1,634119	
	236	51547	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.29999	1.218168	0.365438		
	217	100532	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300059	1.45567	0.436787		
	198	196692	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.301084	1.768118	0.532353		
4	259	22916	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299293	1	0.299293	1,632391	1,634792267
	236	51529	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299885	1.218168	0.365311		
	217	100511	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.299996	1.45567	0.436695		
	198	196226	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.300371	1.768118	0.531091		
5	259	22979	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.300116	1	0.300116	1,639425	
	236	51542	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299961	1.218168	0.365403		
	217	100544	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300095	1.45567	0.436839		
	198	198434	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.303751	1.768118	0.537067		
6	259	22941	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.29962	1	0.29962	1,631846	
	236	51540	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299949	1.218168	0.365389		
	217	100465	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.299859	1.45567	0.436495		
	198	195949	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299947	1.768118	0.530342		
7	259	23727	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.309885	1	0.309885	1,642494	
	236	51539	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299944	1.218168	0.365382		
	217	100551	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300116	1.45567	0.436869		
	198	195955	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299956	1.768118	0.530358		

Teoria Marin - 1%											
Cargas Ascendentes sem Rompimento											
Corpo-de-prova	Tensão Alternada Aplicada (Mpa)	N. Ciclos Aplicados ni	N. Ciclos da curva SNP para Tensão mais elevada - Ni	Constante do Material - y	Constante do material - x	Constante do Material - q	ni/N1	(Si/S1)^q	Dano Parcial	Dano	Média Dano
6	198	195949	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299947	1.768118	0.530342	1,632218	
	217	100534	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300065	1.45567	0.436795		
	236	51611	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300363	1.218168	0.365892		
	259	22908	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299189	1	0.299189		
7	198	195860	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299811	1.768118	0.530101	1,631572	
	217	100504	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.299975	1.45567	0.436665		
	236	51506	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299751	1.218168	0.365148		
	259	22944	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299659	1	0.299659		
8	198	195962	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299967	1.768118	0.530377	1,644864	
	217	103516	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.308965	1.45567	0.449751		
	236	51577	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300165	1.218168	0.365651		
	259	22900	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299084	1	0.299084		
10	198	195926	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.299912	1.768118	0.530279	1,632006	1,634246246
	217	100538	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300077	1.45567	0.436813		
	236	51545	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.299978	1.218168	0.365424		
	259	22931	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299489	1	0.299489		
11	198	196005	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.300033	1.768118	0.530493	1,633084	
	217	100546	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300101	1.45567	0.436847		
	236	51535	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.29992	1.218168	0.365353		
	259	23000	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.300391	1	0.300391		
12	198	195996	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.300019	1.768118	0.530469	1,633212	
	217	100554	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300124	1.45567	0.436882		
	236	51557	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300048	1.218168	0.365509		
	259	22997	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.300351	1	0.300351		
13	198	195993	653279	6.57	8.692109	-2.122109	0.300014	1.768118	0.530461	1,632768	
	217	100563	335041	6.57	8.692109	-2.122109	0.300151	1.45567	0.436921		
	236	51573	171829	6.57	8.692109	-2.122109	0.300141	1.218168	0.365623		
	259	22952	76567	6.57	8.692109	-2.122109	0.299764	1	0.299764		

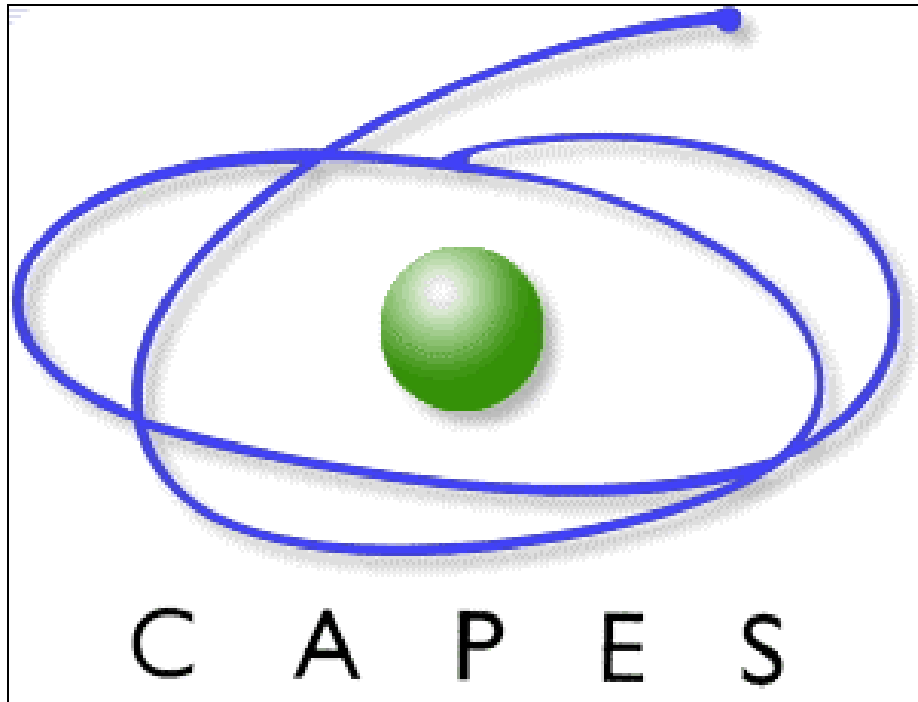
### Anexo XIX – Análise do dano pela regra de Manson

Manson - Regra Dupla Linear 1%												
Cargas Descendentes com Rompimento												
Corpo-de-Prova	Tensão Alternada Aplicada - Si (Mpa)	Ciclos até a Falha - Nfi	Nfi^0,6	Np	N'	Ciclos Aplicados - ni	ni/N'	Σ ni/N'	Início de Trinca (Ciclos)	nip	nip/Np	Σ nip/Np
2	259	76567	852	11928	64639	22989	0,35565	0,35565	93542	7069	0,24443721	0,24443721
	236	171829	1384	19373	152456	51649	0,338779	0,694429		780482	18,0790513	18,32348851
	217	335041	2066	28919	306122	100611	0,328663	1,023092				
	198	653279	3084	43171	610108	780482	1,279251	2,302343				
5	259	76567	852	11928	64639	28758	0,444899	0,444899	66534	34059	1,177719668	1,177719668
	236	171829	1384	19373	152456	51493	0,337755	0,782654		625662	14,49280752	15,67052718
	217	335041	2066	28919	306122	100593	0,328605	1,111259				
	198	653279	3084	43171	610108	625662	1,025493	2,136752				
7	259	76567	852	11928	64639	22953	0,355093	0,355093	93594	6982	0,241428057	0,241428057
	236	171829	1384	19373	152456	51708	0,339166	0,694259		161401	3,738685786	3,980113843
	217	335041	2066	28919	306122	100576	0,328549	1,022808				
	198	653279	3084	43171	610108	161401	0,264545	1,287352				
10	259	76567	852	11928	64639	22956	0,355139	0,355139	93843	6742	0,233134921	0,233134921
	236	171829	1384	19373	152456	51577	0,338306	0,693446		1799476	41,68298426	41,91611918
	217	335041	2066	28919	306122	100585	0,328578	1,022024				
	198	653279	3084	43171	610108	1799476	2,949436	3,97146				
14	259	76567	852	11928	64639	22953	0,355093	0,355093	93871	7220	0,249654617	0,249654617
	236	171829	1384	19373	152456	51570	0,33826	0,693353		1127731	26,12271213	26,37236674
	217	335041	2066	28919	306122	101091	0,330231	1,023585				
	198	653279	3084	43171	610108	1127731	1,848411	2,871995				
18	259	76567	852	11928	64639	22958	0,35517	0,35517	93791	6805	0,235300891	0,235300891
	236	171829	1384	19373	152456	51598	0,338444	0,693614		1547665	35,85004515	36,08534604
	217	335041	2066	28919	306122	100596	0,328614	1,022229				
	198	653279	3084	43171	610108	1547665	2,536705	3,558933				
19	259	76567	852	11928	64639	22646	0,350344	0,350344	95472	5957	0,205999203	0,205999203
	236	171829	1384	19373	152456	51497	0,337782	0,688125		1660861	38,4721124	38,67811116
	217	335041	2066	28919	306122	101429	0,331335	1,019461				
	198	653279	3084	43171	610108	1660861	2,722239	3,7417				

Manson - Regra Dupla Linear 1%												
Cargas Ascendentes com Rompimento												
Corpo-de-Prova	Tensão Alternada Aplicada - Si (Mpa)	Ciclos até a Falha - Nfi	Nfi^0,6	Np	N'	Ciclos Aplicados - ni	ni/N'	Σ ni/N'	Início de Trinca (Ciclos)	nip	nip/Np	Σ nip/Np
1	198	653279	3084	43171	610108	195918	0,32112	0,32112	53438	-1900	-0,098084	-0,098084
	217	335041	2066	28919	306122	100520	0,328366	0,649486		89260	7,483485	7,385401
	236	171829	1384	19373	152456	51538	0,338051	0,987537				
2	259	76567	852	11928	64639	89260	1,380892	2,368428	53422			
	198	653279	3084	43171	610108	195926	0,321133	0,321133		-1897	-0,097932	-0,097932
	217	335041	2066	28919	306122	100548	0,328458	0,649591		153584	12,87636	12,77842
	236	171829	1384	19373	152456	51525	0,337965	0,987556				
3	259	76567	852	11928	64639	153584	2,376012	3,363568	53435			
	198	653279	3084	43171	610108	195931	0,321141	0,321141		-1936	-0,099955	-0,099955
	217	335041	2066	28919	306122	100519	0,328363	0,649504		152921	12,82077	12,72082
	236	171829	1384	19373	152456	51499	0,337795	0,987299				
4	259	76567	852	11928	64639	152921	2,365755	3,353054	53432			
	198	653279	3084	43171	610108	195921	0,321125	0,321125		-1891	-0,097608	-0,097608
	217	335041	2066	28919	306122	100531	0,328402	0,649527		83916	7,035448	6,93784
	236	171829	1384	19373	152456	51541	0,33807	0,987597				
5	259	76567	852	11928	64639	83916	1,298217	2,285815	53435			
	198	653279	3084	43171	610108	195916	0,321117	0,321117		-1909	-0,098549	-0,098549
	217	335041	2066	28919	306122	100527	0,328389	0,649506		128374	10,76277	10,66422
	236	171829	1384	19373	152456	51526	0,337972	0,987477				
	198	653279	3084	43171	610108	128374	1,986002	2,97348				

Manson - Regra Dupla Linear 1%												
Cargas Descendentes sem Rompimento												
Corpo-de-Prova	Tensão Alternada Aplicada - Si (Mpa)	Ciclos até a Falha - Nfi	Nfi^0,6	Np	N'	Ciclos Aplicados ni	ni/N'	Σ ni/N'	Início de Trinca (Ciclos)	nip	nip/Np	Σ nip/Np
1	259	76567	852	11928	64639	22921	0,354598	0,354598	94057	6482	0,224146	0,224146
	236	171829	1384	19373	152456	51553	0,338149	0,692747		195978	4,539626	4,763772
	217	335041	2066	28919	306122	100539	0,328428	1,021175				
	198	653279	3084	43171	610108	195978	0,321218	1,342393				
2	259	76567	852	11928	64639	22969	0,355341	0,355341	93824	6344	0,219386	0,219386
	236	171829	1384	19373	152456	51556	0,338169	0,693509		196008	4,540321	4,759707
	217	335041	2066	28919	306122	100168	0,327216	1,020725				
	198	653279	3084	43171	610108	196008	0,321267	1,341993				
3	259	76567	852	11928	64639	22935	0,354815	0,354815	94003	6529	0,22578	0,22578
	236	171829	1384	19373	152456	51547	0,33811	0,692924		196692	4,556165	4,781945
	217	335041	2066	28919	306122	100532	0,328405	1,021329				
	198	653279	3084	43171	610108	196692	0,322389	1,343718				
4	259	76567	852	11928	64639	22916	0,354521	0,354521	94129	6382	0,220693	0,220693
	236	171829	1384	19373	152456	51529	0,337992	0,692512		196226	4,545371	4,766063
	217	335041	2066	28919	306122	100511	0,328337	1,020849				
	198	653279	3084	43171	610108	196226	0,321625	1,342474				
5	259	76567	852	11928	64639	22979	0,355495	0,355495	93804	6740	0,233054	0,233054
	236	171829	1384	19373	152456	51542	0,338077	0,693572		198434	4,596517	4,82957
	217	335041	2066	28919	306122	100544	0,328444	1,022017				
	198	653279	3084	43171	610108	198434	0,325244	1,34726				
6	259	76567	852	11928	64639	22941	0,354907	0,354907	93988	6477	0,22396	0,22396
	236	171829	1384	19373	152456	51540	0,338064	0,692971		195949	4,538954	4,762914
	217	335041	2066	28919	306122	100465	0,328186	1,021157				
	198	653279	3084	43171	610108	195949	0,321171	1,342328				
7	259	76567	852	11928	64639	23727	0,367067	0,367067	90268	10283	0,35558	0,35558
	236	171829	1384	19373	152456	51539	0,338057	0,705124		195955	4,539093	4,894674
	217	335041	2066	28919	306122	100551	0,328467	1,033592				
	198	653279	3084	43171	610108	195955	0,321181	1,354772				

Manson - Regra Dupla Linear 1%												
Cargas Ascendentes sem Rompimento												
Corpo-de-Prova	Tensão Alternada Aplicada - Si (Mpa)	Ciclos até a Falha - Nfi	Nfi^0,6	Np	N'	Ciclos Aplicados ni	ni/N'	Σ ni/N'	Início de Trinca (Ciclos)	nip	nip/Np	Σ nip/Np
6	198	653279	3084	43171	610108	195949	0,321171	0,321171	53423	-1812	-0,093556	-0,093556
	217	335041	2066	28919	306122	100534	0,328412	0,649583		22908	1,920588	1,827032
	236	171829	1384	19373	152456	51611	0,338529	0,988112				
	259	76567	852	11928	64639	22908	0,354397	1,342509				
7	198	653279	3084	43171	610108	195860	0,321025	0,321025	53461	-1955	-0,100895	-0,100895
	217	335041	2066	28919	306122	100504	0,328314	0,649339		22944	1,923606	1,822711
	236	171829	1384	19373	152456	51506	0,337841	0,987179				
	259	76567	852	11928	64639	22944	0,354954	1,342133				
8	198	653279	3084	43171	610108	195962	0,321192	0,321192	51935	-358	-0,018483	-0,018483
	217	335041	2066	28919	306122	103516	0,338153	0,659345		22900	1,919917	1,901435
	236	171829	1384	19373	152456	51577	0,338306	0,997651				
	259	76567	852	11928	64639	22900	0,354273	1,351925				
10	198	653279	3084	43171	610108	195926	0,321133	0,321133	53427	-1882	-0,097157	-0,097157
	217	335041	2066	28919	306122	100538	0,328425	0,649558		22931	1,922516	1,825359
	236	171829	1384	19373	152456	51545	0,338096	0,987654				
	259	76567	852	11928	64639	22931	0,354753	1,342407				
11	198	653279	3084	43171	610108	196005	0,321263	0,321263	53403	-1868	-0,096448	-0,096448
	217	335041	2066	28919	306122	100546	0,328451	0,649714		23000	1,928301	1,831853
	236	171829	1384	19373	152456	51535	0,338031	0,987744				
	259	76567	852	11928	64639	23000	0,35582	1,343565				
12	198	653279	3084	43171	610108	195996	0,321248	0,321248	53402	-1845	-0,095223	-0,095223
	217	335041	2066	28919	306122	100554	0,328477	0,649725		22997	1,928049	1,832826
	236	171829	1384	19373	152456	51557	0,338175	0,9879				
	259	76567	852	11928	64639	22997	0,355774	1,343674				
13	198	653279	3084	43171	610108	195993	0,321243	0,321243	53398	-1825	-0,094204	-0,094204
	217	335041	2066	28919	306122	100563	0,328507	0,649749		22952	1,924277	1,830072
	236	171829	1384	19373	152456	51573	0,33828	0,98803				
	259	76567	852	11928	64639	22952	0,355078	1,343107				



*CENTRO DE DESENVOLVIMENTO  
DA TECNOLOGIA NUCLEAR*

*COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR*

Belo Horizonte, 06/10/2000

## **NORMAS PARA APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO**

### **1- Introdução**

As dissertações deverão ser apresentadas no formato aprovado pelo Colegiado de pós-graduação em Engenharia Mecânica, o qual está em conformidade com as exigências da norma PB-4R da ABNT, de acordo com a presente regulamentação.

A dissertação deve ser escrita em língua portuguesa e impressa em um só lado de papel branco, de boa qualidade, formato A4 (210mm x 297 mm) em espaço 1,5, com letra Arial ou Times New Roman 12. Não é permitido o uso de papel timbrado ou couchê. O texto da dissertação deve obedecer as seguintes margens: Superior = 25 mm; Inferior = 20 mm; Esquerda = 40 mm e Direita = 20 mm, sendo justificado (alinhado) nas margens direita e esquerda. Entre parágrafos, deve-se fornecer um espaço de 6pt, correspondente à metade de um espaço simples. Títulos de seção e subseção devem ser precedidos de espaço simples (12pt), e procedidos de meio espaço simples (6pt).

### **2- Estrutura da Dissertação**

A dissertação deverá ser organizada em conjuntos contendo as seguintes partes principais: pré-texto, corpo principal e elementos de complementação.

#### **2.1- Pré-Texto**

Nesta parte da estrutura da dissertação devem constar os seguintes itens especificados abaixo, pela ordem.

##### **2.1.1- Capa**

A capa tem desenho próprio e deve ser obtida junto à Secretaria de Pós-graduação, conforme mostrado no Anexo I.

### **2.1.2- Páginas de Rosto**

A página de rosto, que não deve ter o número de página, deve obedecer ao modelo mostrado no Anexo I

Após a página acima, deve ser incluída a página em que está o comprovante de apresentação e aprovação da dissertação. Esta página deve obedecer, o modelo do Anexo I.

### **2.1.3- Página de Dedicatória (Opcional)**

A página de dedicatória do trabalho é optativa. Consta de declarações simples como: a meus pais, à minha esposa, a todos que lutam por um ideal de paz, amor e justiça, etc. Deve ser alinhado à direita, no canto inferior da página.

### **2.1.4- Página de Agradecimentos**

Esta página é opcional, porém é obrigatório mencionar, quando for o caso, de ter, no mínimo, o(s) nome(s) da(s) instituição(ões) financiadora(s) da dissertação.

### **2.1.5- Página de Resumo**

Deve conter informações que permitam ao leitor decidir se quer ler o trabalho completo ou não. Apresentar de forma concisa os objetivos, métodos e conclusões do trabalho.

O resumo deve ser escrito em português e inglês (*Abstract*) não devendo ultrapassar uma página (em torno de 500 palavras). É desejável que o resumo seja constituído de apenas um parágrafo, contendo de 5 a 8 frases. Admite-se a inclusão de uma terceira língua facultativa. Os resumos, em cada língua, devem ser apresentados em páginas separadas.

### **2.1.6- Página do Índice**

No índice, os capítulos e suas divisões devem ser relacionados na mesma ordem em que se sucedem no texto, seguidos de respectivas paginações. As páginas que precedem o índice não devem ser relacionadas.

### **2.1.7- Lista de Figuras (Opcional)**

Uma lista de figuras, na mesma ordem de entrada no texto com respectivas paginações, poderá ser apresentada.

#### **2.1.8- Lista de Tabelas (Opcional)**

Uma lista de tabelas, na mesma ordem de entrada no texto com respectivas paginações, poderá ser apresentada.

#### **2.1.9- Nomenclatura**

Uma lista de todos os símbolos utilizados na dissertação, em ordem alfabética (latinos e gregos), deverá ser obrigatoriamente apresentada contendo o seu significado. Os símbolos gregos devem ser apresentados após os latinos, também em ordem alfabética. A definição de cada símbolo também deverá estar contida no texto.

Cada um dos itens anteriores localizados após a página de índice deve iniciar-se em página própria, e a ordenação deve ser feita por letras romanas minúsculas: i, ii, iii, iv, v, vi, etc.

### **2.2- Corpo Principal**

O texto do corpo principal deve ser apresentado na forma de capítulos, constando das seguintes partes: introdução, desenvolvimento, conclusão e referências bibliográficas.

Excetuando-se as páginas que iniciam os capítulos, todas as demais páginas do corpo principal devem apresentar um cabeçalho contendo o número e título do capítulo. Este cabeçalho deve ser justificado à esquerda, escrito com letra Arial ou Times New Roman itálico, 11 pt. Todas as páginas do corpo principal devem ser numeradas seguidas e uniformemente com números arábicos. Cada capítulo deverá iniciar-se em uma página nova, devendo constar a palavra Capítulo 1, 2... com seu título logo a seguir. Nas páginas que iniciam os capítulos, a numeração deve ser centralizada no rodapé, a 12,5 mm da margem inferior. Nas demais páginas, o número deve vir no cabeçalho, a 12,5 mm da margem superior da página e a 20 mm do lado direito da mesma.

Os capítulos existentes devem ser numerados em algarismos arábicos. O texto pode sofrer divisões em seções e subseções, com títulos em negrito, precedidos por algarismos arábicos, assumindo o seguinte aspecto:

## **1- Seção (14pt)**

### **1.1- Subseção de 1ª Ordem (12pt)**

#### **1.1.1- Subseção de 2ª Ordem (12pt)**

##### **1.1.1.1-Subseção de 3ª Ordem (12pt)**

Subseções de Quarta ordem devem ser evitados. Neste caso, utilize títulos em itálico. Os títulos de seções e subseções devem ter palavras iniciadas em letra maiúscula, continuadas em letras minúsculas, exceto artigos e advérbios, que devem ser completamente escritos em letras minúsculas.

### **2.2.1- Introdução**

A introdução é um capítulo obrigatório, onde o texto visa esclarecer os objetivos do trabalho e a abrangência, a importância e as relações básicas com outros estudos no mesmo tema, de forma a justificar sua execução.

### **2.2.2- Desenvolvimento**

O desenvolvimento pode ser organizado em um ou mais capítulos, devendo contemplar a revisão bibliográfica, a metodologia utilizada, apresentação e discussão dos resultados. A organização destes capítulos deve ser feita de forma a tornar claro o desenvolvimento do trabalho. Uma breve descrição destes itens é apresentada a seguir.

#### **2.2.2.1- Revisão Bibliográfica**

É uma revisão do estado da arte. Serve como base para fundamentar o trabalho, devendo ser incluído toda a informação pertinente ao tema.

#### **2.2.2.2- Metodologia**

A descrição das técnicas usadas deve ser precisa e clara, permitindo ao leitor a compreensão do trabalho, e tornar possível que outros pesquisadores repitam na íntegra o mesmo método.

#### **2.2.2.3- Resultados**

A apresentação dos resultados deve ser objetiva, clara, lógica e acompanhada de comentários. A utilização de figuras e tabelas facilita bastante esta parte do

texto. Os dados obtidos, mesmo em grande quantidade, devem fazer parte do trabalho, de preferência em forma de anexo.

#### **2.2.2.4- Discussão dos Resultados**

Nesta etapa são comparados, avaliados e criticados os resultados. Discute-se o valor absoluto e relativo dos resultados.

#### **2.2.3- Conclusão**

Este capítulo é obrigatório. Consta de deduções lógicas baseadas e fundamentadas no texto. Devem ser empregadas frases tão breves quanto possíveis. Quando agrupadas com lógica e numeradas, tornam-se mais claras. Neste capítulo também deverão ser apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

#### **2.2.4- Referências Bibliográficas**

Esta seção deve ser incluída logo após o capítulo das conclusões, contendo a lista das referências bibliográficas usadas no trabalho.

As referências devem ser citadas no texto pelo último nome do autor (es) e do ano de publicação. Quando a referência tiver até dois autores, mencionam-se todos, na ordem em que aparecem na publicação, conforme mostrado nos exemplos abaixo:

“...Em trabalho recente (Silva e Maia, 1997)...”

“...Recentemente Silva e Maia (1997)...”.

“...Silva (1997) determinou...”ou “...foi determinado (Maia, 1997)...”.

Caso haja mais de dois autores, menciona-se somente o primeiro, seguido da expressão “*et al.*”. Exemplo:

“...Maia *et al.* (1987) calcularam...” ou “... foi calculado (Maia *et al.*, 1987)...”.

Quando for mencionado mais de um trabalho em uma mesma frase, separa-se os trabalhos por ponto e vírgula, como no exemplo:

“...o problema de fadiga foi tratado (Maia, 1992; Silva, 1994) de acordo ...”.

Quando duas ou mais referências por um mesmo autor ou grupo de autores tiverem uma identificação seqüencial no texto, separa-se os anos de publicações por ponto e vírgula. Caso haja duas ou mais referências do mesmo

ano, devem ser acrescentadas as letras “a”, “b”, etc., ao ano da publicação.

Exemplo:

“...o problema de emissões foi tratado (Maia *et al.*, 1980a; 1980b)...” ou “...  
Maia *et al.* (1980a;1980b) trataram do problema de fadiga ...”.

A lista das referências deve ser apresentada ao final da dissertação em ordem alfabética de acordo com o último nome do primeiro autor e, para mais de uma referência por um mesmo autor ou grupo de autores, por ordem crescente de ano de publicação. Além do(s) sobrenome(s) do(s) autor(es), devem ser apresentadas as seguintes informações:

#### *Livros*

Ano de publicação, título em itálico, edição, local, e editora::

Dieter, G. E., 1988, *Mechanical Metallurgy and Applications*, 3 ed., Boston, McGraw Hill.

#### *Artigos em Periódicos*

Ano de publicação, título do artigo, entre aspas, nome do periódico em itálico, volume, número, páginas inicial e final do artigo após a abreviatura pág.

Ilesan, D., 1996, “Existence Theorems in the Theory of Mixtures”, *Journal of Elasticity*, v.42, n.2, pág. 145-162.

#### *Artigos em Anais*

Ano de publicação, título do artigo entre aspas, anais do congresso em itálico, volume se for necessário, local e mês do evento, páginas inicial e final do artigo após a abreviatura pp.

Gurtin, M.E., 1977, “On the Nonlinear Theory of Elasticity”, *Proceedings of the International Symposium on Continuum Mechanics*, , Rio de Janeiro, ago., pág. 237-253.

Maia, S., e Dieter, G.E., 1999, “Análise da Sensibilidade do Estudo de Engenharia no Mundo”, *Anais do VI Encontro de Engenheiros Nacionais*, vol. II, Pirapora, dez., pág. 390-398.

#### *Dissertações ou Teses*

Ano da defesa, título em itálico, grau Mestrado/Doutorado, departamento, instituição e local

Santos, E.S., 1999, *Correlação de danos de Fadiga de uma Barra Estabilizadora em Provas de Laboratório e de Estrada*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Paes Junior, H.R., 1994, *Influência da Espessura da Camada intrínseca e Energia do Fóton na Degradação de Células Solares*, Tese de Doutorado, Departamento de Energia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Quando a referência tiver até dois autores, menciona-se ambos, na ordem em que aparecem na publicação. Caso haja mais de dois autores, menciona-se somente o primeiro, seguido da expressão “*et al.*”. Exemplo:

Gurtin, M.E. *et al.*, 1977, “On the Nonlinear Theory of Elasticity”, *Proceedings of the International Symposium on Continuum Mechanics*, vol. I, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ago., pág. 237-253.

Quando duas ou mais referências do mesmo ano tiverem a mesma autoria, devem ser acrescentadas as letras “a”, “b”, etc., ao ano da publicação.

Caso tenham dois ou mais autores com o mesmo sobrenome e iniciais, iguais (identificar nas letras a, b, c) e colocar o nome completo do autor na primeira vez.

Exemplo:

Gurtin, M.E., 1977a, “On the Nonlinear Theory of Elasticity”, *Proceedings of the International Symposium on Continuum Mechanics*, vol. I, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ago., pág. 237-253.

Gurtin, M.E., 1977b, “Influence of Nonlinear Theory of Elasticity on...”, *Proceedings of the International Symposium on continuum Mechanics*, vol. I, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ago., pág. 237-253.

### **2.3- Apêndices**

Citações e/ou dados demasiadamente longos, mas imprescindíveis ao trabalho são colocados em forma de apêndices. Os apêndices são numerados na série

natural de números romanos. Devem aparecer logo após a seção de referências bibliográficas.

## **2.4- Anexos**

Listas de dados experimentais coletados, listagem de programas computacionais, cópias de artigos publicados sobre o trabalho da dissertação e reproduções de gráficos ou tabelas consultados de outras fontes podem ser apresentados na forma de anexos. Os anexos são numerados na série natural de números romanos. Devem aparecer logo após os apêndices.

## **3- Informações Adicionais**

### **3.1- Notas de Rodapé**

As notas de rodapé devem ser evitadas. Caso sejam imprescindíveis, devem ser escritas com letras Arial ou Times New Roman itálico, 11 pt. Estas notas devem ser alusivas a alguma referência ou notação que não seja incluída diretamente no texto. As notas devem ser curtas e referidas com auxílio de um sinal expoente numeral no texto.

### **3.2- Expressões Matemáticas**

As expressões matemáticas ou equações devem ser numeradas seguidas com algarismos arábicos, por capítulo. As equações devem ser centralizadas no texto. Citação da equação no texto deve ser realizada utilizando a abreviatura “Eq.”, exceto no início da frase. Exemplo:

“Equação (3.1) mostra que a força ...” ou

“A força, conforme é mostrado na Eq. (3.1), ...”

$$F = m \cdot a \quad (3.1)$$

### **3.3- Tabelas**

As tabelas são identificadas numericamente de forma seqüencial por capítulos. A legenda deve ser colocada acima da tabela propriamente dita e apenas iniciada com letra maiúscula, alinhada à esquerda (sem tabulação) com o texto. Toda tabela deve ser mencionada no texto e sua colocação deve ser feita ao longo do texto, o mais próximo possível de sua citação. Citação da tabela no

texto deve ser realizada utilizando a abreviatura “Tab.”, exceto no início da frase. Exemplo:

“Tabela 5.2 mostra ...” ou

“...Conforme pode ser visto na Tab. 5.2,....”.

Tabela 5.2 – Exemplo de como deve ser apresentada uma tabela

$\sigma$ (MPa)	$a$ (m/s <sup>2</sup> )	T (K)	r (mm)
$300 \pm 21$	$0,7 \times 10^{-8}$	210	0,7729
$500 \pm 21$	$1,0 \times 10^{-8}$	230	0,9878

### 3.4- Figuras

As figuras são identificadas numericamente de forma seqüencial por capítulos. A legenda deve ser iniciada com a palavra Figura, e deve ser colocada abaixo da ilustração propriamente dita. A figura e a legenda devem ser centralizadas em relação ao texto. Toda figura deve ser mencionada no texto e sua colocação deve ser feita ao longo do texto, o mais próximo possível de sua citação. Citação da figura no texto deve ser realizada utilizando a abreviatura “Fig.”, exceto no início da frase. Exemplo:

“Figura 5.1 mostra ...” ou

“...Conforme é mostrado na Fig. 5.1,....”.

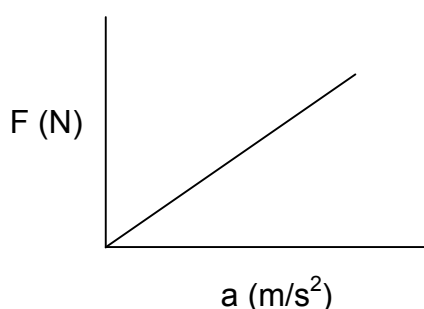


Figura 5.1- Variação da força com a aceleração.

### 3.5- Conclusão

Após a aprovação da dissertação, o candidato deverá encaminhar à secretaria do mestrado, às suas despesas, no mínimo uma cópia da dissertação para cada membro da banca examinadora, uma cópia para a Secretaria do

Mestrado em Engenharia Automotiva, uma cópia para o Departamento de Engenharia Mecânica, uma cópia para a Diretoria do IPUC, uma cópia para a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e uma cópia para a biblioteca da PUC Minas.